



**UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU**

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação *Stricto Sensu*

Mestrado Profissional em Engenharia Civil

**Eduardo de Faria Menacker**

**REFORÇO ESTRUTURAL COM FIBRA DE CARBONO  
EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

Prof. Dr. Sandro Martini

Orientador

São Paulo, SP – Brasil

2021

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca  
da Universidade São Judas Tadeu**

Bibliotecária: Adriana Aparecida Magalhães - CRB 8/10264

B928i Menacker, Eduardo de Faria.  
Reforço estrutural com fibra de carbono em estruturas de concreto armado / Eduardo de Faria Menacker. - São Paulo, 2021.  
f. 142: il.; 30 cm.

Orientador: Sandro Martini.  
Dissertação (mestrado) – Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2021.

1. Reforço estrutural. 2. Fibra de carbono. 3. Concreto armado. I. Martini, Sandro. II. Universidade São Judas Tadeu, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22 – 624

# **REFORÇO ESTRUTURAL COM FIBRA DE CARBONO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

**Eduardo de Faria Menacker**

Composição da Banca Examinadora:

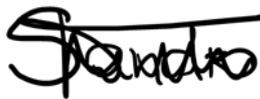
Prof. Dr. Sandro Martini- Universidade São Judas Tadeu (USJT)

Prof. Dr. Nestor Kenji Yoshikawa - Universidade São Judas Tadeu (USJT)

Prof. Dr. João Claudio Bassan de Moraes - Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

**USJT**

Declaro que a Dissertação do aluno Eduardo de Faria Menacker intitulada Reforço Estrutural com Fibra de Carbono em Estruturas de Concreto Armado, cuja defesa foi realizada em 27/08/2021 encontra-se devidamente corrigida e aprovada por mim, Prof. Dr. Sandro Martini e de acordo com as sugestões da banca examinadora.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Sandro', with a horizontal line drawn above the letters.

Prof. Dr. Sandro Martini (orientador)

## Agradecimentos

Agradecemos em primeiro lugar a Deus por ser à base das nossas conquistas.

Aos meus pais, por me terem gerado, educado, por me mostrar que com educação conseguimos vencer a qualquer obstáculo, que os valores somos nós que escolhemos e por me terem alfabetizado e pelos seus esforços e sacrifícios que fizeram para que eu chegasse até aqui. A minha mãe Maria Rute de Faria Menacker (*in memoriam*), que durante este curso, partiu nos deixando uma lição que todo o esforço será recompensado, que jamais podemos desistir de nossos objetivos. À minha mãe, saudades eternas e ao amor incondicional, partilho neste momento a felicidade por mais este passo alcançado e sei que de onde a senhora esteja me deu inspiração para que concretizasse mais este sonho e, que sonharemos juntos sempre.

Ao meu irmão Ricardo de Faria Menacker que cuidou de minha mãe, nossa saudosa e eterna baixinha, enquanto estudava.

Ao Professor Dr. Sandro Martini, pela dedicação em suas orientações prestadas e o para Professor Mauricio pelo livro que me deu de presente que virou meu livro de cabeceira nos últimos meses, pelas dicas, orientação e pela ajuda no ensaio com as vigas de concreto, nos incentivando e colaborando no desenvolvimento de nossas idéias e deste trabalho a que me conduziu com presteza e sabedoria.

Ao Eng. Civil Jozenias Vale que em conjunto com a Empresa MC BAUCHEMIE, disponibilizou todo o material para estudo, além das amostras dos produtos.

Ao Eng. Civil Perito em Estruturas e Patologias João Batista Dumangin, sócio proprietário da empresa Enplatec, pelos ensinamentos que me foi passado, pelas explicações em relação à escolha de projeto, e disponibilização dos projetos, junto com o laudo técnico, ficha técnica dos materiais e dados fotográficos anexados neste estudo de caso. Ao Eng. Civil Antônio Ferreira Cintra e ao estagiário Luiz Felipe, empresa A. F. CINTRA ENG. e CONSTRUÇÕES LTDA, por me incentivar, por seu apoio desta jornada que não se encerrará por aqui.

A toda equipe técnica do laboratório da Universidade São Judas, por toda ajuda força e orientação. Aos professores Sandro Martini, Nestor Kenji Yoshikawa e Mostafa Galal Abdelfattah Mohamed Aboelkheir, pelos comentários e observações na banca de qualificação. A todos os professores e colegas do curso, que nos tornamos amigos e parceiros de trabalhos e companheirismo que tornou este trabalho em realidade.

*“Você ganha força, coragem e confiança através de cada experiência em que você realmente para e encara o medo de frente”*

Eleanor Roosevelt

## Resumo

O concreto armado une as qualidades do concreto convencional com as características do aço, o que possibilita construir elementos das mais variadas formas e dimensões, com relativa rapidez e facilidade, para os mais variados tipos de obra, como por exemplo estruturas de edifícios, pontes, viadutos e rodovias. Embora as estruturas de concreto devam atender aos requisitos mínimos de qualidade durante o período de construção e durante a sua utilização, o concreto está sujeito a um processo de deterioração oriundo de diversas fontes. Uma das alternativas na recuperação das estruturas de concreto é a utilização de um tecido de fibra de carbono. O objetivo deste trabalho foi investigar a utilização de um tecido de fibra de carbono como um método efetivo na reparação de estruturas de concreto. Uma campanha experimental foi desenvolvida com a realização de ensaios mecânicos de resistência à compressão e à flexão em placas de concreto com e sem fibra de carbono. Uma aplicação da técnica de reparo com tecido de fibra de carbono foi empregada em um condomínio residencial na cidade do Guarujá, São Paulo. Os resultados da campanha experimental, bem como a utilização do tecido de fibra de carbono no reparo das estruturas do condomínio foram promissores. Por último, é necessário citar a Agenda 2030, documento assinado em 2015 na cidade de Nova York, pelos 193 Estados-membros da Organização das Nações Unidas (ONU), que tem o objetivo de promover o desenvolvimento sustentável por meio de medidas e ações. Os países se comprometeram a implementar este plano de ação por meio de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas. Dentro dos 17 objetivos, este trabalho relaciona-se com o ODS 11: Cidades e Comunidades Sustentáveis.

**Palavras-chave:** Patologia do Concreto Armado. Reforço Estrutural com Fibra de Carbono. Recuperação de Concreto Armado.

## Abstract

Reinforced concrete unites the qualities of conventional concrete with the characteristics of steel, which makes it possible to build elements of the most varied shapes and dimensions, relatively quickly and easily, for the most diverse types of work, such as building structures, bridges, viaducts, and highways. Although concrete structures must meet minimum quality requirements during the construction period and their use, concrete is subject to a deterioration process from various sources. One of the alternatives in the recovery of concrete structures is the use of a carbon fiber fabric. The aim of this work was to investigate the use of carbon fiber fabric as an effective method for repairing concrete structures. An experimental campaign was developed to realize mechanical tests of resistance to compression and bending in concrete slabs with and without the carbon fiber. An application of the carbon fiber fabric repair technique was used in a residential condominium in the city of Guarujá, São Paulo. The results of the experimental campaign and the use of carbon fiber fabric in the repair of condominium structures were promising. Finally, it is necessary to mention the 2030 Agenda, a document signed in 2015 in New York City by the 193 Member States of the United Nations (UN), which aims to promote sustainable development through measures and actions. Countries committed to implementing this action plan through 17 Sustainable Development Goals (SDGs) and 169 targets. Within the 17 objectives, this work is related to the SDG 11: Sustainable Cities and Communities.

**Keywords:** Pathology of Reinforced Concrete. Structural Reinforcement with Carbon Fiber, Reinforced Concrete Recovery.

## Lista de Figuras

Figura 1 - Viga de concreto: a) sem armadura; b) com armadura.....	12
Figura 2 - Zonas de tração e compressão.....	13
Figura 3 - Zonas de tração, compressão e linha neutra da estrutura.....	13
Figura 4 - Fissuras em uma viga após ensaio experimental em laboratório.....	14
Figura 5 - Causas de anomalias em edifícios.....	19
Figura 6 - Incidência dos diferentes tipos de erro de projeto no total dos erros.....	19
Figura 7- Manifestações patológicas no Brasil, segundo Paulo Helene.....	20
Figura 8 - Causas de fissuras no Rio Grande do Sul (esquerda) e causas de fissura em Recife/PE. ....	21
Figura 9 - Diferentes desempenhos de uma estrutura com o tempo em função de diferentes fenômenos patológicos.....	21
Figura 10 - Modelo holístico da deterioração do concreto a partir dos efeitos ambientais. ....	23
Figura 11 - Classificação das causas de deterioração do concreto.....	24
Figura 12 - Queda da estrutura de um viaduto após batida de caminhão.....	25
Figura 13 - Agentes físicos de deterioração do concreto.....	26
Figura 14 - Exemplo de deterioração estrutural por agentes físicos.....	26
Figura 15 - Tipos e incidência de fissuras em concreto armado.....	30
Figura 16 - Tipos de fissuras ocorridas em estruturas de concreto.....	30
Figura 17 - Fissuras devido à expansão térmica da laje da cobertura.....	31
Figura 18 - Trincas de cisalhamento em viga.....	32
Figura 19 - Fissura no concreto por retração hidráulica.....	32
Figura 20 - Trincas de flexão em elementos de concreto armado.....	33
Figura 21 - Trincas de compressão em elementos de concreto armado.....	34
Figura 22 - Exemplos de fissuras e trincas por compressão (esmagamento).....	34
Figura 23 - Esquema de fissura causada por torção.....	35
Figura 24- Exemplo de fissura causada por torção.....	36
Figura 25 - Deterioração do concreto através de reações químicas.....	37
Figura 26 - Exemplos de deterioração por ataque de sulfatos, ataque álcalis-agregados, hidratação de CaO E Mg livres.....	40
Figura 27 - Evolução da deterioração de estruturas de concreto por corrosão de armaduras.....	42
Figura 28 - Célula de corrosão.....	43
Figura 29 - Representação esquemática da corrosão do aço no concreto.....	43
Figura 30 - Tipos de corrosão e fatores que provocam.....	45
Figura 31 - Volumes relativos do ferro e de alguns de seus produtos de corrosão.....	45
Figura 32 - Armadura com corrosão eletroquímica.....	46

Figura 33 - Componentes e classificação hierárquica de compósitos poliméricos.....	47
Figura 34 - Fabricação de fibra de carbono. ....	48
Figura 35 - Esquema do processo de fabricação de fibras de carbono.....	49
Figura 36 - Sistemas de reforço empregando fibra de carbono.....	50
Figura 37 - Reforço com fibras de carbono no viaduto Santa Tereza. ....	50
Figura 38 - Tipos de reforços com fibras de carbono em uma estrutura. ....	51
Figura 39 - (a) Representação do sistema de fibra de carbono e (b) ampliação do sistema em microscópio.....	52
Figura 40 - Gráfico comparativo do compósito de fibra de carbono com aço e alumínio.....	53
Figura 41 - Reforço de viga por aumento de altura. ....	54
Figura 42 - Reforço de viga com concreto e armaduras suplementares. ....	54
Figura 43 - Reforço de viga com chapa metálica. ....	55
Figura 44 - Reforço de viga com protensão externa. ....	56
Figura 45 - Representação esquemática de coluna reforçada com fibra de carbono. ....	58
Figura 46 – Exemplo de coluna reforçada com fibra de carbono por confinamento.....	58
Figura 47 - Aplicações das mantas compósitos de epóxi com fibra de carbono como reforço ao esforço cortante.....	59
Figura 48 – Exemplo de coluna reforçada com fibra de carbono por esforço cortante. ....	59
Figura 49 - Diagrama de deformações e resultantes de uma viga reforçada com compósitos de fibra de carbono.....	60
Figura 50 - Reforços em fibra de carbono para o acréscimo de resistência de vigas para flexão e força cortante.....	61
Figura 51 - Reforço de uma estrutura a esforço de flexão e a esforço de tração. ....	61
Figura 52 - Reforço de laje a flexão. ....	62
Figura 53 - Emenda por transpasse (a) e justaposição lateral (b).....	62
Figura 54 - Remoção da superfície desagregada. ....	64
Figura 55 - Injeção de fissuras.....	65
Figura 56 – (a) Lixamento de superfície de concreto e (b) limpeza da superfície de concreto. ....	65
Figura 57 - Arredondamento dos cantos vivos. ....	66
Figura 58 - Sistemas compostos com fibra de carbono.....	67
Figura 59 - Aplicação do imprimador primário.....	68
Figura 60 - Saturação da fibra na bancada.....	69
Figura 61 - Ferramental utilizado para aplicação. ....	69
Figura 62 - Rolagem das bolhas de ar. ....	70
Figura 63 – Reforço com laminado de fibra de carbono e reforço com tecido de fibra de carbono. ....	71
Figura 64 – Planejamento dos ensaios.....	73

Figura 65 - Diagrama de dosagem com base no método IPT-EPUSP – quadrante $F_{cj}$ x relação água/cimento. ....	76
Figura 66 - Diagrama de dosagem com base no método IPT-EPUSP – quadrante relação água/cimento x m (areia + brita).....	76
Figura 67 - (a) Pesagem do agregado miúdo: areia e (b) agitador de peneiras utilizadas na separação do agregado miúdo: areia. ....	78
Figura 68 - Exemplo de tela de aço com malha de 20 x 20 cm.....	79
Figura 69 - Tecido com PRFC.....	80
Figura 70 - Resina epoxídica – (a) Componente A e (b) Componente B.....	81
Figura 71 - Esquemas com as dimensões dos corpos de prova das amostras para teste de flexão. ....	82
Figura 72- Formas para moldagem das vigas. ....	83
Figura 73 - Betoneira em operação.....	83
Figura 74 - Vigas concretadas. ....	84
Figura 75 – Corpos-de- prova cilíndricos. ....	84
Figura 76 - Realização do <i>Slump-Test</i> no concreto empregado nas amostras. ....	85
Figura 77 - Preparação da superfície com lixamento mecânico.....	86
Figura 78 - Aplicação de resina epóxi no substrato após lixamento. ....	86
Figura 79 - Aplicação do tecido de fibra de carbono e retirada do ar com auxílio de rolo metálico. ....	87
Figura 80 - Amostra de fibra de carbono (esquerda); fibra de carbono estendida na máquina (centro), fibras de carbono rompidas após o teste. ....	88
Figura 81 - Corpos de prova confeccionados para o teste de compressão. ....	88
Figura 82 - Ensaio do primeiro corpo, ensaio: compressão simples. ....	89
Figura 83 – Ensaio de flexão nas diversas vigas.....	90
Figura 84 - Gráfico da carga versus deslocamento para as amostras de tecido de fibra de carbono. ....	92
Figura 85 - Gráfico da carga versus deslocamento – Grupo C. ....	94
Figura 86 - Gráfico da carga versus deslocamento – Grupo B. ....	95
Figura 87 - Estágios básicos do processo de ruptura de um concreto com armadura de aço. ....	96
Figura 88 - Gráfico da carga versus deslocamento – Grupo A. ....	97
Figura 89 – Comparação entre as cargas máximas suportadas para cada um dos grupos. ....	98
Figura 90 - Vista geral de acesso aos blocos. ....	100
Figura 91 – (a) Remoção do revestimento com indícios de anomalia e (b) remoção do forro em PVC. ....	101
Figura 92 - (a) Vista em detalhe da viga do 1º pavimento do edifício bloco D e (b) vista do teto do 1º pavimento do edifício bloco D. ....	102
Figura 93 - Exemplos de anomalias encontradas na inspeção da torre. (a) Armadura com alto teor de corrosão com estribos e a barra de aço rompido, (b) cobrimento não condizente com a norma e (c) vista em detalhe da viga e pilar externo.....	102

Figura 94 - Planta de cadastramento dos blocos. ....	103
Figura 95 - (a) Quantitativo eixo e (b) quantitativo eixo x. ....	103
Figura 96 - Relação do custo total do projeto de instalação de reforços de fibra de carbono. ....	104
Figura 97 - Participação dos custos no projeto de instalação do reforço de fibra de carbono. ....	109
Figura 98 - Relação do custo total do projeto reforço com adição de armadura, forma de madeira e graute. ....	110
Figura 99 - Participação dos custos no projeto de instalação do reforço com graute. ....	112
Figura 100 - Custo total e suas composições para o reforço com adição de armadura. ....	113
Figura 101 - Etapas do processo de recuperação do bloco com reforço de fibra de carbono. ....	116
Figura 102 - Relatório fotográfico – pós-obra 02/06/2021 – Condomínio Edifício Praias de Guarujá. ....	117

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Classe de agressividade ambiental.....	15
Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.....	15
Tabela 3 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\delta_c = 10$ mm.....	16
Tabela 4 - Percentual das principais causas de patologias na construção civil. ....	20
Tabela 5 - Agentes ou fatores de deterioração.....	25
Tabela 6 - Definição para fissura trinca, rachadura e fenda. ....	28
Tabela 7 - Características da fissura, trinca e rachadura. ....	28
Tabela 8 - Exigências de durabilidade quanto às fissuras em concreto simples e armado. ....	29
Tabela 9 - Efeito de alguns produtos químicos comuns sobre o concreto. ....	37
Tabela 10 - Principais mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto armado. ....	39
Tabela 11 – Fenômenos relacionados às reações químicas na deterioração do concreto armado. ....	40
Tabela 12 – Definições de corrosão na perspectiva de diferentes autores. ....	41
Tabela 13- Classificação da corrosão segundo sua morfologia. ....	44
Tabela 14 - Comparativo entre diferentes tipos de fibras. ....	51
Tabela 15 - Relação das amostras empregadas no trabalho. ....	73
Tabela 16 - Processo de preparação das amostras para os testes experimentais. ....	74
Tabela 17 - Normas empregadas na condução da parte experimental. ....	74
Tabela 18 – Constituição do traço. ....	77
Tabela 19 - Composição granulométrica do agregado miúdo.....	78
Tabela 20 - Composição granulométrica do agregado graúdo: brita 0 (zero). ....	79
Tabela 21 - Consistência do concreto em função do tipo de elemento. ....	85
Tabela 22 - Resultados obtidos do ensaio de resistência a tração do tecido de fibra de carbono das amostras f1, f2 e f3.....	91
Tabela 23 - Comparação dos limites de resistência dos testes e do fabricante.....	92
Tabela 24 - Resultados dos testes de compressão simples.....	92
Tabela 25 - Resultados obtidos do ensaio das vigas PL 7, PL 8 e PL 9. ....	93
Tabela 26 - Resultados obtidos do ensaio das vigas PL 4, PL 5 e PL 6. ....	94
Tabela 27 - Resultados obtidos do ensaio das vigas PL 1 PL 2 e PL 3.....	96
Tabela 28 - Comparativo dos resultados médios do ensaio de flexão das amostras.....	98
Tabela 29 - Quantidade de materiais para regularização das superfícies. ....	105
Tabela 30 - O custo de material da argamassa polimérica para regularização das superfícies. .	105

Tabela 31 - Consumo de tecido na recuperação da estrutura. ....	106
Tabela 32 - Quantidade de materiais para execução do reforço com tecido de fibra de carbono. .....	106
Tabela 33 - Materiais necessários para o reforço em questão e respectivos preços. ....	106
Tabela 34 - Materiais necessários para o reforço em questão e respectivos preços. ....	107
Tabela 35 - Custo de mão de obra de reforço com adição de tecido de fibra.....	107
Tabela 36 - Equipamentos necessários para o reforço com adição de tecido de fibra de carbono e respectivos custos de aluguel. ....	108
Tabela 37 - Custo total e suas composições para o reforço com adição de fibra de carbono. ...	108
Tabela 38 - Relação das quantidades de materiais utilizados no projeto com grau te.....	110
Tabela 39 - Relação dos custos com materiais para o projeto de reforço com graute. ....	111
Tabela 40 - Mão de obra do reforço com adição de armadura e respectivos custos.....	111
Tabela 41 - Equipamentos alugados, utilizados na preparação e execução do reforço. ....	112
Tabela 42 - Custo total e suas composições para o reforço com adição de armadura. ....	112
Tabela 43 -Custo total e suas composições para o reforço com adição de armadura. ....	113
Tabela 44 - Principais diferenças entre a tecnica de reforço com fibra de carbono frente ao método tradicional com graute. ....	117

## Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>America Concrete Institute</i>
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	<i>American Society of Testing Materials</i>
CFC	Compósito De Fibras De Carbono
EMPA	<i>Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research</i>
IBAPE-MG	Instituto Brasileiro de Avaliação e Perícias de Engenharia de Minas Gerais
IBAPE-SP	Instituto Brasileiro de Avaliação e Perícias de Engenharia de São Paulo
NBR	Norma Brasileira
PRFC	Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono
Tg	Transição vítrea

## Lista de Símbolos

%	Porcentagem
° C	Graus Celsius
CaO	Óxido de Cálcio
DGEBA	diglicidil éter de bisfenol
F <sub>cj</sub>	Resistência média do concreto à compressão
F <sub>ck</sub>	Resistência característica do concreto à compressão
g/ cm <sup>3</sup>	Grama por centímetro cúbico unidade padrão de densidade
GPa	Giga pascal
Kg	Quilograma unidade de grandeza de massa
kgf	Quilograma - Força
m	Metro unidade de medida de comprimento
m <sup>2</sup>	Metro quadrado é a unidade padrão de área
m <sup>3</sup>	Metro cúbico é a unidade padrão de volume
MC	Carbon Fiber
MgO	Óxido de Magnésio
mm	milímetro unidade de medida de comprimento
mm/m	Milímetro por metro
MPa	Unidade padrão de pressão e tensão Mega Pascal
N	Newton
n <sup>o</sup>	Abreviatura de número
PAN	poliacrilonitrila
pH	Potencial do hidrogeniônico
Psi	Libra-força por polegada quadrada Unidade de medida de pressão.
rayon	polímero celulósico
Sd	Desvio padrão de dosagem, em MPa
Tg	Transição vítrea

## Sumário

<b>1. Introdução.....</b>	<b>5</b>
1.1 Problema de Pesquisa .....	6
1.2 Objetivos da Pesquisa .....	7
1.3 Estrutura do Trabalho .....	7
<b>2. Concreto Armado.....</b>	<b>9</b>
2.1 Aspectos Históricos .....	9
2.2 Estrutura e Durabilidade do Concreto Armado .....	12
<b>3. Patologias do Concreto Armado .....</b>	<b>17</b>
3.1 Principais Origens das Patologias no Concreto Armado .....	18
3.2 Deterioração Física e Mecânica das Estruturas .....	23
3.3 Fissuração das Estruturas de Concreto Armado .....	27
3.3.1 Fissuras devido à Variação de Temperatura .....	31
3.3.2 Fissuras de Cisalhamento .....	31
3.3.3 Fissuras devido à Retração Hidráulica .....	32
3.3.4 Fissuras devido à Flexão .....	32
3.3.5 Fissuras devido à Esforços de Compressão.....	33
3.3.6 Fissuras devido à Esforços de Torção.....	35
3.4 Deterioração Química das Estruturas.....	36
3.5 Corrosão.....	40
<b>4. Recuperação de Estruturas com Compósitos de Fibra de Carbono .....</b>	<b>47</b>
4.1 Compósitos .....	47
4.1.1 Compósito Epóxi Reforçado com Fibra de Carbono .....	48
4.2 Reforços Estruturais.....	53
4.3 Recomendações para Aplicação de Compósitos de Fibra de Carbono.....	63
4.3.1 Recuperação e Preparo da Superfície.....	64
4.3.2 Processo de Aplicação da Fibra de Carbono no Concreto .....	66
<b>5. Programa Experimental e Metodologia .....</b>	<b>72</b>
5.1 Materiais e Dosagem do Concreto.....	75
5.1.1 Dosagem do Concreto e Constituição do Traço.....	75
5.1.2 Agregados.....	77
5.1.3 Armadura de Aço .....	79

5.1.4	Tecido de Fibra de Carbono .....	80
5.1.5	Resina Epoxídica.....	80
5.2	Confecção dos Corpos-de-Prova.....	81
5.3	Aplicação do Reforço com Tecido de Carbono .....	86
5.4	Ensaio Mecânicos.....	87
5.4.1	Tração da Fibra de Carbono .....	87
5.4.2	Resistencia à Compressão .....	88
5.4.3	Ensaio de Flexão .....	89
<b>6.</b>	<b>Resultados e Discussões .....</b>	<b>91</b>
6.1	Análise dos Resultados de Tração da Fibra .....	91
6.2	Análise dos Resultados de Resistência à Compressão.....	91
6.3	Análise dos Resultados do Ensaio de Flexão.....	93
6.3.1	Grupo C - Vigas sem Reforço de Fibra e sem Armadura de Tela de Aço .....	93
6.3.2	Grupo B - Vigas com Armadura de Tela de Aço.....	94
6.3.3	Grupo A - Vigas com Reforço de Fibra de Carbono.....	96
6.4	Análise Comparativa dos Resultados dos Grupos A, B e C .....	97
<b>7.</b>	<b>Aplicação Técnica do Composto Reforçado com Fibra de Carbono na Recuperação de Estruturas de Concreto Armado.....</b>	<b>100</b>
7.1	Descrição do Empreendimento de Estudo .....	100
7.1.1	Análise Estrutural e Identificação das Anomalias.....	101
7.2	Projeto de Reforço Estrutural.....	102
7.3	Simulação de Projetos de Recuperação e Reforço Estrutural.....	103
7.4	Custos do Projeto de Reforço com Compósito de Fibra de Carbono .....	104
7.4.1	Relação dos Custos Relativos aos Materiais para Regularização da Superfície ..	104
7.4.2	Relação dos Custos Relativos aos Materiais – Fibras e Resinas Empregadas .....	105
7.4.3	Relação dos Custos Relativos à Mão de Obra para Regularização da Superfície	107
7.4.4	Relação dos Custos Relativos à Mão de Obra para Instalação do Reforço.....	107
7.4.5	Relação dos Custos Relativos aos Equipamentos Utilizados.....	108
7.4.6	Relação do Custo Total do Projeto de Reforço com Fibra de Carbono .....	108
7.5	Custos do Projeto de Reforço com Adição de Armadura, Fôrma de Madeira e Graute	109
7.5.1	Relação do Custo dos Materiais Empregados .....	110
7.5.2	Relação dos Custos da Mão de Obra Utilizada.....	111
7.5.3	Relação dos Custos dos Equipamentos Empregados .....	111
7.5.4	Relação do Custo Total Projeto de Reforço com Adição de Armadura, Fôrma de Madeira e Graute.....	112

7.6	Comparação dos Custos Totais do Reforço com Fibra de Carbono e do Reforço com Graute	113
7.7	Vantagens e Desvantagens do Uso do Sistema de Fibra de Carbono versus Sistema Convencional .....	114
<b>8.</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>118</b>
<b>9.</b>	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>120</b>
	<b>Anexos.....</b>	<b>126</b>

## 1. Introdução

Coelho (2008) descreve que apesar do concreto estar presente na sociedade há um século, seu destaque se deu há aproximadamente 60 anos atrás quando deixou de simplesmente substituir a alvenaria e passou a ser aplicado na área de projetos estruturais de grande porte.

De acordo com Cardoso (2013), o concreto é o principal material estrutural utilizado no mundo, sendo constituído de uma mistura de Cimento Portland, água, agregado miúdo, agregado graúdo e aditivos/adições. Segundo Carvalho e Figueiredo (2014), na tração o concreto simples resiste apenas cerca de 10% de sua resistência à compressão. Dado a sua fragilidade quanto a esforços de tração, o mesmo quando combinado com aço, dá origem ao concreto armado, um composto que equilibra as características do concreto e a do aço, resultando em um material com propriedades superiores, adequadas aos esforços solicitados nas construções. Assim, o concreto armado é definido pela união do concreto simples e um material resistente à tração (aço) de tal modo que ambos resistam e trabalhem em conjunto resistindo aos esforços de compressão e tração.

As estruturas de concreto armado devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conserve sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil (ABNT NBR 6118:2003).

Entretanto, o concreto está sujeito a degradação ao longo dos anos. Inúmeras patologias podem ocasionar problemas e danos as estruturas de concreto. Segundo o dicionário *on-line* Priberam<sup>1</sup> a patologia pode ser entendida como um “desvio em relação ao que é considerado normal”, representando assim todos os problemas (doenças) que podem surgir em uma estrutura construtiva, passíveis de prejudicar seu desempenho, qualidade e durabilidade. Nesse sentido, estudar as patologias das estruturas é compreender os fatores que levam a sua origem, os seus mecanismos de surgimento e a forma de neutralizar tais efeitos deletérios.

Segundo Helene (2003) apud Zuchetti (2015), os problemas patológicos poderão surgir em qualquer uma das etapas construtivas e são oriundos de erros ou falhas cometidas durante alguma etapa da obra. Normalmente, têm maior incidência nas etapas de uso e execução. Em todo caso, é de suma importância conhecer a origem da manifestação, principalmente para fins judiciais, para que se possa identificar quem cometeu a falha.

---

<sup>1</sup> Dicionário Priberam on-line. **Patologia**. Disponível em: ([Consulte o significado / definição de patologia no Dicionário Priberam da Língua Portuguesa, o dicionário online de português contemporâneo.](#)), acesso: 14.12.2020

As edificações estão envelhecendo, principalmente as edificadas nas décadas de 50 e 60. Com o desgaste natural, o surgimento de patologias é inevitável, e as suas origens estão vinculadas a diversos fatores. Após análise dentre as mais diversas patologias, a corrosão e deterioração dos aços são umas das principais manifestações patológicas nas estruturas de concreto armado, proporcionando grandes danos e prejuízos.

Segundo levantamento realizado por Paulo Helene, presente na obra de Romero (2019) os principais tipos de manifestações patológicas decorrentes no Brasil são as manchas superficiais com 22%, as fissuras com 21%, a corrosão de armaduras com 20% e os nichos de concretagem com 20%. Neste caso a grande maioria das patologias afeta as estruturas de concreto armado, prejudicando sua durabilidade.

## **1.1 Problema de Pesquisa**

Atualmente há uma grande demanda e necessidade quanto ao reforço de estruturas patologicamente comprometidas, com a finalidade de se devolver a estrutura a sua condição de segurança, reabilitando para sua capacidade portante na qual foi projetada. Diversas são as técnicas que hoje podem ser utilizadas, cada qual empregando diferentes materiais e tecnologias, dentre as quais se destaca neste trabalho o emprego de composto de resina epóxi com fibra de carbono.

Os polímeros reforçados com fibras (PRF) tornaram-se uma alternativa eficiente de reforço estrutural, sendo que a fibra mais apropriada é a fibra de carbono, por apresentar maior resistência e rigidez em relação às demais fibras. Além disso, possui elevada resistência a tração, elevado módulo de elasticidade, facilidade de sua aplicação, redução de carga em relação a métodos convencionais como: colagem de chapas metálicas ou método de aumento de suas seções em concreto armado.

As fibras de carbono, dentre as possibilidades de aplicação existentes, podem ser utilizadas para elevar a resistência da estrutura, principalmente à flexão e ao esforço transversal de vigas e lajes, requerendo, porém, um grande cuidado quanto aos detalhes da sua aplicação e amarração na estrutura de concreto (RIPPER e SOUZA, 1998).

Frente à importância que esta tecnologia vem ganhando na área da construção civil, o presente trabalho está voltado às seguintes questões:

- O impacto da utilização de um composto de resina epóxi e fibra de carbono no reforço de vigas de concreto sobre suas propriedades, quando da realização de testes de flexão mecânica, frente a uma estrutura de concreto armado.
- As vantagens e/ou benefícios econômicos e não econômicos provenientes da utilização de compósitos de epóxi com fibra de carbono na recuperação e reforço de estruturas de concreto armado patologicamente danificadas, quando comparada a uma técnica tradicional que utiliza armadura de aço e graute.

## 1.2 Objetivos da Pesquisa

O objetivo geral deste trabalho é analisar a influência do tecido de fibra de carbono e resina epóxi e seu impacto no reforço de vigas de concreto. Para isso foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Discutir sobre a importância do concreto armado para o setor de construção civil
- Realizar uma campanha experimental para analisar as diferenças entre a utilização dos compósitos reforçados com fibra de carbono frente a metodologias convencionais;
- Analisar a viabilidade econômica da utilização de compósitos reforçados com fibra de carbono na recuperação de estruturas de concreto armado através a aplicação prática em uma obra, frente à utilização de uma técnica de recuperação com estrutura de aço, madeira e graute.

## 1.3 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

- **Capítulo 1:** são apresentados os conceitos iniciais do estudo, assim como a justificativa e os objetivos desejados.
- **Capítulo 2:** apresenta os principais conceitos sobre o concreto armado, dentre os quais seu aspecto histórico e a durabilidade.
- **Capítulo 3:** apresenta uma discussão a respeito da degradação das estruturas do concreto armado, discorrendo sobre as diferentes patologias.

- **Capítulo 4:** realiza-se um estudo sobre o processo de recuperação de estruturas de concreto armado, principalmente sobre os compósitos obtidos com resinas epóxi e fibra de carbono, assim como sua aplicação como reforço em estruturas de concreto armado patologicamente deterioradas.
- **Capítulo 5:** é apresentada a metodologia experimental realizada no trabalho em questão, contendo a campanha experimental, os respectivos materiais utilizados, e o processo de confecção e aplicação do reforço nas amostras.
- **Capítulo 6:** são apresentados e discutidos os resultados experimentais.
- **Capítulo 7:** é realizada uma aplicação da técnica e uma comparação entre a utilização de compósitos com fibra de carbono frente à utilização da técnica com armadura de aço, madeira e graute no reforço de estruturas de concreto armado.
- **Capítulo 8:** estão contidas as considerações finais do trabalho, assim como sugestões para trabalhos futuros.
- **Capítulo 9:** estão o referencial bibliográfico utilizado e citado nesse trabalho.

## 2. Concreto Armado

### 2.1 Aspectos Históricos

As pontes atuais são reflexos do período romano. Jesus (2013) descreve que as pontes em arco de pedra se estabeleceram no império romano e atingiam até 30 metros, destacando que algumas dessas construções estão conservadas até hoje. Caracterizada especificamente por construção em arco, semicirculares e firmes em pilares, marcam tanto o estilo do período romano quanto renascentista.

Verschleiser (2008), destaca que essas pontes eram estruturadas em madeira para travessias de rios, e eram reforçadas por até cinco pilares de pedra com concreto como a brita e a argamassa em seu interior com o objetivo de suportar os impactos para seu uso. Suas enscadeiras eram feitas de toras de carvalho, e amarradas entre si por correntes, e seus espaços eram preenchidos com barro. A mais antiga ponte de pedra é a ponte *Aemilius*, que foi criada com base no sistema de vias imperiais. Costa (2009) ressalta que entre os principais motivos do desaparecimento de pontes românicas se justifica em grande parte aos fatores ambientais, uma vez que com o passar do tempo e diante dos fenômenos de assoreamento e inundações, bem como as ações causadas pelas guerras entre os povos.

No início da idade média, período medieval foi marcado pela decadência do império romano, bem como o desuso à rede de estradas. Deu-se início a um período de estagnação na construção de pontes. Por um determinado período a capacidade dos profissionais da construção civil foi se atrofiando, pelo fato da escassez de encomendas, em contrapartida a construção de edifícios religiosos se acentuou.

Jesus (2013) acrescenta que nos estudos sobre as pontes medievais pode ser compreendida como o período que os construtores monges tornaram-se grandes mestres e buscaram manter as construções romanas; as pontes, os aquedutos e as estradas entre outras obras magníficas consolidadas nessa época.

Pode-se verificar que o conhecimento na construção de pontes era detido exclusivamente pela Igreja. Nesse contexto algumas pontes mais arrojadas que não foram atribuídas à igreja eram denominadas como pontes do diabo. A sua geometria era caracterizada pela irregularidade em termos de perfil longitudinal, arcos com diferentes vãos e flechas, tabuleiro não horizontal, arcos quebrados e eventual assimetria. Santos; Morais e Varum (2009)

destacam que as pontes construídas nesse período possuíam, em geral, características robustas, com perfil mais pitoresco que as pontes romanas.

Caracterizado pelo nascimento da ciência moderna, a Idade Moderna (Renascimento) foi o período renascentista que perdurou do século XVI até o XVIII depois de Cristo. Jesus (2013) cita que o renascimento foi marcado por diversos famosos artistas, engenheiros, músicos, arquitetos, cientistas e definido como a era da investigação e curiosidade, cujo conhecimento era ilimitado e sem fronteiras. Entre os destaques dessa época estavam Leonardo da Vinci, Galileu, Isaac Newton e Michelangelo.

É um período marcado também pela introdução de novas formas geométricas na construção de estruturas arquitetônica. Entre as quais a *Pont Royal* que é apontada como uma das mais famosas pontes que foi construída nesta época em substituição a de madeira, que se localizava em Paris, a obra foi concluída em 1689. Entretanto, o Renascimento também se manifestou como um momento de conflito e reformulação de conhecimentos passados. Lima (2012) discorre que mesmo sendo um período de inovação, era notável o uso de modos e técnicas usadas naquele tempo dominado pela Igreja Católica.

Finalmente com a chegada da Revolução Industrial, a construção de pontes passou a utilizar as estruturas metálicas, que denotava economia no custo da obra, no entanto, sua expansão teve baixa escala, e as construções mais adotadas eram em alvenaria. A construção da primeira ponte em ferro fundido foi a de *Coalbrookdale*.

Braga (2009) ressalta que o avanço da Revolução Industrial acarretou mudanças nas técnicas metalúrgicas. O crescimento na fabricação de materiais e seu fomento nesse período, determinaram que o ferro e o aço passassem a ser fundamentais na construção, por se caracterizar como estruturas mais leves, resistentes e promover menor tempo para execução das obras.

Considera-se que o “cimento armado” surgiu na França, no ano de 1849, sendo um barco o primeiro objeto do material registrado pela História, do francês Joseph-Louis Lambot, apresentado oficialmente em 1855. O barco foi construído com telas de fios finos de ferro, preenchidas com argamassa de cimento.

Em 1850 o francês Joseph Mounier, um paisagista, fabricou tubos reforçados com ferro, vasos de flores com argamassa de cimento e armadura de arame, e depois reservatórios, escadas e uma ponte com vão de 16,5 m. Foi o início do que hoje se conhece como “Concreto Armado”.

Em 1850, o norte americano Thaddeus Hyatt fez uma série de ensaios de vigas e vislumbrou a verdadeira função das armaduras no trabalho conjunto com o concreto, mas seus estudos ganharam repercussão somente após a publicação em 1877.

De acordo com Bastos (2019):

O concreto, como as pedras naturais, apresenta alta resistência à compressão, o que faz dele um excelente material para ser empregado em elementos estruturais primariamente submetidos à compressão, como por exemplo, os pilares, mas, por outro lado, suas características de fragilidade e baixa resistência à tração restringem seu uso isolado em elementos submetidos totalmente ou parcialmente à tração, como tirantes, vigas, lajes e outros elementos fletidos. [...] Para contornar essas limitações, o aço é empregado em conjunto com o concreto, e convenientemente posicionado na peça de modo a resistir às tensões de tração.

Como expressado por Costa (2010) em sua obra, o surgimento do concreto armado permitiu a sociedade revolucionar suas técnicas construtivas, possibilitando integrar a arte à arquitetura em um contexto mais amplo e sinérgico. Surge então à chama era do “concreto armado” em aproximadamente 1930, sobrepujando a técnica da estrutura metálica em destaque no período, tornando-se assim o principal material a ser empregado na construção da nova sociedade (FREITAS, 2019).

Em sua obra Freitas (2019) faz um estudo importante sobre o processo evolutivo do concreto armado na sociedade, com destaque para a sociedade brasileira, sendo o principal material empregado nas construções domésticas e empresariais.

Segundo Freitas (2019, p.4):

Estruturas essas entendidas não mais como um “empilhamento” e/ou a sobreposição de paredes maciças, que tornam a forma do edifício mais robusto pela sobrecarga dada pela própria estrutura da edificação, a qual nesse sistema se confunde com a vedação. Já o concreto armado, sistema construtivo que consegue ir além das possibilidades estruturais já introduzidas pelas estruturas metálicas, possibilitou aos arquitetos do começo do século XX criar espacialidades novas. August Perret, Walter Gropius e Le Corbusier, exercitaram o projeto em formas nunca possíveis, e tudo isso devido à criação da estrutura independente.

Desta forma as estruturas de concreto armado conferem uma nova dinâmica construtiva, aliando as qualidades do concreto como baixo custo, durabilidade, resistências à compressão, ao fogo e a água, com as qualidades do aço como ductilidade, resistência à tração e a compressão, permitindo confeccionar elementos de formas e dimensões diversificadas, com maior agilidade e facilidade (BASTOS, 2019).

## 2.2 Estrutura e Durabilidade do Concreto Armado

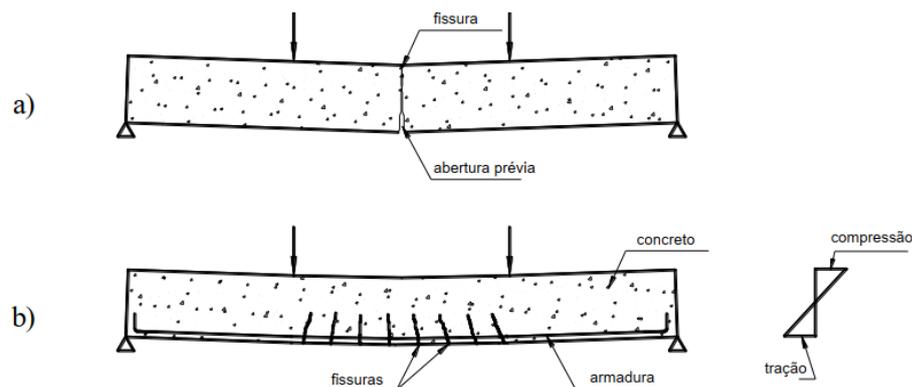
Atualmente o concreto armado se faz presente em qualquer tipo de obra, quer seja uma simples residência ou um complexo industrial, sendo responsável pela estrutura autoportante da construção (COELHO, 2008).

Ao analisar as estruturas de concreto armado, torna-se importante levantar algumas definições apresentadas pela Norma NBR 6118 (itens 3.1.2, 3.1.3 e 3.1.5), sendo:

- Elementos de concreto simples estrutural: elementos estruturais elaborados com concreto que não possui qualquer tipo de armadura ou que a possui em quantidade inferior ao mínimo exigido para o concreto armado;
- Elementos de concreto armado: aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura, e nos quais não se aplicam alongamentos iniciais das armaduras antes da materialização dessa aderência;
- Armadura passiva: qualquer armadura que não seja usada para produzir forças de protensão, isto é, que não seja previamente alongada.

A armadura no concreto armado é conhecida por passiva, de modo que as tensões e deformações existentes nela deverão decorrer exclusivamente das ações exercidas sobre a peça. Através da Figura 1 é possível visualizar a diferença entre o trabalho de uma estrutura de concreto sem armadura (Figura 1a), para uma estrutura de concreto com armadura de flexão (Figura 1b) supondo que as forças aplicadas tenham um aumento gradativo até a ruptura da viga (BASTOS, 2019).

**Figura 1** - Viga de concreto: a) sem armadura; b) com armadura.

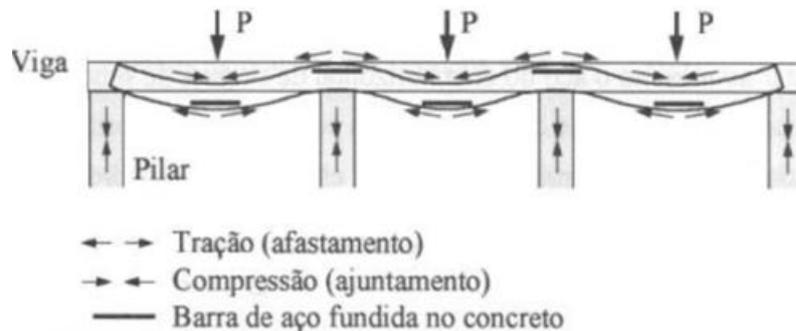


**Fonte:** adaptado de Pfeil (1989) apud Bastos (2019).

De acordo com Bastos (2019) conforme as forças atuantes sobre as vigas aumentam de forma gradativa, até atingir o ponto de ruptura, a viga que não apresenta a armadura irá se romper bruscamente logo após surgir a primeira fissura, momento no qual a tensão de tração atinge a resistência de tração e flexão do concreto. Porém, no caso do concreto armado a sua resistência à flexão sofre um aumento significativo, proveniente da armadura.

A associação do concreto com o aço, um material de boa resistência à tração, permite que o conjunto concreto armado, resista tanto aos esforços de compressão como os de tração. Como mostrado na Figura 2, há uma zona solicitada somente pela tração. Há também uma zona que nela age apenas a compressão.

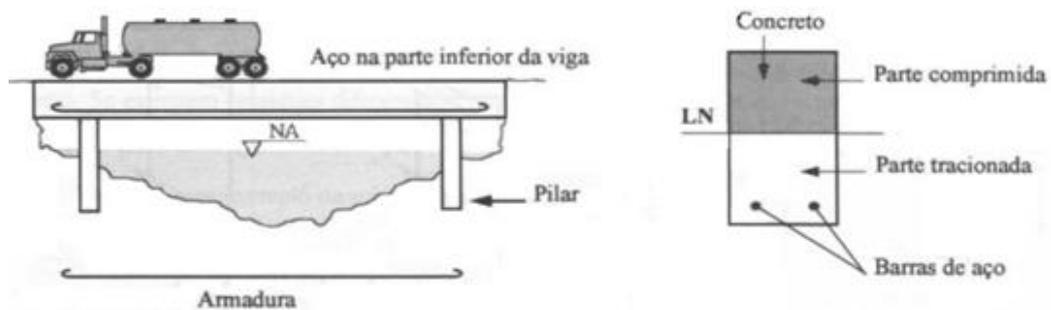
**Figura 2** - Zonas de tração e compressão.



**Fonte:** Botelho(1996).

Para solucionar a baixa resistência à tração foram colocadas barra de aço na área da seção que é tracionada e o concreto fica como responsável por suportar a solicitação da compressão, como mostrado na Figura 3.

**Figura 3** - Zonas de tração, compressão e linha neutra da estrutura.



**Fonte:** Botelho(1996).

A presença da armadura no concreto irá elevar sua resistência ao surgimento de fissuras (Figura 4) que possam comprometer sua integridade física, e assim seu funcionamento. Segundo Bastos (2019), uma fissura consiste em uma pequena abertura no concreto, sendo esta proveniente da baixa resistência a tração do concreto, devendo, portanto, ser controlada até um limite máximo de 0,3 mm de modo a assegurar as condições de funcionalidade, estética, durabilidade e impermeabilização.

**Figura 4** - Fissuras em uma viga após ensaio experimental em laboratório.



Fonte: Adaptado de Ferrari (2007).

Assim caberá ao engenheiro projetista garantir que as fissuras não ultrapassem os limites estabelecidos pela NBR 6118, através da disposição e distribuição de barras de aço de forma eficiente, possibilitando assim somente o aparecimento de fissuras capilares, não passíveis de acarretar a corrosão do aço. (LEONHARDT e MONNIG, 1982 apud BASTOS, 2019)

No que tange a durabilidade da peça de concreto estrutural, Cardoso (2013) descreve que ela está intimamente relacionada à qualidade da estrutura, estando os parâmetros de durabilidade correlacionados as características do concreto, do cobrimento de proteção da armadura e da relação água-cimento, de modo a influir sobre a deterioração precoce da estrutura.

A questão relacionada ao fator de agressividade ambiental deverá ser analisada e considerada quando do dimensionamento da estrutura, haja vista a grande interferência proveniente da corrosão das armaduras e conseqüente redução na vida útil da peça. A classe de agressividade pode ser obtida na norma NBR 6118 de 2014 conforme apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1** - Classe de agressividade ambiental.

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação Geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <sup>a,b</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>a</sup>	Grande
		Industrial <sup>a,b</sup>	
IV	Muito Forte	Industrial <sup>a,c</sup>	Elevado
		Respingos de Maré	

<sup>a</sup> Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe 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).

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

<sup>c</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas

Fonte: adaptado de ABNT - NBR 6118 de 2014

Segundo o grau de agressividade ambiental, a norma NBR 6118 determina que a durabilidade: “consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto”, que se encontra relacionada à relação água/cimento utilizada no concreto, pois se elevando a quantidade de água empregada, aumenta-se a porosidade da estrutura, possibilitando que a estrutura seja mais facilmente atacada por agentes nocivos como cloretos e gás carbônico (Tabela 2).

**Tabela 2** - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.

Concreto	Tipo <sup>b c</sup>	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação	CA	< 0,65	<0,60	<0,55	<0,45
Água/cimento em massa	CP	<0,60	<0,55	<0,50	<0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	<C20	>C25	>C30	>C40
	CP	>C25	>C30	>C35	>C40

<sup>a</sup> O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT 12655

<sup>b</sup> CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado

<sup>c</sup> CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto pretendido

Fonte: adaptado de ABNT - NBR 6118 de 2014.

Por fim, pode-se falar de outro importante fator determinante da durabilidade do concreto armado, conhecido por cobrimento nominal que segundo Cardoso (2013) representa à espessura da camada de concreto utilizada na proteção à estrutura de aço frente às ações externas, dentre as quais a corrosão, estando tal fator também relacionado à classe de agressividade ambiental, conforme descrito na Tabela 3.

**Tabela 3** – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para  $\delta c = 10$  mm.

Tipo de Estrutura	Componente ou Elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		<b>Cobrimento Nominal (mm)</b>			
Concreto Armado	Laje	20	25	35	45
	Viga / Pilar	25	30	40	50
Concreto Protendido	Todos	30	35	45	55

**Fonte:** adaptado de ABNT - NBR 6118 de 2014.

Segundo Cardoso (2013, p. 10):

De acordo com a NBR 6118:2007, as dimensões devem respeitar o cobrimento nominal  $C_{nom}$ , que consiste no cobrimento mínimo  $C_{min}$  acrescido de uma tolerância de execução  $\bullet c$ , como garantia da execução com o cobrimento mínimo na obra. Se existir um controle rígido de qualidade pode ser adotada uma tolerância de 5 mm, devendo ser indicado no projeto. Nas obras correntes recomenda-se o uso de  $\bullet c = 10$  mm ou maior. Para face superior de lajes e vigas que serão revestidas com contrapiso e pisos cerâmicos deve ser adotado um cobrimento nominal maior ou igual a 1,5 cm.

Assim a estrutura de concreto armado deverá atender a requisitos de segurança e qualidade no decorrer de sua construção e utilização, sendo capaz de suportar as ações e os esforços a que será submetida sem que ocorram rupturas, ruína, ou deformações excessivas que possam prejudicar a integridade da estrutura, e assim seu funcionamento (CARDOSO, 2013).

### 3. Patologias do Concreto Armado

Pelo fato do concreto armado ser considerado um material não inerte, este se encontra sujeito a sofrer degradações em sua estrutura com o tempo, proveniente das interações decorridas entre seus elementos construtivos (água, cimento, agregados etc.) e seus elementos externos (ácidos, bases, gases etc.) (PIANCASTELLI, 1997 apud BRONZE, 2016).

Com o avanço tecnológico, passa-se a estudar os fenômenos que levam a degradação dessas estruturas construtivas e uma nova área relacionada ao estudo dos quadros patológicos das edificações torna-se fundamental. Segundo Souza e Ripper (1998, p.14):

[...] se ocupa do estudo das origens, formas de manifestação, consequências e mecanismos de ocorrência das falhas e dos sistemas de degradação das estruturas, consistindo em uma área complexa devido à grande gama de interações que levam a ocorrência dos fenômenos patológicos, requerendo um estudo sistematizado destes fenômenos.

Assim pode-se descrever a patologia como uma área da engenharia que realiza estudos dos sintomas, mecanismos, causas e origens dos defeitos em construções, assim como identificar possíveis mecanismos de correção para a solução destes problemas, inclusos os provenientes do envelhecimento natural da obra (DEGUSSA, 2008 apud BRONZE, 2016). Ainda segundo Verçoza (1991 apud Fortes, 2000, p.9):

[...] as características das construções atuais favorecem o aparecimento de patologias. Devido ao maior conhecimento sobre o comportamento dos materiais existente nas construções, ao desenvolvimento de técnicas construtivas e aos fatores econômicos, os técnicos estão utilizando elementos cada vez mais esbeltos, aproveitando ao máximo as propriedades mecânicas dos materiais, em compensação, uma pequena falha em uma das etapas da construção pode gerar um problema patológico.

### 3.1 Principais Origens das Patologias no Concreto Armado

Na concepção de Couto e Couto (2007) a má qualidade dos materiais está entre as principais causas das patologias nas edificações, estando incluso neste grupo também as falhas na concepção dos projetos, os erros de execução, a má utilização das construções e a falta de manutenção, podendo também destacar falhas provenientes de agentes externos como: umidade, vento, variação de temperatura, instabilidade do solo, ou até mesmo movimentações abruptas do solo.

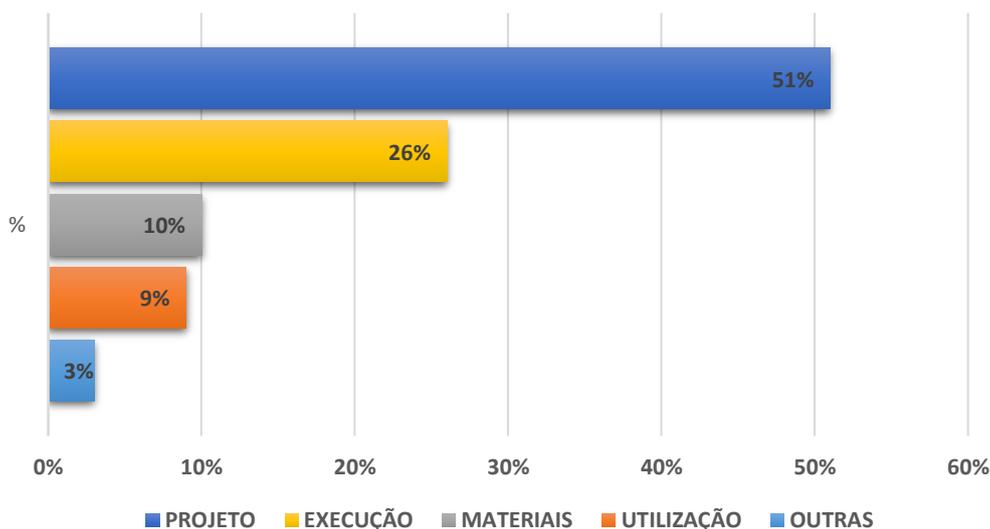
Em sua obra Bronze (2016) destaca que as patologias mais comuns nas construções são provenientes de:

- falhas na concepção do projeto;
- erros da execução;
- má qualidade dos materiais;
- utilização para fins diferentes dos calculados em projeto, gerando sobrecarga;
- falta de manutenção no decorrer do tempo.

Para Fortes (2000) é importante conhecer os fatores que levam ao surgimento das patologias, pois assim torna-se possível identificar os agentes agressores e seu mecanismo de geração, porém tal tarefa muitas vezes é complexa devido a diversos fatores como:

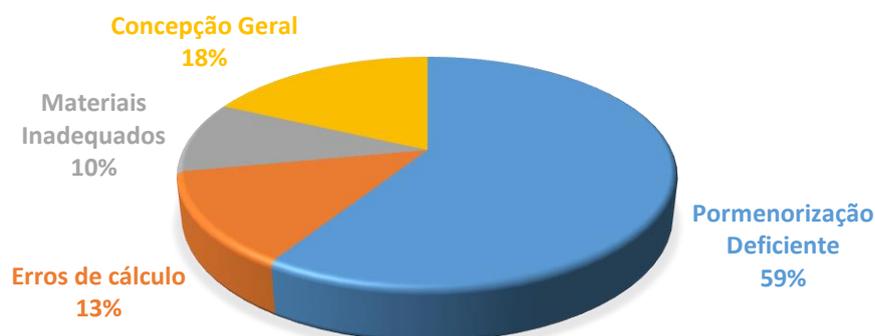
- a possibilidade de haver diversos fatores agindo ao mesmo tempo;
- os documentos da obra não são encontrados (projetos, especificações, sondagens, diário de obra etc.);
- dificilmente encontram-se registros de fenômenos da natureza, referentes à localidade da construção;
- os profissionais que trabalharam na construção e que poderiam esclarecer fatos referentes à obra, geralmente, não é encontrado;
- os usuários omitem informações importantes referentes à utilização.

De acordo com levantamento de Hammarlund *et al.* (1991), citado na obra de Couto e Couto (2007), identifica-se que 51% das anomalias incidentes em uma edificação são provenientes da execução do projeto da obra, sendo 26% resultantes da execução e 10% provenientes dos materiais utilizados, conforme gráfico da Figura 5

**Figura 5 - Causas de anomalias em edifícios.**

**Fonte:** adaptado de Hammarlund *et al.* (1991) citado por Couto e Couto (2007).

Como visto, a maior parte das anomalias decorrem do planejamento e concepção do projeto, e nesta linha um levantamento realizado pelo *Bureau Securitas*, citado na obra de Couto e Couto (2007), evidenciam que 59% dos erros resultam em pormenorização deficiente, ou seja, há uma falha no detalhamento das características do projeto, deixando de abranger informações importantes (Figura 6).

**Figura 6 - Incidência dos diferentes tipos de erro de projeto no total dos erros.**

**Fonte:** adaptado de Couto e Couto (2007).

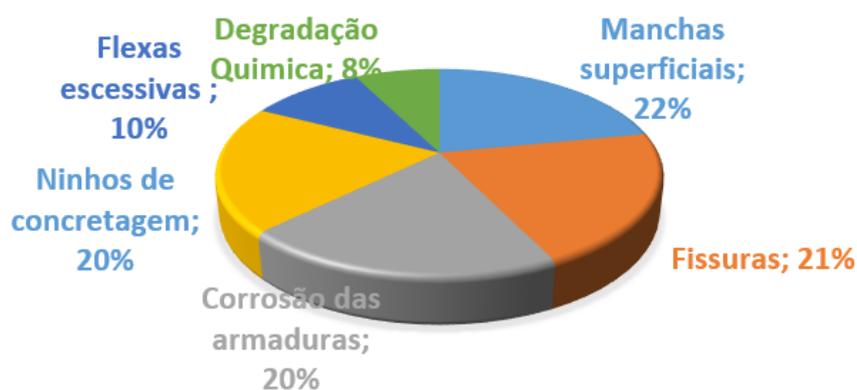
Para Do Carmo (2003) citados na obra de Zuchetti (2015), as falhas resultantes de variações dimensionais são o principal fator que leva a incidências de patologias nas edificações, com 43,70% dos casos, estando às deformações excessivas e sobrecargas em segundo lugar com 19,7% dos casos (Tabela 4).

**Tabela 4** - Percentual das principais causas de patologias na construção civil.

Tipologia	Percentual (%)
Causas Diversas	1,6%
Disposições defeituosas	2,5%
Erros de concepção	3,50%
Fenômenos químicos	4,00%
Erros nas hipóteses de cálculo e uso dos materiais	8,5%
Falhas de execução	16,5%
Deformações excessivas e sobrecargas	19,7%
Falhas resultantes de variações dimensionais	43,7%

**Fonte:** adaptado de Do Carmo (2003) apud Zuchetti (2015).

Segundo levantamento realizado por Paulo Helene, presente na obra de Romero (2019) os principais tipos de manifestações patológicas decorrentes no Brasil são as manchas superficiais com 22%, as fissuras com 21%, a corrosão de armaduras com 20% e os nichos de concretagem com 20% (Figura 7). Neste caso a grande maioria das patologias afeta as estruturas de concreto armado, prejudicando sua durabilidade.

**Figura 7-** Manifestações patológicas no Brasil, segundo Paulo Helene.

**Fonte:** adaptado de Paulo Helene por Romero (2019).

As manifestações patológicas tendem a variar segundo a região geográfica do Brasil, devido à fatores como variação climática, temperatura do ambiente, dentre outros. Através dos gráficos contidos na Figura 8 percebe-se que no caso das fissuras na região Sul prevalece à movimentação térmica como principal fator, enquanto na região nordeste predomina a corrosão da estrutura.

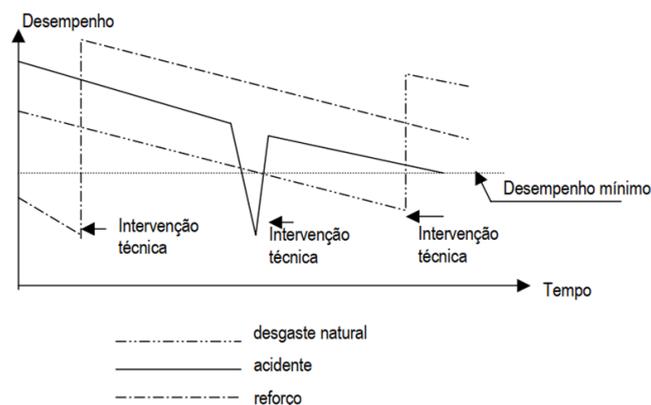
**Figura 8** - Causas de fissuras no Rio Grande do Sul (esquerda) e causas de fissura em Recife/PE.



**Fonte:** adaptados de Piancastelli (1997) e Andrade (1996) apud Romero (2019).

Para Reis (2001) o desempenho de uma construção está relacionado ao comportamento dela ao longo de sua vida útil, o qual poderá sofrer atenuação com o passar do tempo, sem que a estrutura seja condenada, bastando uma intervenção técnica para que possa ser reabilitada. Na obra de Souza e Ripper (1998) é possível acompanhar três casos de desempenho de construções (Figura 9), em relação a diferentes fenômenos patológicos.

**Figura 9** - Diferentes desempenhos de uma estrutura com o tempo em função de diferentes fenômenos patológicos.



**Fonte:** adaptado de Souza e Ripper (1998).

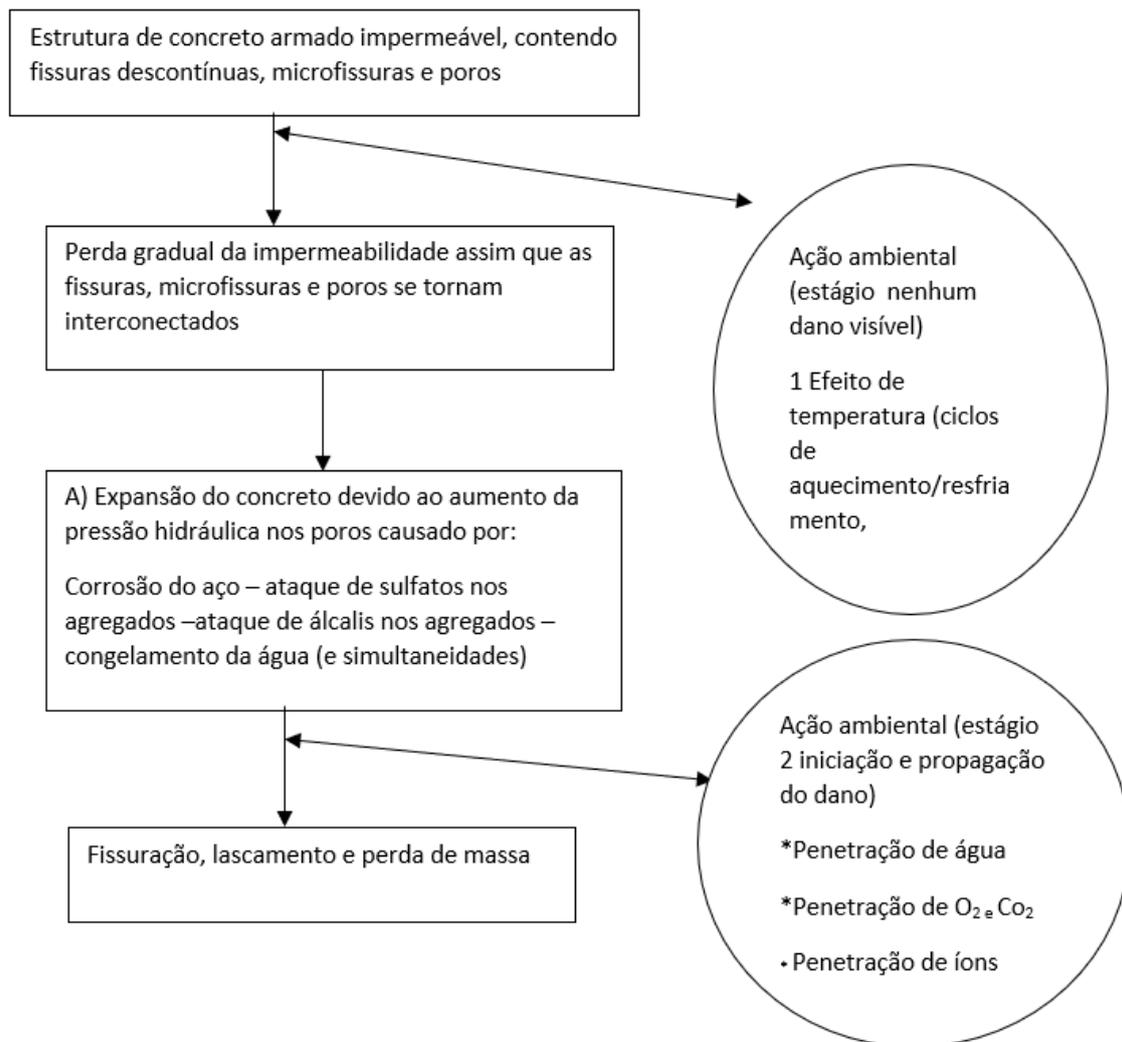
Sampaio *et al.* (2018) descrevem que o custo para recuperação de estruturas atingidas pela corrosão demanda alto custo, entretanto, podem ser evitados se forem tomadas medidas preventivas ainda nas fases de execução do projeto, que tem maior efetividade e custo inferior aos processos de recuperação, considerando que não impacta no tempo de desenvolvimento do projeto.

Bastos (2017) aponta as etapas para a realização de um controle da degradação da estrutura com eficiência que requer conhecimento dos principais sinais em uma construção degradada e suas patologias:

- fendilhamento - ocorre devido à tensão aplicada sobre o concreto por possuir maior que a tensão resistente que ele suporta. E pode surgir por cargas ou deformações exteriores, ou pela amplificação das matérias primas dentro do concreto, entre as quais, a corrosão que discorre por meio de movimentos gerados dentro do próprio concreto.
- desagregação do concreto - pode se aplicar por uma parte do concreto que deixa de exercer um contato com o restante dos elementos betonados, que também pode ser tratado como uma desconexão local ou geral. Duas causas são as mesmas vistas na fendilhação e normalmente procedem da mesma maneira
- erosão - se apresentam quando as partículas do concreto são retiradas da superfície do elemento através da ação da água ou do vento;
- infiltração - a partir de um determinado líquido, normalmente a água, que tem contato com a extensão do concreto, e pode gerar desgastes físicos ou reações químicas no interior dele;
- eflorescência - em detrimento a uma reação química no concreto, e gera cristais de sais no interior ou em sua superfície;
- deformação - em condições em que a zona da estrutura sofre um deslocamento ou uma rotação. Pertinente em locais que sofrem sobrecargas ou assentamentos não previstos de forma correta.

O processo de deterioração do concreto armado, proveniente de efeitos ambientais descrito por Mehta (1997) citado na obra de Reis (2001), considera que a deterioração envolve todos os componentes do concreto de forma conjunta (Figura 10). Destaca também a importância do grau de saturação de água na estrutura na expansão e deterioração, principalmente quando a manifestação patológica primária são ação do gelo, a corrosão de armaduras, e reações álcalis-agregados ou ataque de sulfatos.

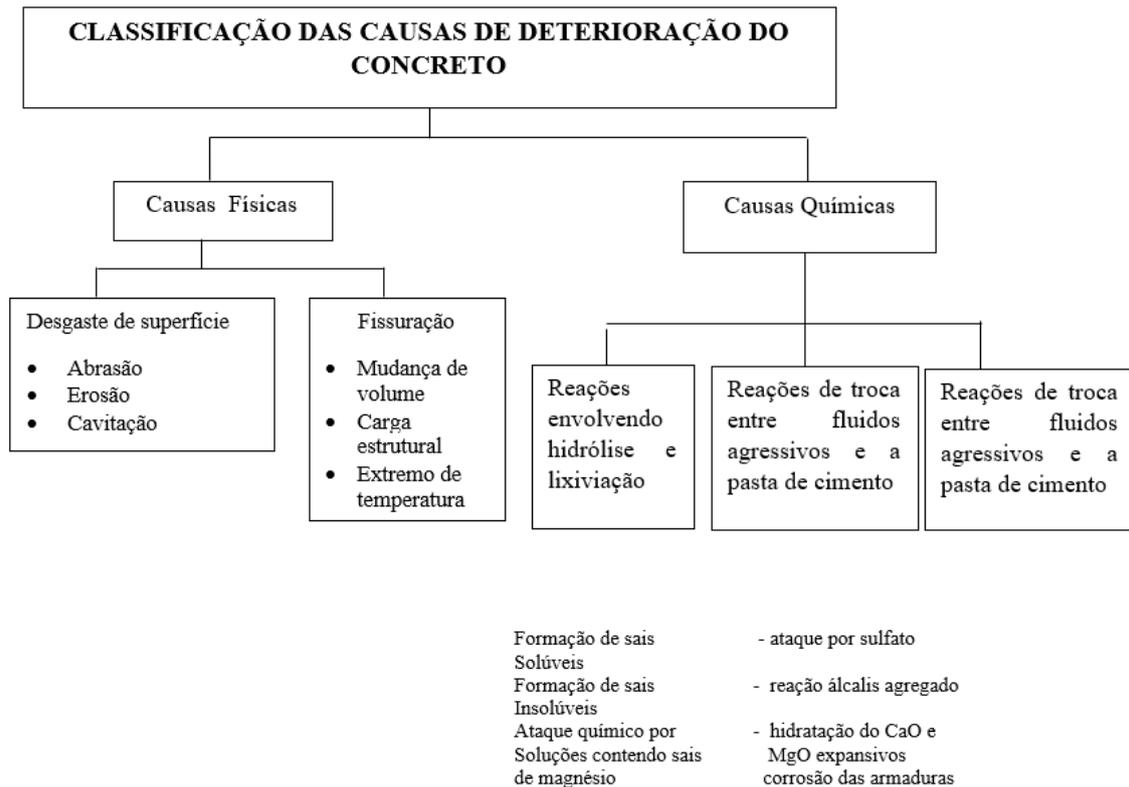
**Figura 10** - Modelo holístico da deterioração do concreto a partir dos efeitos ambientais.



**Fonte:** adaptado de MEHTA (1997) por Reis (2001).

### 3.2 Deterioração Física e Mecânica das Estruturas

Na obra de Metha e Monteiro (1994) citada por Garcia (1999), o autor relata que a deterioração ou degradação das estruturas de concreto podem ser resultantes de dois grupos de causas, as causas físicas e as causas químicas, conforme ilustra a Figura 11, destacando que tal distinção torna-se arbitrária, já que ambas se sobrepõem, ou seja, dificilmente uma ocorrerá sem que a outra também ocorra.

**Figura 11** - Classificação das causas de deterioração do concreto.

**Fonte:** adaptado de Metha e Monteiro (1994) por Garcia (1999).

Ao se analisar processo de deterioração das estruturas de concreto na perspectiva de Santos (2014) percebe-se que sua ocorrência envolve a combinação de diferentes fatores quer sejam internos ou externos, resultando no comprometimento de sua função. Estes fatores são descritos na Tabela 5, sendo agrupados em atmosféricos, biológicos, esforços, incompatibilidade e de uso.

Para Lapa (2008) apud Zuchetti (2015) a deterioração do concreto pode ser agrupada em processos mecânicos, físicos, químicos, biológicos e eletromagnéticos entre outros, ressaltando que apesar de alterarem o desempenho da estrutura, algumas vezes não são identificados visualmente, nesta linha pode-se dizer que os principais sintomas na visão do autor são a fissuração, o destacamento e a desagregação.

**Tabela 5** - Agentes ou fatores de deterioração.

<b>Atmosféricos</b>	Radiação: solar, nuclear, térmica
	Temperatura: Elevação, diminuição de ciclos
	Água: sólida (como neve ou gelo)
	Líquida (como chuvas condensação, água estagnada)
	Vapor (como umidade relativa do ar )
	Constituintes normais do ar: oxigênio, ozônio e CO2
	Poluentes do ar: gases
	Neblina (partículas dissolvidas)
Ventos	
<b>Biológicos</b>	Vegetais: Algas, fungos, cogumelos, plantas e árvores
	Animais: insetos, pássaros, moluscos e roedores
<b>Esforços</b>	Permanentes: como os decorrentes da ação da gravidade
	Variáveis: como ação física da água ou vento, frenagem
<b>Incompatibilidade</b>	Químicos
	Físicos
<b>Uso</b>	Desgaste por uso normal e abuso do uso
	Procedimentos de instalação e manutenção

**Fonte:** adaptado de Fortes (1994) por Santos (2014).

Quando se analisa a deterioração por “causas mecânicas”, para Souza e Ripper (1998), este tipo provém das solicitações mecânicas que a estrutura está submetida, tendo, por exemplo: choques e impactos, recalque diferencial nas fundações e acidentes imprevisíveis (inundações, grandes tempestades, explosões e abalos sísmicos) (Figura 12).

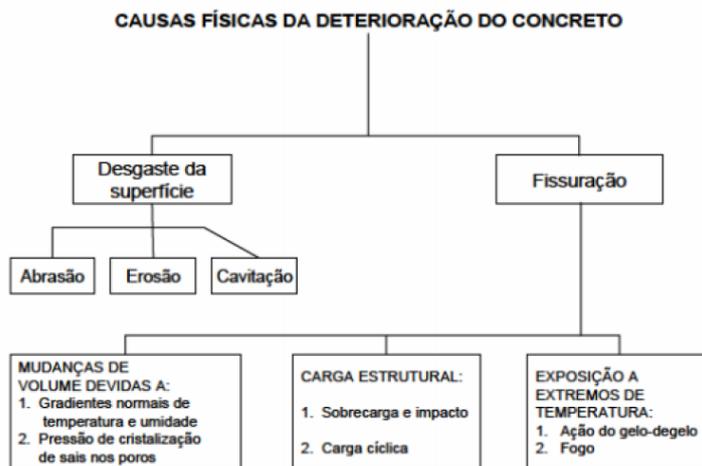
**Figura 12** - Queda da estrutura de um viaduto após a batida de caminhão.

**Fonte:** Site Extra Globo (2019)<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Website Extra Globo. **Após batida, viga de viaduto cai sobre caminhão e mata dois em Coelho Neto.** 09 de agosto de 2019. Disponível em: ([Após batida, viga de viaduto cai sobre caminhão e mata dois em Coelho Neto \(globo.com\)](http://globo.com)), acesso: 28.12.2020

No caso da deterioração por causas físicas, pode-se dizer que estas decorrem tanto dos efeitos de desgaste como abrasão, erosão e cavitação, ou então pelo fenômeno de fissuração, tendo, por exemplo, as mudanças de volume, o sobre carregamento da estrutura e as variações extremas de temperatura. A Figura 13 mostra os agentes físicos de deterioração do concreto.

**Figura 13** - Agentes físicos de deterioração do concreto.



**Fonte:** adaptado de Metha e Monteiro (1994) por Santos (2014).

Na Figura 14 é possível visualizar um exemplo de deterioração por fissura proveniente da sobrecarga da pilastra de um viaduto, resultando na completa falha estrutural da peça. Tal efeito pode ser resultante da combinação de fatores como sobrecarga, variação extrema da temperatura e assim do volume da peça.

**Figura 14** - Exemplo de deterioração estrutural por agentes físicos.



**Fonte:** Site Pinterest<sup>3</sup>

<sup>3</sup>Website Pinterest. *Structural Failures of Concrete Structures*. Disponível: (([347](#)) [Pinterest](#)), acesso: 16.12.2020

### 3.3 Fissuração das Estruturas de Concreto Armado

A fissuração de estruturas de concreto está entre os principais tipos de manifestações patológicas encontradas no Brasil, conforme descrito por Paulo Helene anteriormente. Para Vitório (2003) presente na obra de Zuchetti (2015), as manifestações patológicas, principalmente as relacionadas à fissuração, geralmente se manifestam de maneira bem característica, de modo a permitir que um profissional deduza a sua natureza, origem e mecanismo envolvido, assim como suas prováveis consequências. Neste caso torna-se importante distinguir os graus de fissuração que podem ser encontrados na deterioração de estruturas de concreto:

- fissura - uma abertura em forma de linha que aparece nas superfícies de qualquer material sólido, proveniente da ruptura sutil de parte de sua massa, com espessura de até 0,5 mm;
- trinca - uma abertura em forma de linha que aparece na superfície de qualquer material sólido, proveniente de evidente ruptura de parte de sua massa, com espessura de 0,5 mm a 1,00 mm;
- rachadura - uma abertura expressiva que aparece na superfície de qualquer material sólido, proveniente de acentuada ruptura de sua massa, podendo-se “ver” através dela e cuja espessura varia de 1,00 mm até 1,5 mm;
- fenda- uma abertura expressiva que aparece na superfície de qualquer material sólido, proveniente de acentuada ruptura de sua massa, com espessura superior a 1,5 mm.

Outras definições podem ser encontradas na literatura da área, apresentando algumas variações nas nomenclaturas e também nas possíveis amplitudes como se pode ver na Tabela 6, proveniente das definições do IBAPE-SP (Instituto Brasileiro de Avaliação e Perícias de Engenharia de São Paulo) e do IBAPE – MG (Instituto Brasileiro de Avaliação e Perícias de Engenharia de Minas Gerais). Neste caso, ambos os Institutos apresentam denominações diferentes.

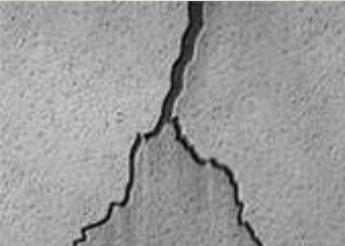
**Tabela 6 - Definição para fissura trinca, rachadura e fenda.**

Abertura	Classificação IBAPE-SP	Classificação IBAPE-MG
Fissura	até 0,5 mm	até 0,5 mm
Trinca	0,5 mm a 1,0 mm	0,5 m a 1,5 mm
Rachadura	1,0 mm a 1,5 mm	1,5 mm a 5,0 mm
Fenda	acima de 1,5 mm	5,0 mm a 10,0 mm
Brecha		acima de 10,0 mm

**Fonte:** adaptado de IBAPE-SP e IBAPE- MG<sup>4</sup>

Segundo Ricardo França (2020) a fissura, trinca, rachadura ou fenda são a mesma coisa quando analisadas de forma geral, sendo o tempo de vida e o tamanho os principais fatores que as diferencia, conforme se pode ver na Tabela 7. Neste caso uma pequena fissura muitas vezes desconsiderada tenderá a crescer evoluindo para uma trinca e posteriormente para uma rachadura, podendo comprometer a integridade da estrutura.

**Tabela 7 - Características da fissura, trinca e rachadura.**

Abertura	Imagem	Aspectos
Fissura		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abertura superficial que atinge a massa corrida e a pintura</li> <li>• Espessura de até 1 mm, estreita e alongada</li> <li>• Não é perigosa a estrutura</li> </ul>
Trinca		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mais profunda e acentuada</li> <li>• Espessura de 1 a 3 mm</li> <li>• Pode afetar os elementos estruturais</li> <li>• Ocorre ruptura do elemento</li> <li>• Pode ser perigosa a Estrutura</li> </ul>
Rachadura		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande, profunda e acentuada</li> <li>• Espessura acima de 3 mm</li> <li>• A água, o vento e a luz são capazes de passar pela rachadura</li> <li>• Requer imediata atenção</li> <li>• É altamente perigosa</li> </ul>

**Fonte:** adaptado de França (2020).

<sup>4</sup> IBAPE- SP. Norma de Inspeção Predial. São Paulo. 2011

IBAPE – MG. Norma de Vistoria Cautelar. Belo Horizonte. 2014

A NBR 6118 (2014) apresenta um limite de fissuração máximo possível em armaduras de acordo com a classe de agressividade no qual a estrutura encontra-se exposta, neste caso valores superiores podem prejudicar a durabilidade e resistência da estrutura (Tabela 8).

**Tabela 8** - Exigências de durabilidade quanto às fissuras em concreto simples e armado.

Tipo de Concreto	Classe de Agressividade	Exigência a Fissuras
Concreto Simples	CAA I à CAA IV	Não há
	CAA I	$W_k \leq 0,4 \text{ mm}$
Concreto Armado	CAA II à CAA III	$W_k \leq 0,3 \text{ mm}$
	CAA IV	$W_k \leq 0,2 \text{ mm}$

Fonte: adaptado de NBR 6118 (2014).

Os componentes das estruturas de concreto armado são projetados já prevendo a fissuração sujeitas ao tracionamento, regiões estas destinadas a propósitos estéticos, deformabilidade e a durabilidade da peça. Existem hipóteses que permitem a realização dos cálculos do fissuramento de armaduras longitudinal, sendo estas:

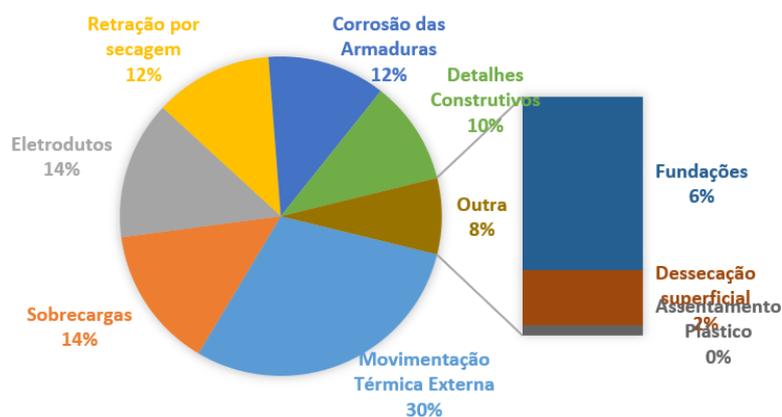
- a deformação de ruptura do concreto;
- a flexão no diagrama de tensões de compressão;
- as seções transversais planas permanecem planas;

Deverá ser levado em conta sempre o efeito de contração:

Levando-se em conta as tensões de serviço, os módulos de deformação longitudinal do aço e do concreto, o coeficiente de conformação superficial das barras de aço e diversas outras características geométricas (diâmetro das barras tracionadas, cobrimento da armadura, taxa geométrica da armadura etc.) foram desenvolvidas diversas teorias com a finalidade de se prever o espaçamento médio entre fissuras e suas aberturas mais prováveis em componentes de concreto armado submetidos à flexão ou tração pura. Essas formulações teóricas, associadas a coeficientes empiricamente determinados e a fatores probabilísticos, conduzem a estimativas bastante precisas do nível de fissuramento das peças (ELS-W) não comprometendo o desempenho da estrutura de concreto dimensionada para a edificação (THOMAZ, 1989 apud ZUCHETTI, 2015 p.20)

Dal Molin (1998) citado por Macedo (2017), indica as principais causas de fissuras em estruturas, e suas respectivas incidências. Através da Figura 15 é possível perceber que o principal responsável pelo fissuramento das estruturas é a movimentação térmica externa com 30% dos casos, estando à sobrecarga da estrutura e a existência de eletrodos em segundo lugar com 14%, seguidas pela corrosão das armaduras e a retração na secagem.

**Figura 15** - Tipos e incidência de fissuras em concreto armado.



**Fonte:** adaptado de Da Molin (1998) apud Macedo (2017)

No Brasil a fissuração e corrosão de estruturas estão entre as principais manifestações patológicas encontradas, responsável por mais de 20% dos casos, porém este número é ainda maior quando analisada a região sul do país, onde passa a representar 70% das ocorrências de fissuramentos, porém neste caso, seu aparecimento deriva da grande variação de temperatura existente (HELENE, 2003 apud ZUCHETTI, 2015).

Ao analisar as obras de Macedo (2017) e Battisti (2017), relacionadas a patologias e estrutura de concreto amado, é possível identificar seis tipos de fissuras, provenientes de diferentes fenômenos, sendo estas apresentadas na Figura 16 e descritas a seguir.

**Figura 16** - Tipos de fissuras ocorridas em estruturas de concreto.



**Fonte:** autor.

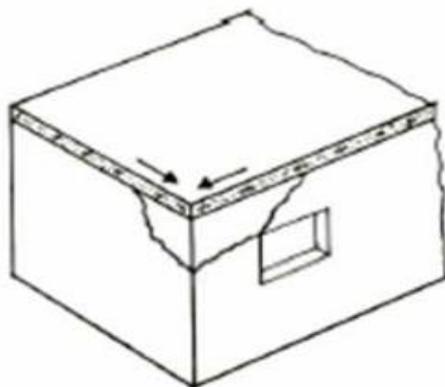
### 3.3.1 Fissuras devido à Variação de Temperatura

Este tipo de fissura decorre da variação térmica a qual a estrutura está submetida, no caso de variações com grandes gradientes de temperatura, a estrutura irá sofrer mudanças em suas dimensões. Neste caso, se houver na estrutura regiões que não possuam movimento livre, as tensões geradas nesta região provenientes da variação dimensional irão resultar no surgimento de fissuras e trincas (MARCELLI, 2007).

Este fissuramento é comumente encontrado em peças com maior robustez e mais longas, neste caso o gradiente térmico proveniente da variação de temperatura nas faces da peça irá incitar o surgimento desta patologia (MARCELLI, 2007).

Trata-se de um fenômeno patológico com maior incidência em apartamentos de cobertura (Figura 17), sujeitos a grande variação climática e exposição ambiental (MACEDO, 2017)

**Figura 17** - Fissuras devido à expansão térmica da laje da cobertura.



**Fonte:** Thomas (2001) apud Site Imaizumi Engenharia<sup>5</sup>

### 3.3.2 Fissuras de Cisalhamento

Trata-se de fissuras diagonais que surgem na região onde o esforço cortante for maximizado. Surgem devido à falta de seção suficiente de concreto, ou na falta de armadura que ofereça resistência ao cisalhamento, podendo ter sua origem no projeto ou na execução da peça. Em se tratando de vigas com carregamentos pontuais, sua origem

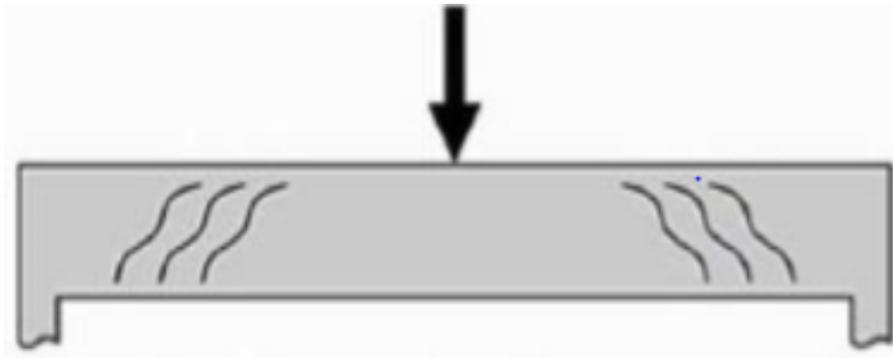
---

<sup>5</sup> Site Imaizumi Engenharia. **Parte 1: Como identificar patologias em projetos de Alvenaria Estrutural – Fissuração.** Disponível: ([Imaizumi - Notícias \(imaizumiengenharia.com.br\)](http://imaizumi.com.br)), acesso: 08.12.2020

se dá nas regiões de apoio da viga, terminando na região de aplicação de carga. (SOUZA e RIPPER, 1998)

De acordo com Marcelli (2007) trata-se de uma fissura proveniente do excesso de carga, da utilização de uma armadura insuficiente ou da disposição inadequada da mesma, seu aparecimento se dá nos pontos de cortante máximo, como visto na Figura 18.

**Figura 18** - Trincas de cisalhamento em viga.

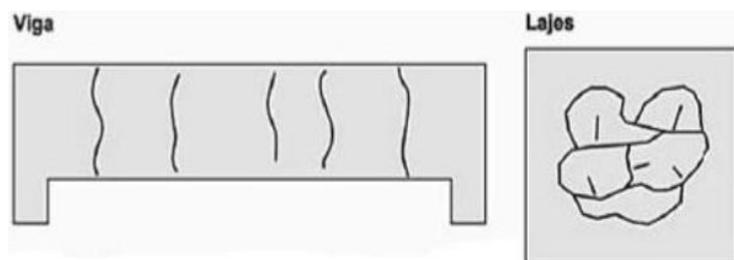


Fonte: Marcelli (2007).

### 3.3.3 Fissuras devido à Retração Hidráulica

Trata-se de uma patologia proveniente da cura mal realizada do concreto, onde as tensões internas provenientes das perdas de água, aliadas ao excesso de calor e a proteção térmica ineficiente do elemento estrutural. Esta combinação irá acarretar a retração da região gerando esforços de tração superiores ao suportado pelo concreto, gerando assim o fissuramento em direções definidas, conforme a Figura 19 (HELENE, 2001 apud MACEDO, 2017).

**Figura 19** - Fissura no concreto por retração hidráulica.



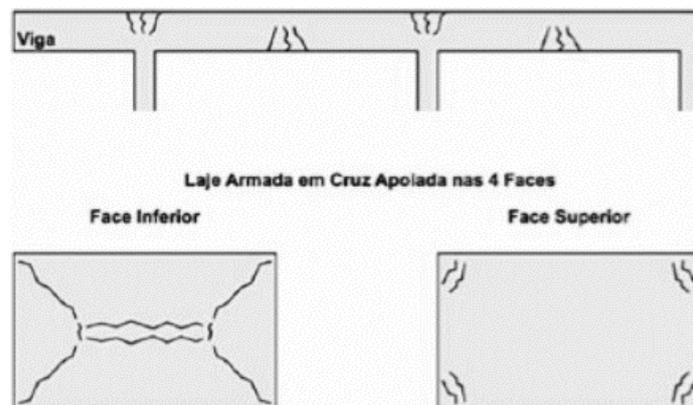
Fonte: Marcelli (2007).

### 3.3.4 Fissuras devido à Flexão

Trata-se de fissuras que surgem perpendicularmente à linha de tração do elemento

(Figura 20), tornando-se maiores e mais profundas conforme as forças de tração existentes ou quanto menor for à resistência da estrutura (HELENE, 1992).

**Figura 20** - Trincas de flexão em elementos de concreto armado.



**Fonte:** Marcelli (2007).

De acordo com Helene (1992), o surgimento desta patologia está relacionado ao erro de cálculo por parte do projetista, o qual poderá subdimensionar as cargas de atuação. Existem, porém, outras causas para tal problema sendo:

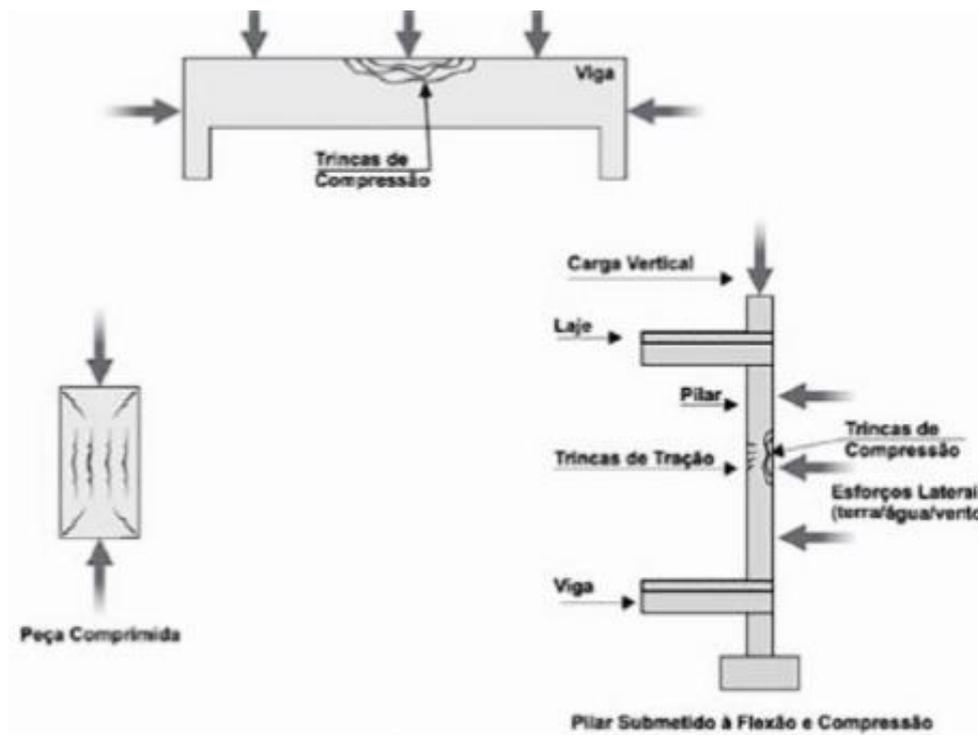
- o subdimensionamento da estrutura;
- devido à realização incorreta da sobrecarga atuante;
- quando há deficiência dos materiais utilizados na execução;
- quando ocorrer alteração no tipo de aplicação da estrutura, resultando em cargas maiores do que as previstas (HELENE, 2001 apud MACEDO, 2017).

### 3.3.5 Fissuras devido à Esforços de Compressão

Neste grupo estão às fissuras e trincas que se situam na zona comprimida da estrutura, paralelamente ao eixo da viga, resultante do esmagamento do concreto, sendo esta anomalia típica de vigas super-armadas, fabricadas com concreto de baixa resistência (MARCELLI, 2007).

Segundo Marcelli (2007), em determinadas situações as vigas e pilares poderão trabalhar em sistemas duplo de solicitação, podendo ser de flexão juntamente com compressão, a depender dos esforços atuantes sobre a estrutura (Figura 21 e Figura 22). Desta forma, haverá um acúmulo de tensões na região de maior solicitação acarretando o aparecimento de trincas.

**Figura 21** - Trincas de compressão em elementos de concreto armado.



**Fonte:** Marcelli (2007).

**Figura 22** - Exemplos de fissuras e trincas por compressão (esmagamento).



**Fonte:** Pouca<sup>6</sup> (2011) e Engeduca<sup>7</sup> (2019)

<sup>6</sup> POUCA, Nelson Saraiva Vila. Encurvadura da Estrutura de um Edifício. Website Engenheiro Civil Sérgio Peixoto. 19 de julho de 2011. Disponível em: ([Conexão Engenharia do Futuro: Encurvadura da Estrutura de um Edifício \(eng-civilsergiopeixotto.blogspot.com\)](http://conexãoengenharia.com.br/eng-civilsergiopeixotto.blogspot.com)), acesso: 07.12.2020

<sup>7</sup> Website ENGEDUCA. Patologia das Estruturas de Concreto Armado. Setembro de 2019. Disponível em: (<https://www.facebook.com/cursos.engeduca/photos/esmagamento-do-concreto-erro-no-dimensionamento-das-armaduras-e-da-se%C3%A7%C3%A3o-do-conc/2462433623835601/>), acesso: 07.12.2020

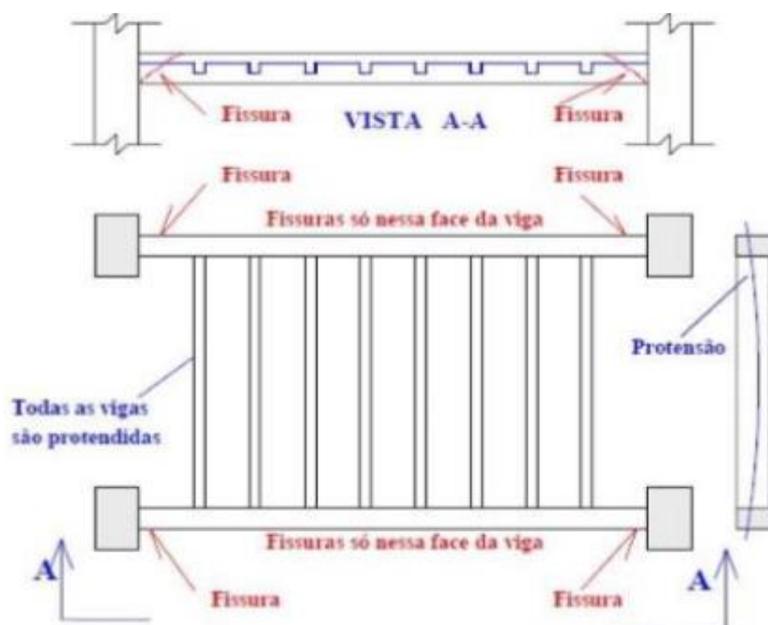
O concreto é responsável por absorver a maior parcela dos esforços de compressão aplicados sobre a estrutura, de modo que ao surgir fissuras ou trincas nele provenientes de tensões de compressão é importante que sejam tratadas imediatamente, para que se possa evitar o colapso da estrutura de uma forma geral, como na Figura 22 (GONÇALVES, 2015 apud MACEDO, 2017). Segundo Souza e Ripper (1998 apud BATTISTI, 2017, p.32):

[...] fissuras provocadas por compressão são as que mais exigem atenção e rápidas providências, pois no elemento de concreto armado, o concreto que se encontra fissurado é o responsável pela absorção da maior parte dos esforços de compressão. Neste caso, uma fissura pode significar o colapso da estrutura, ou ainda, o elemento já perdeu sua capacidade de carga original e irá distribuir os esforços para os demais elementos estruturais comprometendo os mesmos.

### 3.3.6 Fissuras devido à Esforços de Torção

A torção de um concreto ocorrerá quando a estrutura é submetida à rotação em relação a sua cessação transversal, neste caso, as trincas e fissuras geradas apresentam inclinações de  $45^\circ$  em torno do elemento como ilustra a Figura 23 (MARCELLI, 2007).

**Figura 23** - Esquema de fissura causada por torção.



**Fonte:** Thomaz (2003) apud Macedo (2017)

Este tipo de patologia é comumente encontrado em sacadas engastadas em vigas, lajes em balanço ou lajes com flecha excessiva apoiadas sobre vigas, em situações que existem balanços passíveis de exercer esforços excessivos na viga de sustentação (Figura 24). Tal condição irá provocar o movimento de rotação no plano transversal da seção, gerando uma tensão superior a suportada pelo elemento, dando origem as fissuras e trincas (HELENE, 1992 e MACEDO, 2017).

**Figura 24-** Exemplo de fissura causada por torção.



Fonte: Website ATRIBUNA<sup>8</sup> (2017).

### 3.4 Deterioração Química das Estruturas

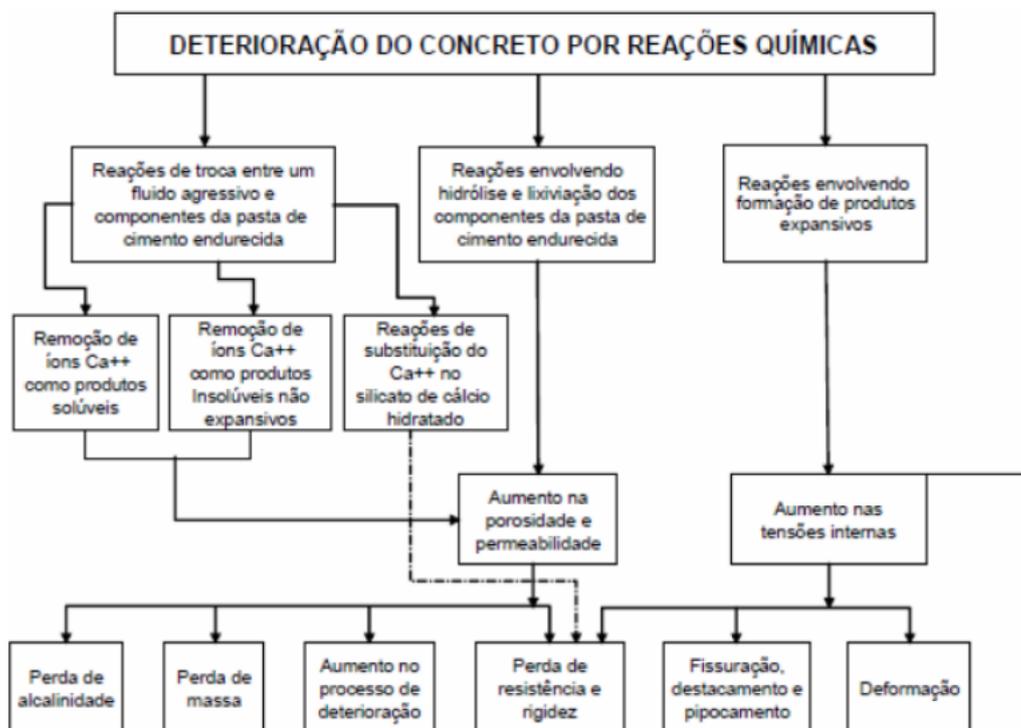
Em relação ao processo de deterioração das estruturas de concreto, provenientes de reações químicas, pode-se dizer que esta decorrerá em três tipos de reações (Figura 25) sendo as reações de troca entre um fluido agressivo e os componentes da pasta de cimento endurecida. Existem também as reações envolvendo a hidrólise e a lixiviação dos componentes da pasta de cimento endurecida e por fim as reações envolvendo a formação de produtos expansivos.

A velocidade com que a estrutura irá deteriorar está relacionada ao tipo de produto químico ao qual estará exposta, assim como a interação que a pasta de cimento endurecido apresentar junto a este agente nocivo, neste caso substâncias como ácidos inorgânicos (ácido clorídrico, nítrico etc.), ácidos orgânicos (acético, fórmico e láctico) e soluções de cloreto de alumínio apresentam uma velocidade de ataque elevada a estrutura (Tabela 9).

---

<sup>8</sup> Website ATRIBUNA. Moradores temem pela segurança do mergulhão. Reportagem de Geovane Mendes. 3 de maio de 2017. Disponível em: ([Moradores temem pela segurança no Mergulhão – A Tribuna RJ](#)), acesso: 06.12.2020

**Figura 25** - Deterioração do concreto através de reações químicas.



Fonte: adaptado de Metha e Monteiro (1994) por Santos (2014).

**Tabela 9** - Efeito de alguns produtos químicos comuns sobre o concreto.

Velocidade de ataque à temperatura ambiente	Ácidos Inorgânicos	Ácidos Orgânicos	Soluções Alcalinas	Soluções de Sais	Diversos
Rápida	Clorídrico Fluorídrico Nítrico Sulfúrico	Acético Fórmico Láctico		Cloreto de Alumínio	-----
Moderada	Fosfórico	Tânico	Na(OH) > 20%	Nitrato de amônio Sulfato de amônio Sulfato de sódio Sulfato de magnésio Sulfato de cálcio Cloreto de amônio	Bromo (gás) Concentrado de sulfito
Lenta	Carbônico		Na(OH) 10 a 20%	Cloreto de magnésio Cianeto de sódio Cloreto de cálcio Cloreto de sódio	Cloro (gás) Água do mar Água pura
Desprezível	---	Oxálico	Na(OH) < 10% NH <sub>4</sub> OH	Cloreto de cálcio Cloreto de sódio Nitrato de zinco Cromato de sódio	Amônia Líquida

Fonte: adaptado de Neville (1992) apud Santos (2014).

Reis (2001) ressalta da importância de considerar e compreender os mecanismos envolvidos na degradação e envelhecimento das estruturas de concreto através da ação de agentes químicos, os quais poderão também estar relacionados a processo de degradação física como a lixiviação e a expansão (Tabela 10).

Na obra de Garcia (1999) são apresentadas as seguintes reações químicas passíveis de ocorrer na pasta de cimento em concretos armados:

- reações envolvendo hidrólises, resultando na lixiviação do hidróxido de cálcio e expondo os outros componentes do concreto a potenciais ataques químicos;
- reações por troca de cátions, estas podem acarretar três tipos de reações deletérias, destacando a formação de sais solúveis como cloreto de cálcio, cloreto de alumínio, cloreto de ferro, os ácidos carbônicos e sulfúricos, dentre outros;
- reações formando produtos expansivos, neste caso há a ocorrência de tensões internas ocasionadas pelo fechamento das juntas de expansão, deformações e deslocamentos seguidos de fissuração, lascamento e pipocamento da estrutura.

[...] os principais mecanismos de deterioração da estrutura são: Mecanismo de deterioração pertinente ao concreto: expansão por sulfatos, expansão por reações alcalinas e reações superficiais danosas; Mecanismos de deterioração referente à armadura: corrosão por teores elevados de cloretos e corrosão devido à carbonatação; Mecanismos de deterioração da própria estrutura: ações térmicas, ações mecânicas, ações cíclicas, relaxação, deformações e outros, mas que não fazem parte da análise de vida útil e durabilidade. (HELENE, 1992 apud BATTISTI, 2017, p.29)

Balthar (2004) descreve que no estado endurecido, o concreto perde água para o ambiente. Com a perda, ele não fica mais preso à estrutura dos produtos hidratados por ligações físico-químicas fortes e a retirada do concreto não causa retração significativa. Contudo, o autor destaca que quando a maior parte desta água livre é perdida e levada à secagem, observar-se que uma perda adicional de água passa a resultar em uma retração considerável, o que causa empenamento e fissuras que são denominadas como retração por secagem.

**Tabela 10** - Principais mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto armado.

Mecanismo	Agentes	Ação	Sintomatologia
Lixiviação	Águas puras, carbônico-agressivas, agressivas e ácidas	Carrear compostos hidratados da pasta de cimento	- Superfície arenosa ou com agregado-expostos, expostos sem a pasta superficial; -Eflorescência de carbonato; - Elevada retenção de fuligem / fungos
Expansão	Águas e solos contaminados por sulfatos	Reações expansivas e deletérias com a pasta de cimento hidratado	- Superfície com fissuras aleatórias e esfoliação - Redução da dureza e do pH
Expansão	Agregados reativos	Reações entre os álcalis do cimento e certos agregados reativos	- Expansão geral da massa do concreto - Fissuras superficiais e profundas
Reações deletérias	Certos agregados	Transformações de produtos ferruginosos presentes nos agregados	- Manchas, cavidades e protuberâncias na superfície do concreto
Despassivação da armadura	Gás carbônico da atmosfera	Penetração por difusão e reação com os hidróxidos alcalinos dos poros do concreto, reduzindo o pH dessa solução	- Requer ensaios específicos, - Em casos mais acentuados, apresentam manchas, fissuras, destacamentos do concreto, perda da seção resistente e da aderência
Despassivação da armadura	Cloretos	Penetração por difusão, impregnação ou absorção capilar, despassivando a superfície do aço	- Requer ensaios específicos - Ao atingir a armadura apresenta os mesmos sinais do item 5.

**Fonte:** adaptado de Reis (2001).

Em se tratando das reações químicas expansivas existem quatro fenômenos patológicos que estão intimamente relacionados, sendo o ataque por sulfatos, ataque álcalis-agregados, hidratação de CaO e Mg livres, e a corrosão da armadura no concreto, sendo os três primeiros descritos na Tabela 11 e apresentados na Figura 26. Em relação ao fenômeno patológico de corrosão da armadura de concreto, ele será tratado com maior detalhamento no próximo tópico.

**Tabela 11** – Fenômenos relacionados às reações químicas na deterioração do concreto armado.

Fenômeno	Agentes
<b>Ataque por sulfatos</b>	O ataque por sulfatos contidos na água do mar possui menor severidade quanto aos sulfatos dissolvidos em águas freáticas, devido a presença de cloretos que amenizam os efeitos das reações. Este ataque se dá pelas reações dos sulfatos com o hidróxido de cálcio livre $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , resultantes da hidratação do cimento. Ocorre assim uma expansão seguida por uma fissuração progressiva de configuração irregular, podendo haver também o desprendimento de lascas.
<b>Ataque álcalis-agregado</b>	Trata-se de um processo químico no qual alguns constituintes mineralógicos do agregado reagem com os hidróxidos alcalinos (resultantes do cimento, água de amassamento, agregados etc.). Gera-se assim um gel higroscópico expansivo, que resultará na expansão ou movimentação da estrutura, em fissuração ou até pipocamento, com redução das resistências a tração e compressão.
<b>Hidratação de CaO e Mg livres</b>	Neste caso, quando se encontram presentes em quantidades significativas o MgO e o CaO cristalinos, poderá haver um processo de expansão e fissuração do concreto.

**Fonte:** adaptado de Metha e Monteiro (1994); Kihara *et al.* (1998) e Brandão (1998) citados por Garcia (1999).

**Figura 26** - Exemplos de deterioração por ataque de sulfatos, ataque álcalis-agregados, hidratação de CaO E Mg livres.



(a) Estrutura de concreto armado deteriorada pelo ataque de sulfatos

(b) Reação álcali-agregado em blocos de fundação de edifícios em Recife-PE

(c) Processo de hidratação de CaO e Mg livres em pilar de edificação

**Fonte:** adaptado de Santos (2014) e Condé (2020).

### 3.5 Corrosão

O fenômeno de corrosão da armadura irá decorrer a partir do momento em que o concreto falhar em proteger a estrutura de aço, pois sua proteção se dá alta alcalinidade do concreto (PH entre 12,7 e 13,8) nível que favorece a geração de uma camada passiva de óxidos como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , compacta e aderente a superfície da armadura. Assim, uma falha no concreto impossibilitar um caminho para o ataque da armadura por agentes agressivos externos (SANTOS, 2014).

Polito (2006) apresenta diferentes definições para o processo de corrosão, partindo da perspectiva de diferentes autores, sendo apresentados a seguir na Tabela 12.

**Tabela 12** – Definições de corrosão na perspectiva de diferentes autores.

<b>Autor</b>	<b>Definição</b>
Helene (1986)	“corrosão é uma interação destrutiva de um material com o ambiente, seja por reação química, ou eletroquímica”.
Panossian (1993)	“à transformação de um metal em íon metálico pela sua interação química ou eletroquímica com o meio em que se encontra”.
Bauer (1994)	“A corrosão é transformação não intencional de um metal, a partir de suas superfícies expostas, em compostos não aderentes, solúveis ou desprezíveis no ambiente em que o metal se encontra.

**Fonte:** adaptado de Polito (2006).

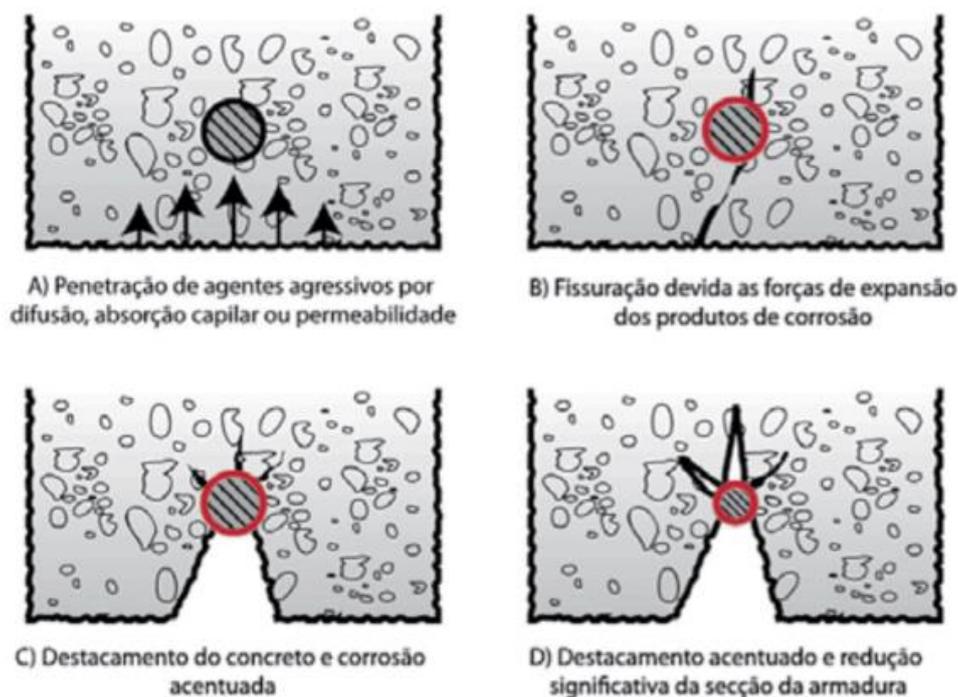
Trata-se de uma patologia muito comum na construção civil, assim não é muito difícil observar trincas provenientes da corrosão da armadura. Porém quando encontradas, deve-se tomar as medidas corretivas adequadas a fim de bloquear o processo, inibindo o agravamento dos sintomas (MARCELLI, 2007).

Na descrição de Helene (1992) a incidência desta patologia pode ser atribuída aos seguintes fatores:

- má execução das peças estruturais;
- utilização de concreto com resistência inadequada;
- presença de cloretos.

A existência de fissuras ou trincas no concreto irá possibilitar um caminho a agentes agressivos até a armadura, iniciando assim sua corrosão e degradação. Em sua obra, Bronze (2016) faz menção ao processo de evolução da deterioração de estruturas de concreto através do processo de corrosão. Neste caso inicia-se com a penetração de agentes agressivos na estrutura, com posterior surgimento de uma fissura proveniente das forças de expansão dos produtos da corrosão (Figura 27), em seguida ocorrerá o destacamento do concreto armado, proveniente do agravamento da corrosão, tendo por fim o destacamento acentuado com a redução da secção da armadura, prejudicando assim a integridade da estrutura.

**Figura 27** - Evolução da deterioração de estruturas de concreto por corrosão de armaduras.



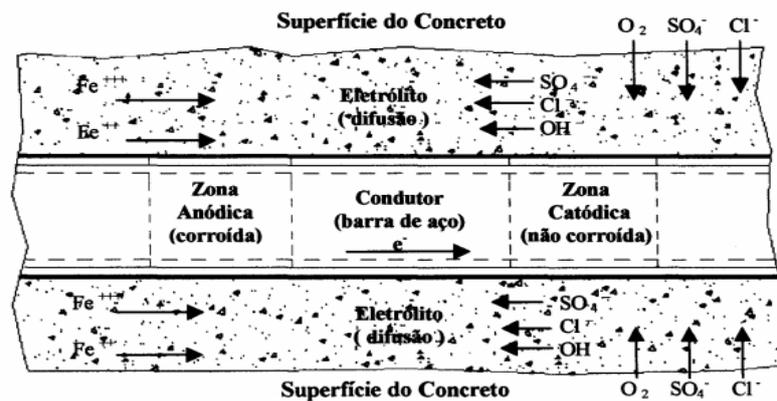
**Fonte:** adaptado de Helene (2001) apud Bronze (2016).

O processo de corrosão da armadura está baseado no processo de corrosão eletroquímica, de modo que sua ocorrência se encontra condicionada aos seguintes princípios e condições:

- deve existir um eletrólito;
- deve haver uma diferença potencial;
- deve existir oxigênio; e
- pode haver agentes agressivos.

De acordo com Santos (2014) e Polito (2006) existem dois possíveis mecanismos para a ocorrência do processo de corrosão de metais, sendo o primeiro relativo a um processo de corrosão puramente químico, no qual ocorre uma reação gás/sólido na superfície do aço, gerando uma fina camada de produtos de corrosão na superfície da armadura. No segundo caso, tem-se a corrosão eletroquímica, uma deterioração comum em estruturas de concreto, resultante de um desequilíbrio elétrico entre os diferentes metais do meio, ou nas diferentes partes do metal presente, neste caso, forma-se uma chamada pilha de corrosão ou célula de corrosão (Figura 28).

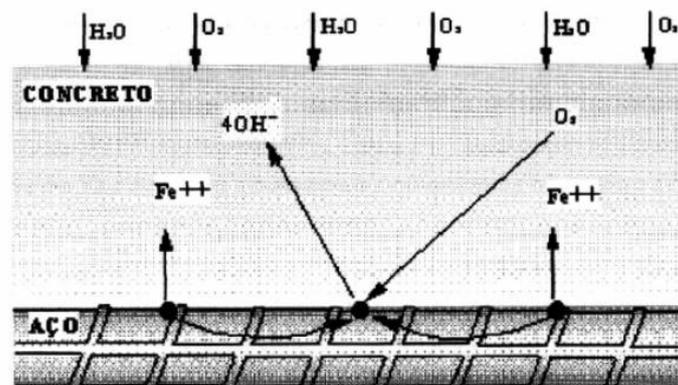
Figura 28 - Célula de corrosão.



Fonte: adaptado de Helene (1986) por Garcia (1999)

A corrosão eletroquímica, comum em estruturas de concreto armado, está relacionada à falta de uniformidade do aço, assim como ao seu contato junto a metais que apresentam menor potencial eletroquímico, ou então com a heterogeneidade do meio físico e químico do meio (Figura 29).

Figura 29 - Representação esquemática da corrosão do aço no concreto.



Fonte: adaptado de Moskovin *et al.* (1983 apud Guimarães, 1997) por Santos (2014)

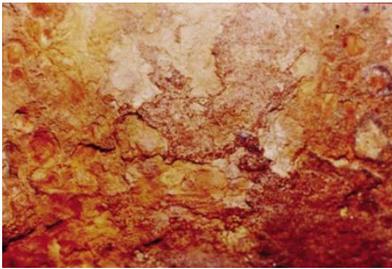
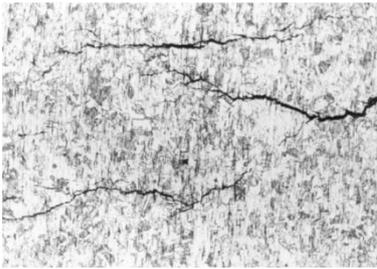
De acordo com Polito (2006, p. 21):

Já a corrosão eletroquímica ou em meio aquoso é resultado da formação de uma célula de corrosão, com eletrólito e diferença de potencial entre pontos da superfície. Se qualquer um destes elementos for retirado, ou se impedirmos a entrada de oxigênio o processo é paralisado. O eletrólito é representado pela umidade presente no interior do concreto. É uma solução carregada ionicamente que permite ocorrerem às reações e possibilita o fluxo iônico. A diferença de potencial entre dois pontos da superfície pode ocorrer por diversos

fatores: por diferença de umidade, aeração, concentração salina, tensão no concreto e no aço, falta de uniformidade na composição do aço.

Na obra de Polito (2006) e Santos (2014), os autores realizam a classificação da corrosão segundo a sua morfologia, apresentando três tipos específicos de corrosão, sendo a corrosão uniforme, corrosão por pite e corrosão sob tensão fraturante, que são apresentados na Tabela 13.

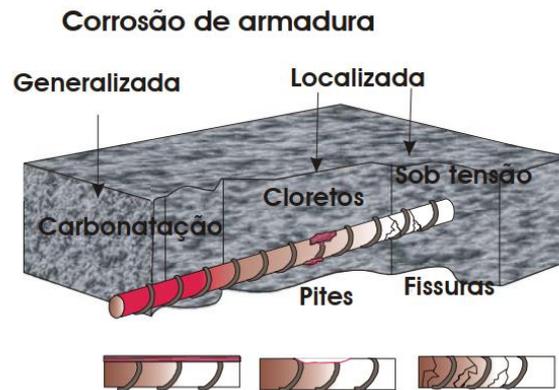
**Tabela 13-** Classificação da corrosão segundo sua morfologia.

Tipo	Imagem	Descrição
Corrosão Uniforme		A corrosão uniforme ou generalizada é uma corrosão eletroquímica que ocorre em toda a extensão da superfície com a mesma intensidade, ocasionando perda uniforme de espessura.
Corrosão por Pite		É conhecida como puntiforme, ocorre em pontos ou pequenas áreas localizadas. Evoluem aprofundando-se, podendo causar o rompimento pontual da barra.
Corrosão sob tensão fraturante		Trata-se de um tipo de corrosão que ocorre juntamente com uma tensão de tração, sendo capaz de gerar e propagar fissuras, sua incidência faz com que o material metálico perca suas propriedades mecânicas, possibilitando seu rompimento quando solicitado.

**Fonte:** adaptado de Cascudo (1997) e Gentil (2003) por Polito (2006) e Santos (2014)

Segundo especialistas como Gentil (2003) citado por Polito (2006), dentre as formas de corrosão apresentadas à corrosão por pite e a fraturante são as mais prejudiciais a estrutura, já que as perfurações ou fraturas podem ocasionar a perda de espessura do material, resultando na formação de pontos com tensões concentradas passíveis de reduzir a resistência do material. Neste caso, Calister (2002) apud Polito (2006) descreve que a tensão responsável pelo trincamento pode ser tanto externa, quanto uma tensão residual derivada das mudanças bruscas de temperatura, ou contração desigual (Figura 30).

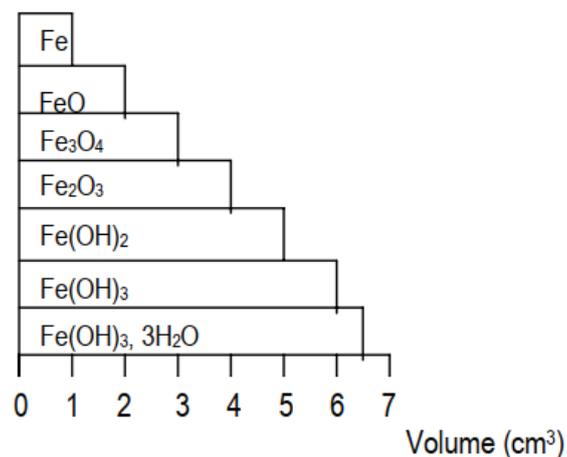
**Figura 30** - Tipos de corrosão e fatores que provocam.



**Fonte:** adaptado de Cascudo (1997) por Polito (2006)

Na visão de Reis (2001) o dano no concreto proveniente da corrosão da armadura poderá decorrer através da expansão volumétrica, da fissuração ou do lascamento do cobrimento. No caso da expansão, encontra-se relacionada ao volume e ao tipo de produto formado pelo processo de corrosão, de modo que este volume poderá ser até seis vezes superior ao volume do aço metálico original, conforme visto na Figura 31.

**Figura 31** - Volumes relativos do ferro e de alguns de seus produtos de corrosão.



**Fonte:** adaptado de Cascudo (1997) por Reis (2001).

Apesar dos mecanismos de corrosão ainda não serem compreendidos de forma exata, torna-se importante continuar os estudos em prol de aprofundar o conhecimento quanto aos mecanismos desta patologia, de modo a possibilitar o desenvolvimento de soluções e tecnologias mais eficazes ao seu combate. Na Figura 32 é possível visualizar uma situação de corrosão de armaduras e estruturas de concreto.

**Figura 32** - Armadura com corrosão eletroquímica.



**Fonte:** arquivo pessoal do autor.

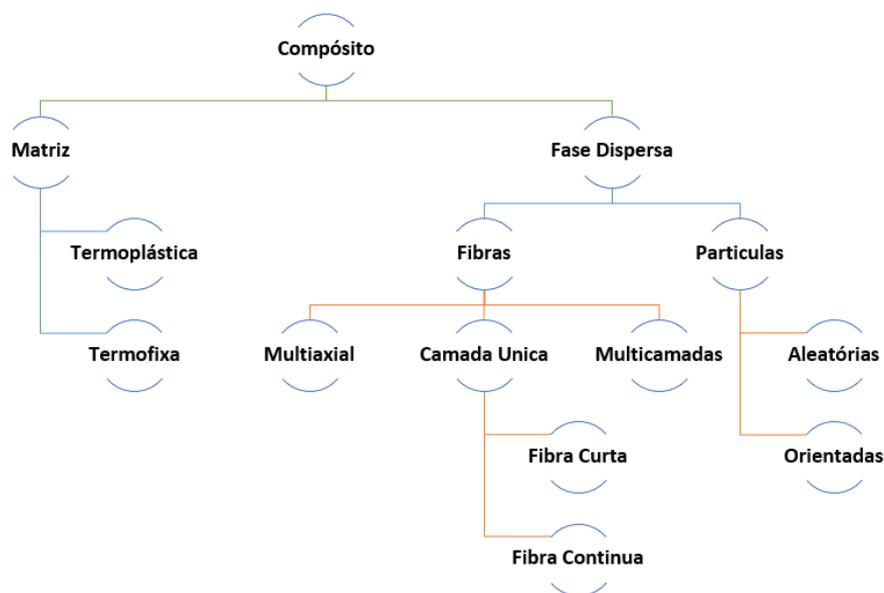
## 4. Recuperação de Estruturas com Compósitos de Fibra de Carbono

### 4.1 Compósitos

Um compósito pode ser simplesmente definido como a combinação de dois ou mais materiais individuais, cujo objetivo é obter um material com uma combinação das propriedades individuais de cada um deles. Numa definição mais rigorosa, um compósito é um material multifásico que é feito artificialmente. A fase denominada de matriz é uma fase contínua que envolve a fase denominada de dispersa. Os compósitos podem ser classificados como reforçados com partículas, reforçados com fibras, estruturais e nanocompósitos.

A fase matriz dos compósitos fibrosos pode ser um metal, um polímero ou uma cerâmica. Os compósitos com matriz polimérica consistem em uma resina polimérica como a fase matriz, e com fibras como meio de reforço. A Figura 33 mostra uma classificação geral dos compósitos poliméricos. Entre essa classe de compósitos, destacam-se os compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro, com fibras de carbono e com fibras de aramida. Na próxima seção será discutido o compósito polimérico reforçado com fibra de carbono.

**Figura 33** - Componentes e classificação hierárquica de compósitos poliméricos.



**Fonte:** adaptado de Levy Neto e Pardini (2006) e Rabello (2000).

### 4.1.1 Compósito Epóxi Reforçado com Fibra de Carbono

A utilização de fibras de carbono como reforço para estruturas de concreto armado iniciou-se na década de 80 no Japão. Neste período as estruturas das edificações encontravam-se danificadas devido aos abalos sísmicos ocorridos nesta região, requerendo uma solução de reforço rápida (MACHADO, 2002).

As fibras de carbono são elementos encontrados na forma de grafite, quando em seu estado mais estável. Em temperatura ambiente possuem coloração escura, sendo possível modificá-las durante o processo, para que se obtenham resistências ou módulos de elasticidade mais elevados. Neste caso, a elevação do módulo de elasticidade está condicionada ao uso de temperatura mais elevada na produção, reduzindo, porém, à resistência a tração (GARCEZ, 2007 apud PLÁCIDO, 2014). A fabricação das fibras de carbono está ilustrada na Figura 34.

**Figura 34** - Fabricação de fibra de carbono.



Fonte: Site Textile World<sup>9</sup> (2017)

Segundo Garcez (2007) citado por Plácido (2014) as fibras de carbono poderão ser obtidas a partir de três materiais, sendo o rayon (polímero celulósico), poliacrilonitrila (PAN) e o piche (alcatrão de petróleo ou de carvão). As principais características das fibras de carbono são:

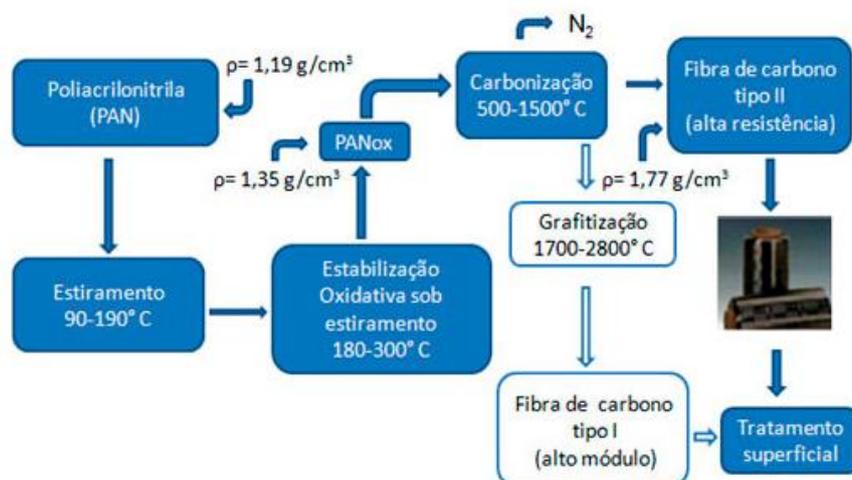
---

<sup>9</sup> Site Textile World. Advanced Composite Materials And Manufacturing In Vehicles, Wind And Compressed Gas Storage. Uday Vaidya. Março de 2017. Disponível em: ([Advanced Composite Materials And Manufacturing In Vehicles, Wind And Compressed Gas Storage | Textile World](#)), acesso: 08.12.2020

- densidade: 1,6 a 1,9 g/cm<sup>3</sup> (peso específico);
- coeficiente de dilatação longitudinal da fibra:  $-10^{-6}$  a  $0 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- coeficiente de dilatação térmica longitudinal da fibra: entre  $-10^{-6}$  a  $0 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- coeficiente de dilatação térmica transversal fibra:  $22 \times 10^{-6}$  a  $23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Para que se possa produzir a fibra de carbono, estas deverão ser sujeitas a ambientes com oxigênio e temperaturas extremamente altas, na ordem de 1000 a 3000 °C, para que ocorra a carbonização do filamento, sendo posteriormente realizada a estabilização, a carbonização, a grafitação e o tratamento superficial, conforme demonstra a Figura 35.

**Figura 35** - Esquema do processo de fabricação de fibras de carbono.



Fonte: Site IGTPAN<sup>10</sup>

Existem no mercado três sistemas de reforços com fibra de carbono que podem ser aplicados na confecção de compósitos com fibra de carbono (Figura 36), sendo eles:

- fios de fibra de carbono: colados na superfície do concreto sob tensão ou a seco.
- chapas pultrudadas: podem apresentar diversos formatos onde são colados na superfície do concreto através de adesivo, e são perfis contínuos.
- tecidos de fibra de carbono: são colados na superfície com uma resina epóxi com espessura parecida com a de uma parede. (BEBER *et al.*, 1999 apud SERRA E SILVA, 2019).

<sup>10</sup> Site IGTPAN. Mercado de Fibras de Carbono. Disponível em: ([IGTPAN](http://www.igtpan.com.br)), acesso: 06.12.2020

**Figura 36** - Sistemas de reforço empregando fibra de carbono.



**Fonte:** adaptado de Clip carbono (2019) por Serra e Silva (2019).

As fibras de carbono, dentre as possibilidades de aplicação existentes, podem ser utilizadas para elevar a resistência da estrutura, principalmente à flexão e ao esforço transversal de vigas e lajes, requerendo, porém, um grande cuidado quanto aos detalhes da sua aplicação e amarração na estrutura de concreto (RIPPER e SOUZA, 1998).

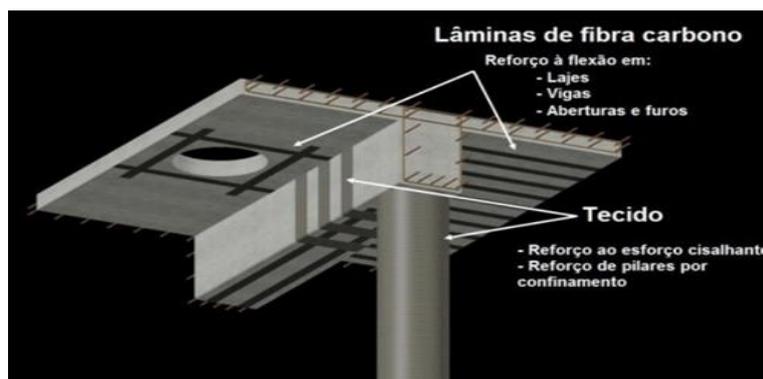
No Brasil, a primeira utilização das fibras de carbono para reforço estrutural ocorreu no viaduto Santa Tereza em Belo Horizonte no ano de 1998 (Figura 37), sendo sua escolha motivada por aspectos estéticos, dado ao fato de se tratar de um patrimônio histórico (BEBER, 2003).

**Figura 37** - Reforço com fibras de carbono no viaduto Santa Tereza.



**Fonte:** Adaptado de Machado (2005)

As propriedades das fibras de carbono variam segundo o tipo de fibra, o tamanho, o grau de concentração e a disposição destas fibras na matriz, sendo que o sistema de reforço com fibra de carbono possa se diferenciar, conforme o tipo de estrutura a se reforçar como laje, vigas, paredes, pilares, dentre outros, conforme ilustra a Figura 38 (ARAUJO, 2002 apud SERRA e SILVA, 2019).

**Figura 38** - Tipos de reforços com fibras de carbono em uma estrutura.

**Fonte:** adaptado de Borges (2016) por Serra e Silva (2019)

Deste modo, a escolha da fibra ser utilizada dependerá das condições do ambiente em que a estrutura se encontra, do tipo de estrutura e principalmente do esforço solicitante, conforme especificado na Tabela 14.

**Tabela 14** - Comparativo entre diferentes tipos de fibras.

<b>Consideração</b>	<b>Fibra de carbono</b>	<b>Fibra de Vidro</b>	<b>Fibra de Aramida</b>
Alcalinidade / exposição a meios ácidos	Alta resistência	Não tolera	Não Tolera
Expansão térmica	Próximo de zero, pode causar altas tensões de aderência	Similar ao concreto	Próximo de zero, pode causar altas tensões de aderência
Condutividade elétrica	Alta	Excelente isolante	Excelente Isolante
Tolerância ao impacto	Baixa	Alta	Alta
Fluência e fadiga	Alta resistência	Baixa Resistência	Baixa Resistência

**Fonte:** adaptado de Machado (2002) por Serra e Silva (2019)

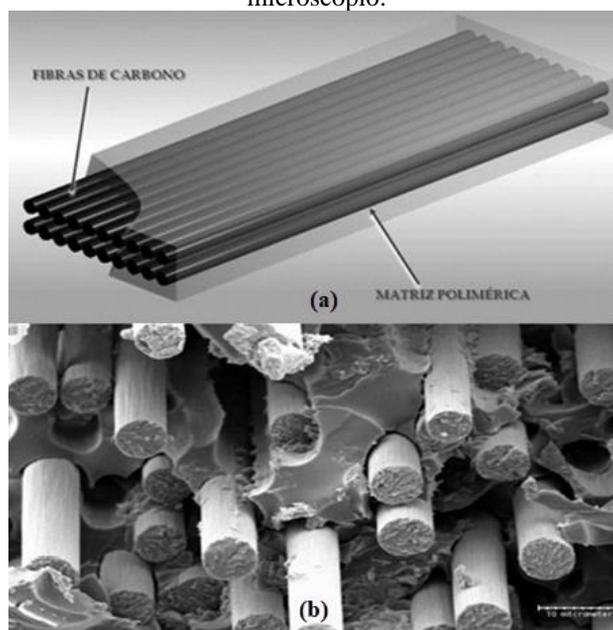
Segundo descrição de Santos (2008) e Plácido (2014) um sistema de reforço com manta de fibra de carbono é um composto polimérico constituído das seguintes partes:

- fibra de carbono - atua como carga reforçante, sendo responsável pelas propriedades como resistência mecânica do composto;
- matriz epoxídica - consiste em um polímero termofixo responsável por envolver e proteger as fibras de carbono, assim como transferir as tensões atuantes na

estrutura para as fibras. Assim caberá a matriz proteger as fibras de carbono de ataques de agentes agressivos, proporcionando a resistência química do sistema.

A representação esquemática de um composto de epóxi com fibra de carbono pode ser visualizada na Figura 39, sendo apresentada também sua ampliação em um microscópio, permitindo visualizar cada uma das fases do sistema (as fibras e a matriz).

**Figura 39** - (a) Representação do sistema de fibra de carbono e (b) ampliação do sistema em microscópio.



**Fonte:** adaptado de Machado (2013) por Mariano (2015)

De acordo com Gracez (2007 apud PLÁCIDO, 2014, p.9):

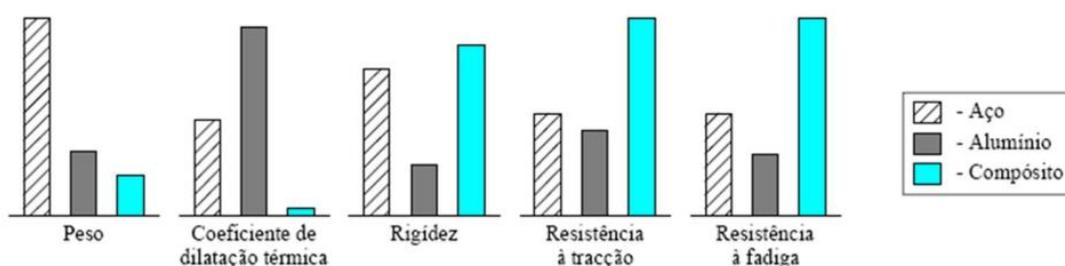
[...] quando as mantas de fibras de carbono são constituídas por uma grande parcela de fibras e são confeccionadas com matrizes que possuem deformações últimas menores que a das fibras – comum quando ocorre à combinação entre resina epóxi e fibras de alto desempenho – a falha na matriz não é crítica. Quando a resina epóxi falha, as cargas são transferidas para as fibras, que suportarão ao carregamento solicitado até a sua deformação última será atingida. A fibra de carbono não apresenta escoamento antes da ruptura, ocorrendo de forma brusca.

A fibra de carbono apresenta grande capacidade mecânica, sendo o principal material para reforço em vigas de concreto armado. Como visto, através de modificações em seu processo produtivo, podem-se alterar suas características e propriedades, tendo

disponível no mercado uma gama de fibras de carbono, cada qual com suas particularidades que deverão ser consideradas no momento da escolha.

Na obra de Plácido (2014) é possível comparar os métodos de reforço estrutural pelo uso de aço, pelo uso do alumínio e de compósitos de fibra de carbono, equiparando-se propriedades como peso, coeficiente de dilatação térmica, rigidez, resistência a tração e resistência fadiga, conforme gráfico da Figura 40. Neste comparativo percebe-se que o tecido de fibra de carbono possui superioridades em muitos aspectos, principalmente na resistência a tração e a fadiga.

**Figura 40** - Gráfico comparativo do compósito de fibra de carbono com aço e alumínio.



**Fonte:** adaptado de Machado (2002) por Plácido (2014).

Quando comparado a resistência a tração dos compostos de fibra de carbono em matriz epóxi com o aço, percebe-se que o composto possui uma resistência de oito a dez vezes maiores, com um quarto do peso, mantendo-se ambos na mesma espessura (SOUZA e RIPPER, 1998). Segundo Serra e Silva (2019) o composto de fibra de carbono apresenta algumas vantagens e desvantagens frente aos outros materiais, como:

- vantagens: a facilidade e a rapidez de instalação possuem uma grande resistência quando sofre em corrosão e agentes químicos, elevada resistência à fadiga;
- desvantagens: a incompatibilidade quando houver superfícies irregulares, quando exposta ao fogo ou a raios ultravioletas a fibra perde a resistência.

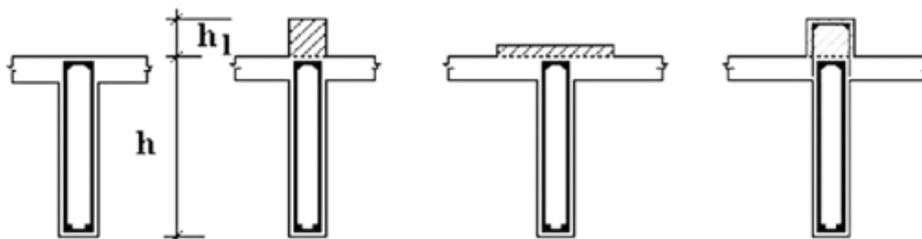
## 4.2 Reforços Estruturais

De acordo com Thomé (2017) na literatura existem diversos métodos para que se possam reforçar uma viga, principalmente quando sujeitas a esforço de flexão. Para que se possa escolher o método adequado, é necessário analisar alguns fatores a depender das

condições em que será utilizado, tipo de material empregado, dentre outros. Alguns desses métodos são:

(a) **Adição de área de concreto** - uma forma de se reforçar uma viga está no aumento da altura da seção transversal da viga, através da adição de concreto na face superior da viga (Figura 41), aumentando o braço da alavanca do momento, e assim sua capacidade portante (SOUZA e RIPPER, 1998)

**Figura 41** - Reforço de viga por aumento de altura.



Fonte: Souza e Ripper (1998).

(b) **Aumento da área de aço** – também conhecido por encamisamento, neste caso, a técnica de reforço está na adição de barras “armadura” suplementar (Figura 42), antes de iniciar o reforço da viga, nesta técnica a viga deverá estar escorada de forma correta (THOMAZ, 1989 apud THOMÉ, 2017).

**Figura 42** - Reforço de viga com concreto e armaduras suplementares.



Fonte: Adaptado de Camargo (2013) por Mariano (2015).

Segundo Mariano (2015) esta técnica apresenta as seguintes vantagens e desvantagens:

- não necessita de mão de obra especializada;
- facilidade na aquisição dos materiais (fôrma, concreto e armação), próximo às obras;
- permite a execução com a edificação em uso sem necessidade de demolição da estrutura existente.
- perda de área livre devido ao aumento da seção das peças;
- aumento considerável do peso da estrutura sendo um problema, principalmente, para estruturas elevadas;
- consumo excessivo de materiais e mão de obra;
- grande mobilização de equipamentos como fôrmas, escoramentos e equipamentos de transportes.

(c) **Colagem de chapas metálicas** - neste caso realiza-se a colagem de chapas de aço na viga utilizando resina epóxi, trata-se de uma metodologia muito eficiente quando bem aplicada, porém tem-se um aumento da rigidez do elemento como aspecto negativo (Figura 43). Trata-se de uma metodologia muito semelhante ao reforço com fibra de carbono, havendo muitos estudos relativos a esta técnica.

**Figura 43** - Reforço de viga com chapa metálica.



**Fonte:** adaptado de Aguiar (2014) por Mariano (2015).

Esta técnica apresenta as seguintes vantagens e desvantagens segundo Aguiar (2014) e Santos (2006) citados por Mariano (2015):

- facilidade de execução;
- aumento irrelevante na seção das peças estruturais, não comprometendo o espaço da área a ser recuperada;
- obra rápida e limpa, causando menor transtorno aos usuários;
- permite utilização parcial da edificação durante a obra.
- peso excessivo das chapas limitando a utilização para vãos maiores e o manuseio por parte da mão de obra;
- incorporação de grande peso à estrutura em relação a outros métodos;
- limitações decorrentes da temperatura;
- necessidade de aplicação de proteção contra incêndio e corrosão;
- dificuldade na detecção e localização de possíveis corrosões na ligação entre a chapa e o adesivo;

(d) **Reforço por protensão externa** - esta técnica consiste na aplicação de uma pós-tensão que é aplicada na estrutura como forma de sanar falhas de projeto, causas acidentais, e aumentar a capacidade portante da estrutura (Figura 44). O diferencial desta técnica perante as outras está no seu caráter ativo, não sendo necessário que haja deformação da viga para que se inicie o reforço. Neste tipo de reforço pode-se utilizar o aço, ou cabos constituídos por fibras sintéticas, embebidos em uma matriz polimérica, como por exemplo, a fibra de carbono, aramida (Kevlar) ou de vidro. (SOUZA & RIPPER, 1998)

**Figura 44** - Reforço de viga com protensão externa.



**Fonte:** adaptado de Vitório e Barros (2011) por Mariano (2015).

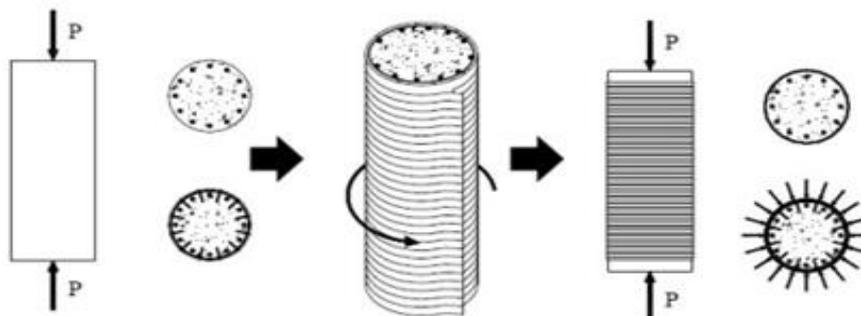
De acordo com Camargo (2013) apud Mariano (2015) as vantagens e desvantagens deste sistema são:

- relativa simplicidade do método construtivo;
- ausência de problemas com o cobrimento dos cabos;
- possibilidade de inspeção visual e eventual troca dos cabos durante a vida útil da estrutura;
- possibilidade, na maioria dos casos, da execução da reabilitação com a estrutura em uso;
- pouca ou nenhuma necessidade de demolições durante a obra;
- as perdas por atrito dos cabos externos são menores que as dos internos.
- necessidade de análise criteriosa, por parte do projetista, em função de fatores diversos como: possível falta de qualidade do concreto, para suportar as tensões necessárias.
- vulnerabilidade a atos de vandalismo, ação do fogo e corrosão eletroquímica, demandando necessidade de proteção do sistema;
- necessidade de mão de obra altamente qualificada para os serviços.

Na sequência o próximo método de reforço estrutural está baseado no uso de fibra de carbono em matriz epóxi. Neste caso, pode-se destacar algumas aplicações ou tipos de reforços existentes com este composto, sendo eles:

(a) **Reforço por confinamento do concreto** – neste caso, quando da necessidade de se reforçar pilares de concreto, é possível utilizar tecidos de fibra de carbono e matriz epóxi para envolver os pilares restringindo sua expansão lateral (Figura 45), mantendo assim sua integridade, minimizando a formação de fissuras, elevando a ductilidade e resistência. (LAU & ZHOU, 2001 e SUDANO, 2005 apud THOMÉ, 2017).

**Figura 45** - Representação esquemática de coluna reforçada com fibra de carbono.



**Fonte:** adaptado de Viapol por Thomé (2017).

As fibras empregadas na realização do confinamento devem estar orientadas transversalmente ao eixo longitudinal do elemento, de modo que as fibras atuem como estribos (Figura 46), assim as jaquetas de composto de carbono permanecerão sem tensão até que haja dilatação e fendilhamento. (MACHADO, 2015 apud THOMÉ, 2017)

**Figura 46** – Exemplo de coluna reforçada com fibra de carbono por confinamento.



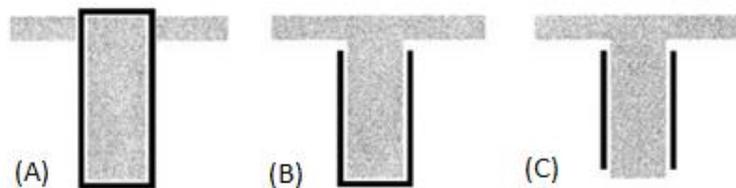
**Fonte:** Leal e Fagundes (2020).

(b) **Reforço ao esforço cortante (Cisalhamento)** - dos reforços de fibra de carbono existentes, este pode ser visto como o mais simples de se calcular, porém não se deve descuidar de sua aplicação. Neste, as fibras são dispostas transversalmente ao eixo da viga atuando como novos estribos, elevando assim a resistência aos esforços cortantes atuantes (THOMÉ, 2017).

Das configurações demonstradas na Figura 47, pode-se perceber que a configuração (A) é extremamente complicada de se executar, já que seria necessário romper parte da laje, gerando um grande prejuízo. A situação (C) somente deverá ser

aplicada caso não seja possível outra configuração, devido à impossibilidade de acesso as faces da viga. Assim a configuração ideal será a (B), pois envolverá a viga de forma eficiente, não acarretando prejuízos. (SILVA, CRUZ e AREDES, 2019)

**Figura 47** - Aplicações das mantas compósitas de epóxi com fibra de carbono como reforço ao esforço cortante.



**Fonte:** ACI 440.2R-08 (2008) por Thomé (2017)

É possível realizar o cálculo da área da fibra por unidade de comprimento, porém usualmente costuma-se em projetos definir o espaçamento entre as fibras (Figura 48), de modo a economizar tempo com detalhamento, já que a largura e a espessura das fibras já são definidas (THOMÉ, 2017)

**Figura 48** – Exemplo de coluna reforçada com fibra de carbono por esforço cortante.



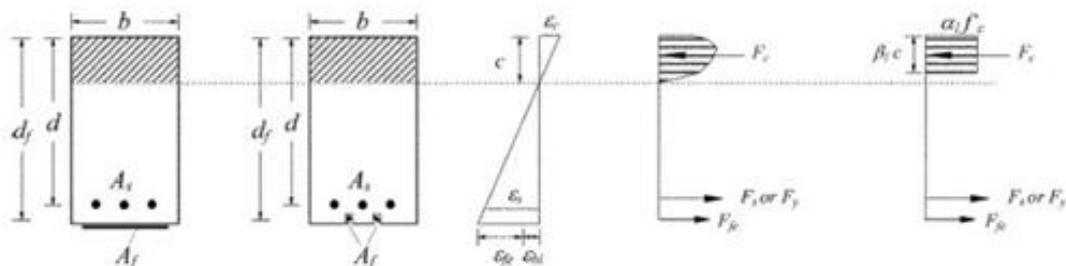
**Fonte:** Leal e Fagundes (2020)

(c) **Reforço em vigas submetidas à flexão** - neste tipo de reforço utilizam-se lâminas e tecidos de fibra de carbono, sendo as recomendações de projeto baseadas no estado limite último, assim o seu dimensionamento seguirá os seguintes passos:

- deve-se atribuir a profundidade da linha neutra ( $c$ ) em conformidade com o modo de ruptura;
- realizam-se os cálculos das deformações dos diversos materiais reconhecendo a linearidade da variação das mesmas;
- após identificar as deformações devem-se calcular as tensões atuantes nos materiais presentes;
- após conhecer as forças atuantes, realizam-se as verificações do equilíbrio delas. Caso o momento resistente presente no sistema reforçado for superior ao momento solicitante máximo de cálculo (resistência necessária e economia) esta etapa deverá ser repetida quantas vezes for necessário para a consecução desses objetivos.
- uma vez concluído o processo iterativo faz-se a verificação da ductilidade do sistema FRP.

Na Figura 49 está contido o diagrama de deformações e resultantes para estruturas sujeitas a este tipo de esforço, segundo a ACI 440:2R-08 citada na obra de Thomé (2017).

**Figura 49** - Diagrama de deformações e resultantes de uma viga reforçada com compósitos de fibra de carbono.



**Fonte:** adaptado de ACI 440:2R-08 (2008) por Thomé (2017).

Segundo Machado (2010) o reforço deverá se basear nas premissas de Bernoulli, de modo que as seções planas deverão permanecer assim após os carregamentos, e as deformações sejam linearmente proporcionais à distância da linha neutra (Figura 50).

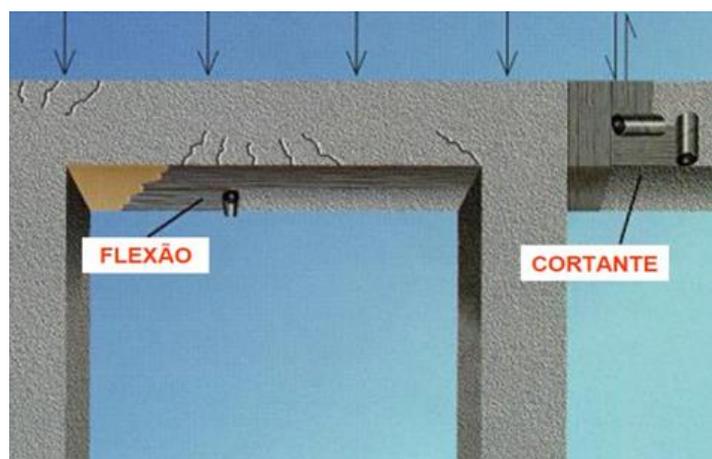
**Figura 50** - Reforços em fibra de carbono para o acréscimo de resistência de vigas para flexão e força cortante.



Fonte: Site Velame<sup>11</sup>

Para que se possa realizar o reforço de vigas a flexão, o reforço deverá estar posicionado nas fibras superiores e inferiores conforme os momentos fletores positivo e negativo (Figura 51), enquanto para esforços de cisalhamento as lâminas de fibras estarão dispostas verticalmente ou inclinadas paralelamente às tensões de tração (OLIVEIRA, *et al*, 2014).

**Figura 51** - Reforço de uma estrutura a esforço de flexão e a esforço de tração.

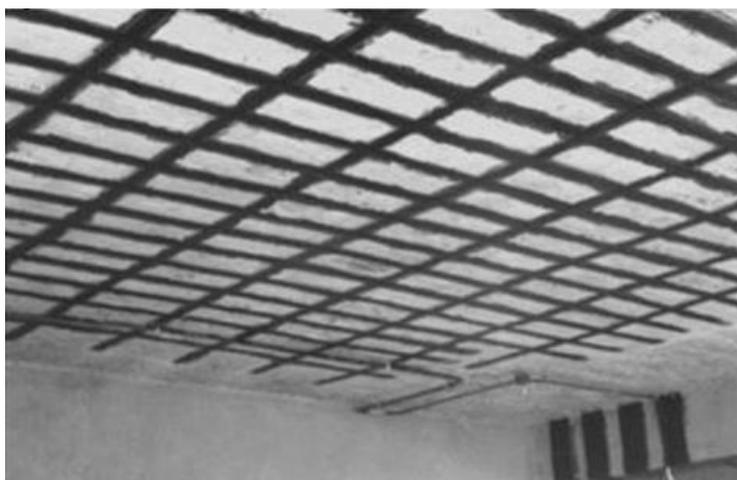


Fonte: adaptado de Machado (2013) por Oliveira *et al.* (2014).

De acordo com Oliveira *et al.* (2014) os reforços de fibra de carbono também podem ser aplicados em lajes para elevar a resistência perante os esforços de flexão gerados pelos carregamentos na estrutura, conforme demonstrado na Figura 52.

<sup>11</sup> Website Velame. Reforço Estrutural com Fibra de Carbono. Disponível em: ([Reforço Estrutural... – Velame Engenharia](#)), acesso: 15.12.2020

**Figura 52** - Reforço de laje a flexão.



**Fonte:** adaptado de Machado (2013) por Oliveira *et al.* (2014).

Em relação às emendas de lâminas de composto de fibra de carbono (Figura 53), estas muitas vezes são necessárias a depender da dimensão e geometria das peças, ou então da facilidade da aplicação na estrutura. Neste caso, o indicado é que a lâmina a ser sobreposta transpasse um comprimento mínimo de 50 mm longitudinalmente, porém a experiência dos profissionais da área tem demonstrado que um valor maior e indicado para que se evitem erros de posicionamento, e para compensar a ondulação da superfície do concreto onde será aplicado (VIAPOL apud THOMÉ, 2017).

**Figura 53** - Emenda por transpasse (a) e justaposição lateral (b).



**Fonte:** Thomé (2017).

Segundo pesquisa realizada por Mariano (2015) nas obras de Almeida (2001), Santos (2006) e Aguiar (2014) é possível levantar as seguintes vantagens e desvantagens no uso de compósitos de epóxi com fibra de carbono, sendo:

- leveza e facilidade de manuseio;
- grande resistência a ataques químicos;

- a manta de carbono resiste a temperaturas em torno de 1000°C;
- execução do trabalho de forma limpa não necessitando de fôrmas e escoramentos;
- baixo coeficiente de expansão térmica, na fibra de carbono este coeficiente é 50 vezes menor que o do aço;
- adaptação às diversas formas da peça a ser reforçada;
- necessidade de proteção devido à vulnerabilidade a acidentes e ao vandalismo;
- necessidade de proteção contra fogo e raios ultravioletas. Apesar da fibra de carbono suportar altas temperaturas as resinas suportam temperaturas da ordem de 60°C;
- dificuldade de aplicação em superfícies irregulares.

Segundo Viana (2004) apud Plácido (2014), as seguintes desvantagens devem ser consideradas quando da utilização de compósitos de fibra de carbono:

- difícil visualização de fissuras na interface substrato/reforço, sendo o reforço contínuo;
- custo elevado;
- de mal executada a ancoragem do compósito no elemento estrutural, pode acarretar o descolamento dos bordos devido à concentração de tensões;
- necessidade de proteção contra o fogo e raios ultravioletas;
- possui coeficiente de dilatação térmica diferente do concreto;

### **4.3 Recomendações para Aplicação de Compósitos de Fibra de Carbono**

Quando for realizar a aplicação dos compostos de fibra de carbono, existem algumas etapas que precisam ser realizadas, com a finalidade de se assegurar uma aplicação eficiente capaz de garantir o desempenho esperado do reforço na estrutura. Assim, ao consultar as obras de Santos (2013), Fontes e Cunha (2017) e Silva Cruz e Aredes (2019) identificou-se as etapas que serão descritas nas próximas seções.

### 4.3.1 Recuperação e Preparo da Superfície

O *American Concrete Institute* - ACI (2003) especifica que o reforço com polímeros não deve ser aplicado em elementos onde há suspeita de corrosão da armadura. Segundo o ACI (2003), o comportamento dos elementos de concreto reforçados com polímeros é também muito dependente de uma correta preparação da superfície de concreto.

É necessária a remoção do concreto desagregado junto às armaduras corroídas, regularizar o perímetro do trecho de substrato a ser recomposto, limpar as barras da armadura, passivar e recompor o substrato do concreto, conforme mostra a Figura 54 (MACHADO, 2002).

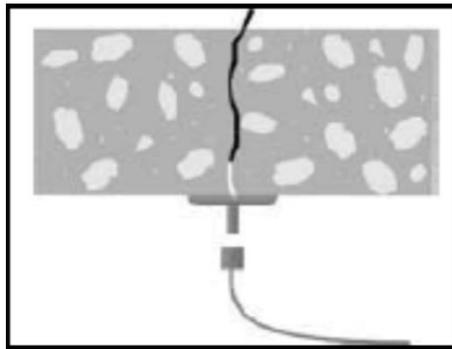
**Figura 54** - Remoção da superfície desagregada.



Fonte: Machado (2002).

Também muito comum é a presença de fissuras e trincas. Fissuras com abertura maior que 0,25 mm também deverão ser tratadas (MACHADO, 2002). O movimento das fissuras pode comprometer o desempenho do reforço externo por conta da possibilidade de deslocamento ou esmagamento das suas fibras (ACI, 2003).

A forma de tratamento pode ser a convencional com a injeção sob pressão de epóxi, sendo que fissuras menores que 0,25 mm expostas ao meio ambiente podem exigir resinas ou seladores para prevenir futura corrosão da armadura da peça. Na Figura 55 está apresentado o processo de preenchimento da fissura.

**Figura 55** - Injeção de fissuras

Fonte: Machado (2002).

Quanto ao preparo da superfície do concreto, inicialmente deve-se realizar a limpeza da superfície onde o sistema deverá ser aderido, para isto utiliza-se abrasivos, jatos de areia ou limalhas metálicas (Figura 56). Importante aqui certificar-se de remover a poeira, as substâncias oleosas e graxas, as partículas sólidas, os recobrimentos como pintura e argamassas, ficando aqui expostos todos os nichos ou imperfeições existentes na superfície (SANTOS, 2008; FONTES e CUNHA, 2017).

**Figura 56** – (a) Lixamento de superfície de concreto e (b) limpeza da superfície de concreto.

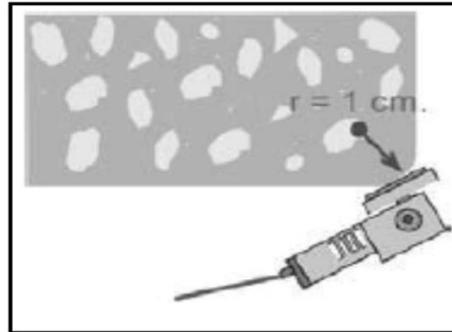
Fonte: adaptado de Beber (2003).

Segundo Machado (2002) as aplicações com o objetivo de reforço para os esforços de flexão e de cisalhamento em vigas, lajes e pilares, exigem uma colagem eficiente e eficaz para que ocorra a transferência de esforços entre os meios, caracterizando a condição crítica de colagem. Já o confinamento de colunas, exige uma condição de contato eficiente entre o concreto e o sistema composto, caracterizando a condição de contato íntimo.

Caso o reforço venha a requerer o recobrimento de mais de uma superfície lateral da peça, são necessários que se arredondem as quinas envolvidas (Figura 57), de modo a minimizar as tensões na fibra de carbono, e elimina os vazios entre o concreto e o sistema.

Caso o elemento estrutural esteja deteriorado, torna-se necessária a realização de uma restauração, adequando a superfície, para que somente após se inicie o reforço (SANTOS, 2008 e MACHADO, 2002).

**Figura 57** - Arredondamento dos cantos vivos.



Fonte: Adaptado de MACHADO (2002).

De acordo com Machado (2002) ao término da limpeza, toda a superfície deve estar limpa e seca, sem umidade intersticial. Uma vez que a presença de água pode inibir a penetração das resinas e reduzir drasticamente a eficiência da ponte de aderência necessária. No caso do contato crítico, nas situações que envolvam o confinamento das peças de concreto armado, a superfície deve ser preparada no sentido em que seja estabelecido um contato íntimo e contínuo entre as superfícies envolvidas. Essas superfícies não podem apresentar concavidades ou convexidades que impeçam o carregamento correto do sistema composto (MACHADO, 2002).

#### **4.3.2 Processo de Aplicação da Fibra de Carbono no Concreto**

Para que a fibra seja aplicada na estrutura, o sistema de reforço com fibra de carbono é constituído por cinco elementos:

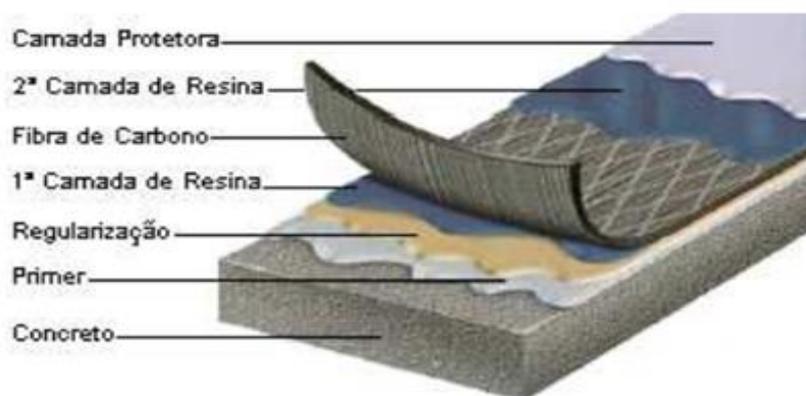
- primer epóxico - sistema epóxico com 100% de sólidos, baixa viscosidade, necessário para uma ancoragem físico/química com os poros da superfície do concreto, estabelecendo uma base estável à aplicação da argamassa e do epóxi estruturante;
- massa epóxica de correção - argamassa especialmente formulada para correção de superfícies antes da aplicação do epóxi estruturante. Aplicável com espátula

ou desempenadeira de aço, permite corrigir protuberâncias deixando a superfície própria para a aplicação da fibra de carbono;

- adesivo epóxico estruturante - potente adesivo epóxi usado para servir de matriz à fibra de carbono. O sistema de fibra de carbono assim formado constitui um compósito de altíssima resistência à tração, superior em qualidade a todas as formas de reforço estrutural até então existentes;
- fibra de carbono - o sistema de reforço com fibra de carbono é composto por dois tipos de fibra de carbono: o MFC 130 e o MFC 530 que, uma vez envolvidos na matriz epóxica estruturante, promovem uma série de vantagens sobre os sistemas convencionais de reforço;
- camada de proteção ou estética - Terminada a aplicação da fibra de carbono pode ser aplicada uma camada de proteção a radiação UV ou estética, tal como uma tinta acrílica de acabamento disponível em diversas cores e texturas(SANTOS, 2008 e FONTES e CUNHA, 2017).

Na Figura 58 estão as partes que compõe um elemento de concreto reforçado com fibras de carbono.

**Figura 58** - Sistemas compostos com fibra de carbono.

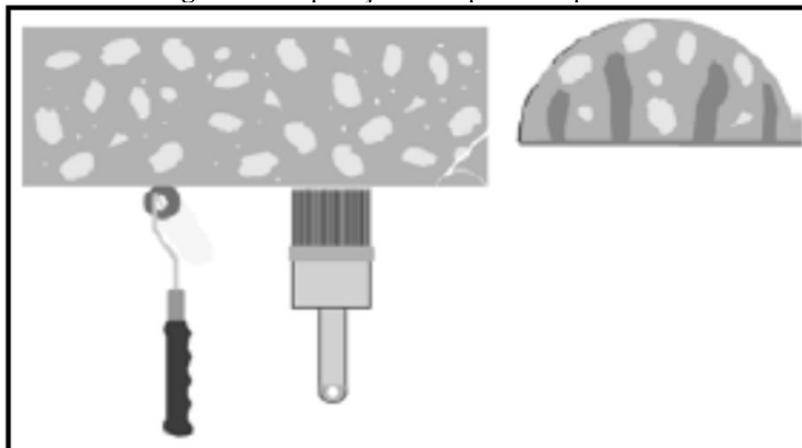


**Fonte:** adaptado de Rodrigues (2002) por Santos (2008)

A partir da obra de Machado (2002), as etapas são descritas resumidamente a seguir:

**1º Etapa - Imprimador Primário – Primer** - Imprimador primário tem o objetivo de penetrar os poros do concreto, os preenchendo para estabelecer uma ponte de aderência entre o concreto e o sistema composto, como ilustrado na Figura 59.

**Figura 59** - Aplicação do imprimador primário.



Fonte: Machado (2002).

**2º Etapa - Regularizador de Superfície** - Segundo Machado (2002), as massas regularizadoras de superfície são utilizadas para a calafetação e/ou regularização das superfícies de concreto onde serão aplicados os sistemas, garantindo uma superfície desempenada contínua. As superfícies não necessariamente precisam estar alinhadas horizontalmente, admitindo-se alguma ondulação residual sem que ocorram riscos de diminuição da eficiência do sistema.

**3º Etapa - Corte e Imprimação das Fibras de Carbono** - Os cortes das lâminas são realizados previamente, com a utilização de tesoura de aço, régua metálica e faca de corte ou estilete. Deverão ser identificadas de acordo com o projeto. Após aderindo nas peças a serem reforçadas. Existem duas maneiras distintas para se executar esse procedimento, sendo a saturação via úmida e a saturação via seca (MACHADO, 2002).

**4º Etapa - Saturação Via Úmida** - A lâmina é saturada em uma bancada, sendo transportada para a sua aplicação na peça a ser reforçada, conforme Figura 60. É limitado no comprimento da lâmina a ser transportada, da ordem de 3,5 a 4,0 metros.

**Figura 60** - Saturação da fibra na bancada.

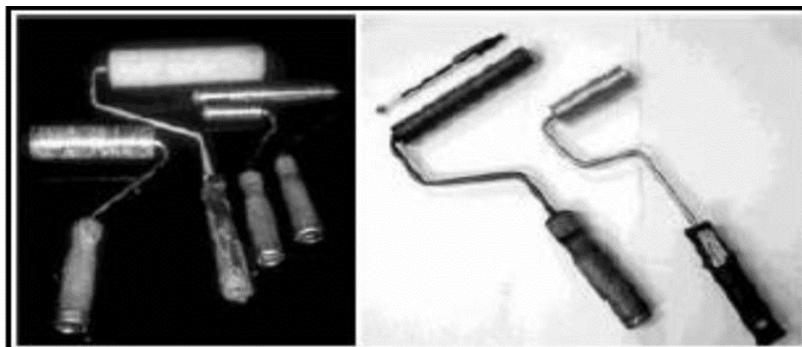


Fonte: Machado (2002).

**5° Etapa Saturação Via Seca** - A saturação é feita diretamente na peça a ser reforçada e em seguida ser colada a lâmina de fibra de carbono.

**6° Etapa – Aplicação da Lâmina** - As ferramentas utilizadas para a aplicação da fibra de carbono são de uso comum, consistem em rolos de espuma para espalhar tanto os imprimantes como os saturantes e rolos metálicos que promovem o alinhamento das fibras e a rolagem das bolhas de ar que podem ocorrer (Figura 61).

**Figura 61** - Ferramental utilizado para aplicação.



Fonte: Machado (2002).

Independentemente do tipo de imprimação utilizado, a colocação da lâmina tem que ser imediata. Uma vez que o tempo de aplicação da resina saturante (*pot-life*) é muito curto, no máximo 25 a 30 minutos (MACHADO, 2002). Dentro desses minutos é possível fazer o ajuste e alinhamento da fibra de carbono para posicionamento correto.

Com relação ao alinhamento da fibra de carbono o *American Concrete Institute* (2003) estabelece quando da aplicação das lâminas que se observe visualmente a orientação das fibras de carbono de modo a que não se permita a ocorrência de ondulações ou desvios de direção maior que um desvio máximo de 5° (87 mm/m) da direção especificada no projeto. Qualquer desvio que exceda esse limite deve ser comunicado ao engenheiro projetista.

Após a aplicação da lâmina de fibra de carbono é executado imediatamente o procedimento chamado “rolagem das bolhas de ar”, com a utilização de pequenos roletes de aço denteado que “empurram” as bolhas de ar até as extremidades das lâminas, como mostrado na Figura 62.

**Figura 62** - Rolagem das bolhas de ar.



Fonte: Machado (2002)

**7º Etapa - Segunda Camada de Saturação** - Terminado o posicionamento da fibra de carbono, inicia-se a aplicação da segunda camada de saturação sobre a lâmina, garantindo a total cobertura/imersão da mesma. Normalmente aguarda-se por volta de 30 minutos para essa segunda saturação (MACHADO, 2002). Variações de tempo podem ocorrer.

Convém ressaltar que cada lâmina exige duas imprimações independentes, não podendo a última camada de imprimação de a lâmina anterior ser utilizada para a colocação da próxima lâmina (MACHADO, 2002).

O reforço com tecido utilizado na posição vertical e espaçado tem como finalidade reforçar os estribos e reforçar os esforços de cisalhamento, já o reforço com laminados de carbono, colados na face inferior da viga, com a finalidade de reforçar os esforços solicitantes de flexão, conforme Figura 63.

**Figura 63** – Reforço com laminado de fibra de carbono e reforço com tecido de fibra de carbono.



**Fonte:** Autor.

**8º Etapa - Revestimento Estético e/ou Protetor** - Para um bom acabamento, alguns sistemas compostos disponibilizam revestimentos especiais com diversas cores e texturas. Entretanto, o revestimento deve ser projetado para atender condições específicas de agressões físicas, mecânicas e ambientais. Neste caso deixa de ser estético e passar a ter uma finalidade de proteção mecânica e química do sistema composto.

## 5. Programa Experimental e Metodologia

O principal objetivo do programa experimental foi a realização de ensaios de flexão em vigas de concreto para mensurar o desempenho de vigas reforçadas com compósitos de fibra de carbono frente a outros sistemas.

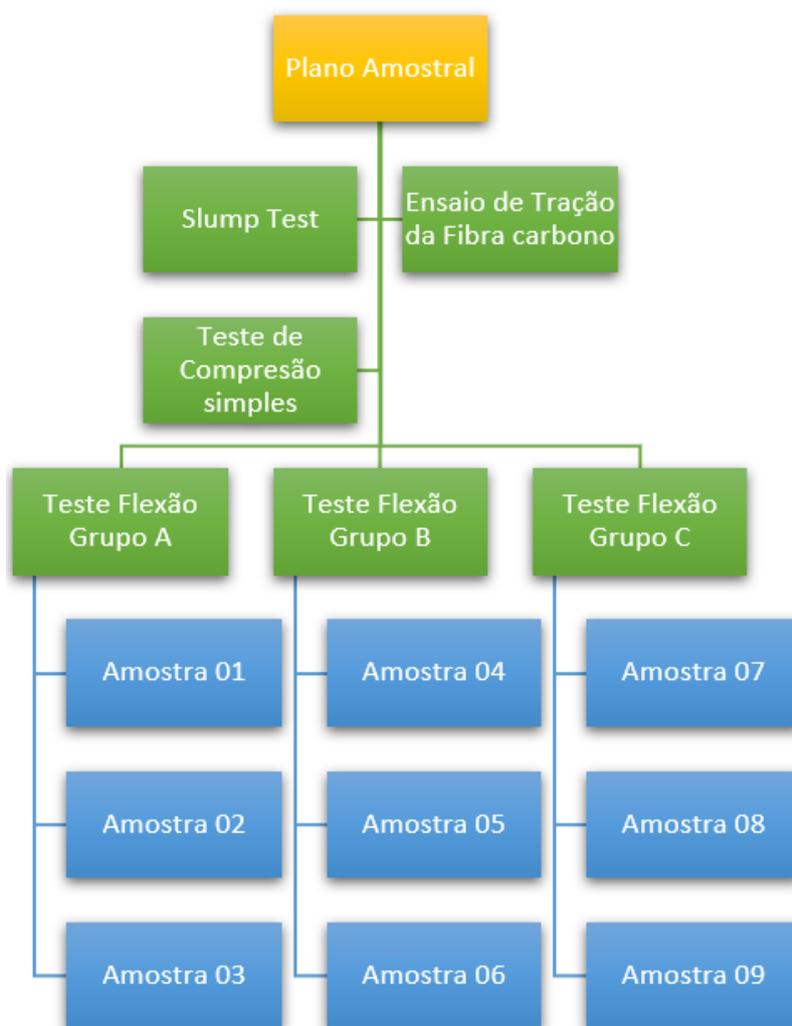
Na Figura 64 é possível visualizar o plano amostral que foi desenvolvido neste trabalho. Foram confeccionadas um total de 09 amostras, que foram divididas em três grupos específico, sendo cada grupo:

(a) **Grupo A** – Placas em concreto sem nenhuma armação de aço. Recebeu um reforço através da colagem com uma camada de tecido de fibra de carbono aderido na face inferior da viga, com utilização de resina epóxidica, sujeitas a esforços à flexão. As vigas reforçadas sob carregamento teoricamente constante, pré-tensionadas e posteriormente levadas à ruptura.

(b) **Grupo B** – Placas em concreto armado com tela de aço soldada malha 20 x 20 cm, diâmetro 4,2 mm. As vigas reforçadas sob carregamento teoricamente constante, pré-tensionadas e posteriormente levadas à ruptura.

(c) **Grupo C** – Placas de referência em concreto, sem reforço, foi utilizada como viga de referência para possibilitar as comparações de incremento de resistência e rigidez após o reforço. Esta viga padrão foi levada à ruptura, que se deu por flexão com ruptura na região de momento máximo positivo.

Na Tabela 16 é possível identificar a composição de cada grupo amostral a ser empregado neste trabalho, possibilitando sua melhor identificação no decorrer do trabalho.

**Figura 64** – Planejamento dos ensaios.

Fonte: autor

**Tabela 15** - Relação das amostras empregadas no trabalho.

	<b>Grupo A</b>	<b>Grupo B</b>	<b>Grupo C</b>	
Fator	Placas reforçadas com PRFC	Placas de concreto armado	Placas de concreto sem nenhum reforço	
Amostras – código	Amostra 01 PL01	Amostra 04 PL04	Amostra 07 PL07	
	Amostra 02 PL02	Amostra 05 PL05	Amostra 08 PL08	
	Amostra 03 PL03	Amostra 06 PL06	Amostra 09 PL09	
	Possui armação concreto?	NÃO	SIM	NÃO
	Possui tecido de fibra de carbono?	SIM	NÃO	NÃO

Fonte: Autor

Todas as amostras foram produzidas em um único lote através do uso de uma betoneira, sendo retiradas amostras para realização do *Slump Test* (abatimento no tronco cone). Posteriormente a massa de concreto foi injetada nos moldes, sendo submetidas a um processo de cura de 28 dias (Tabela 16). Em sequência as amostras cilíndricas foram sujeitas aos testes de compressão simples, enquanto as amostras do grupo A, grupo B e grupo C foram preparadas para a realização dos testes de flexão. Para a realização destes experimentos, os procedimentos e as especificações para condução do estudo se basearam nas normas descritas na Tabela 17.

**Tabela 16** - Processo de preparação das amostras para os testes experimentais.

<i>Slump Test</i>		Realizado o <i>Slump Test</i> no dia que a massa foi feita.		
<b>Ensaio de tração</b>		Para a caracterização da fibra de carbono empregada no reforço.		
<b>Etapas</b>		Etapa 01	Etapa 02	Etapa 03
<b>Geometrias</b>	<b>Tempo de Cura</b>	<b>Aplicação da resina e manta</b>		<b>Teste Realizado</b>
Corpos-de-prova cilíndricos	28 dias	-----		Compressão
Placas - Grupo A	28 dias	-----		Flexão
Placas - Grupo B	28 dias	-----		Flexão
Placas - Grupo C	28 dias	Com 14 dias, foi aplicado o reforço de fibra de carbono		Flexão

**Fonte:** Autor

**Tabela 17** - Normas empregadas na condução da parte experimental.

<b>Norma</b>	<b>Especificação</b>
ABNT NBR NM-67 - 1998	Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone
ABNT NBR 12655 - 2006	Concreto de cimento Portland - Preparo controle e recebimento - Procedimento
NBR NM – ISO 3310 – 1 de 1997	Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação
ABNT NBR 6118 de 2014	Projeto de estruturas de concreto — Procedimento
ABNT NBR 6118 de 2014	Projeto de estruturas de concreto — Procedimento
ABNT NBR 5738 de 2015	Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova
ABNT NBR 5739 de 2007	Concretos - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos

**Fonte:** Autor

## 5.1 Materiais e Dosagem do Concreto

O concreto utilizado nas placas foi projetado para alcançar uma resistência característica à compressão de 25 MPa, produzido com traço, em massa de 1,0: 2,02: 3,28, constituídos de cimento, agregado miúdo e agregado graúdo. O fator água/cimento utilizado no traço foi de 0,63. Este concreto foi produzido sem uso de aditivo plastificante, com a finalidade de não alterar as características do concreto, além de proporcionar a qualquer pessoa a sua reprodução.

### 5.1.1 Dosagem do Concreto e Constituição do Traço

Para dosagem do concreto, não se utiliza diretamente o valor da resistência em  $F_{ck}$ , mas sim em  $F_{cj}$ , que é a resistência média do concreto à compressão, para determinar esse fator é necessário que se utilize a seguinte Equação 1 (ABNT NBR 12655:2006):

$$F_{cj} = F_{ck} + 1,65 * S_d \quad (1)$$

sendo:

$F_{cj}$  a resistência média do concreto à compressão

$F_{ck}$  a resistência característica do concreto à compressão

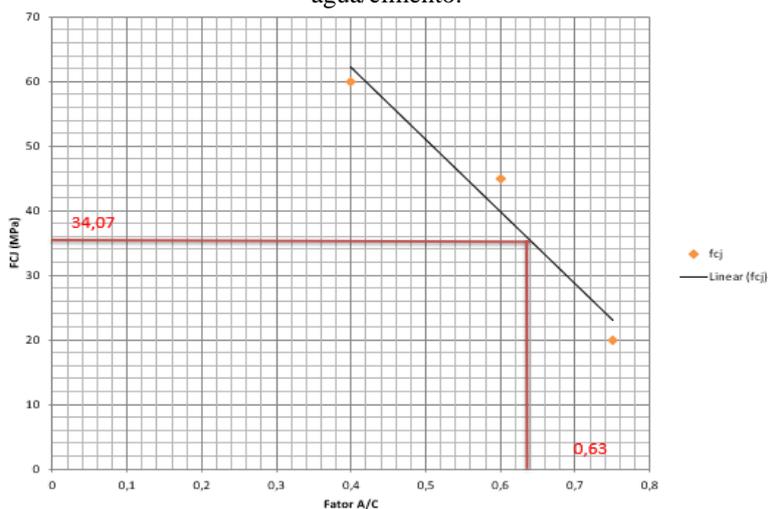
$S_d$  o desvio padrão de dosagem, em MPa

Como o desvio padrão de dosagem não era conhecido, foi preciso atender as condições estabelecidas para casos em que os materiais sejam medidos em volume ou em peso e quando se tem uma correção de acordo com o teor de umidade dos agregados, o valor do desvio padrão a ser adotado poderá ser de 5,5 MPa (ABNT NBR 12655:2006). Portanto, aplicando a equação mencionada acima, pode-se obter o seguinte resultado:

$$F_{cj} = 25 \text{ Mpa} + 1,65 * 5,5 \text{ Mpa} = 34,07 \text{ Mpa} \quad (2)$$

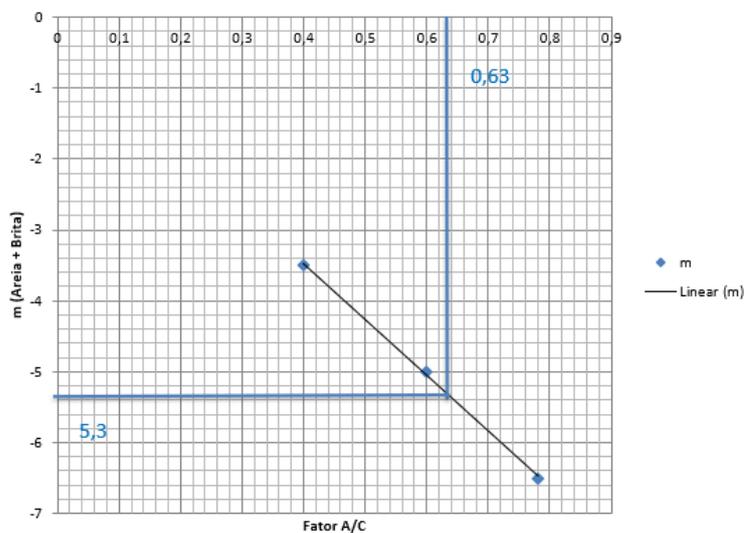
Com o valor da resistência média obtida foi utilizado o diagrama de dosagem para determinar os valores da relação água/cimento (a/c) e da relação massa seca/cimento (m), conforme o método IPT-EPUSP, conforme a Figura 65 e Figura 66.

**Figura 65** - Diagrama de dosagem com base no método IPT-EPUSP – quadrante  $f_{cj}$  x relação água/cimento.



Fonte: Autor (Arquivo Pessoal)

**Figura 66** - Diagrama de dosagem com base no método IPT-EPUSP – quadrante relação água/cimento x m (areia + brita).



Fonte: Autor (Arquivo Pessoal)

Com isso foi determinado que a relação água/cimento fosse de 0,63 e a relação massa seca/cimento fosse igual a 5,3. Foi determinado também o valor do teor de argamassa, sendo considerado um teor de 48%, procurando-se obter uma boa trabalhabilidade do concreto. Com isso, podem-se definir quais os traços para os agregados, iniciando-se pelo traço da areia (a), segundo a equação:

$$a = (\alpha * (1 + m)) - 1 \quad (03)$$

sendo:

$a$  a areia

$\alpha$  o teor de argamassa

$m$  a relação massa seca/cimento

Adotando-se a equação acima, foi possível obter o seguinte valor:

$$a = (0,48 * (1 + 5,3)) - 1 = 2,02 \quad (04)$$

Portanto, tendo  $m = \text{Areia} + \text{Brita}$ , temos que:

$$b = m - a$$

$$b = 5,3 - 2,02 = 3,28 \quad (05)$$

Assim foi determinado o traço para dosagem do concreto, em relação para 1 parte de cimento, seja em peso ou em volume, conforme Tabela 18.

**Tabela 18** – Constituição do traço.

<b>Traço Final</b>			
Cimento:	Areia:	Brita:	Relação Água/Cimento
1	2,024	3,276	0,63

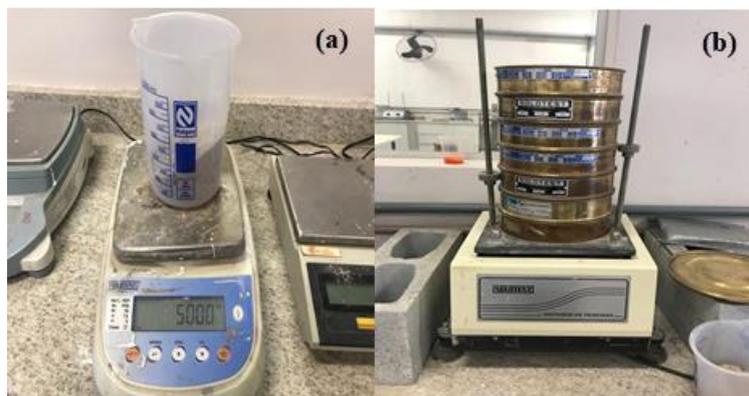
**Fonte:** Autor

O cimento empregado no preparo do concreto foi do tipo CP-II-F, da marca Votorantin Cimentos. Os sacos de cimento foram utilizados do mesmo lote de fabricação, com a finalidade de evitar diferença nos resultados.

### 5.1.2 Agregados

O agregado miúdo utilizado foi à areia de rio do tipo ensacada por depósito. Para determinação da composição granulométrica dos agregados, foi utilizada a norma NBR NM – ISO 3310 – 1 de 2010, os grãos de areia, foram separados através do uso de um agitador de peneiras e pesados numa balança de precisão digital, 500 gramas para ensaio, conforme Figura 67.

**Figura 67** - (a) Pesagem do agregado miúdo: areia e (b) agitador de peneiras utilizadas na separação do agregado miúdo: areia.



**Fonte:** autor

Após a seleção e pesagem dos agregados miúdos os resultados obtidos são apresentados na Tabela 19, após passagem dos grãos pelas peneiras da série normal.

**Tabela 19** - Composição granulométrica do agregado miúdo.

Composição granulométrica: areia – peso total da amostra 500,00 gramas			
Abertura da Peneira (mm)	% Retido Acumulado	% Retido	Massa retida por peneira (gr)
4,75mm	0,96	0,96	4,80
2,36mm	5,48	4,52	22,60
1,18mm	16,36	10,88	54,40
0,60mm	43,68	27,32	136,60
0,30mm	77,59	33,91	169,50
0,15mm	94,87	17,28	86,40
Fundo	100,00	5,12	25,60
Total		100,00	499,90

Módulo de Finura: 2,39

**Fonte:** autor

Quanto ao agregado graúdo, este foi de basalto britado número 0, destinado a moldagem e concretagem das vigas, de acordo com a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) de 10 cm, com dimensão máxima característica de 9,5 mm, que atende à dimensão máxima característica do agregado graúdo utilizado no concreto, não superando em 20% a espessura nominal do cobrimento, como estabelecido na norma NBR 6118 (ABNT, 2014), conforme Tabela 20.

**Tabela 20** - Composição granulométrica do agregado graúdo: brita 0 (zero).  
**Composição granulométrica: brita: 0 – peso total da amostra 1.000,00 gramas**

Abertura da Peneira (mm)	% Retido Acumulado	% Retido	Massa retida por peneira (gr)
19,00mm	0,00	0,00	0,00
12,50mm	0,53	0,53	5,30
9,50mm	15,74	15,21	152,00
6,30mm	86,76	71,02	709,90
4,75mm	95,67	8,91	89,10
2,36mm	98,95	3,28	32,80
1,18mm	99,07	0,12	1,20
0,60mm	99,08	0,01	0,10
0,30mm	99,09	0,01	0,10
0,15mm	99,21	0,12	1,20
Fundo	100,00	0,79	7,90
Total		100,00	999,60

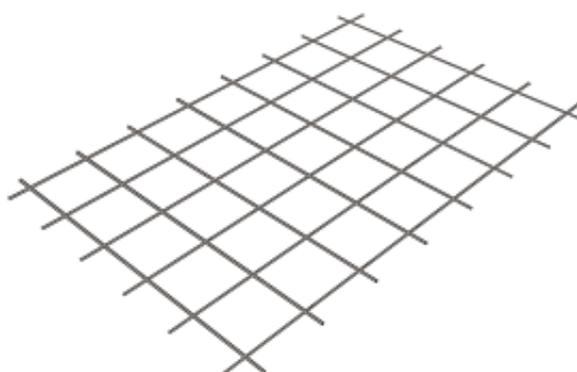
Módulo de Finura: 6,94

**Fonte:** autor

### 5.1.3 Armadura de Aço

Neste caso, para a confecção das amostras do grupo B foram utilizadas armaduras de tela de aço soldada, com malha 20x20cm, e diâmetro da barra de 4,2mm, conforme a imagem da Figura 68.

**Figura 68** - Exemplo de tela de aço com malha de 20 x 20 cm.



**Fonte:** Site Gerdal<sup>12</sup>

<sup>12</sup> Website Gerdal. Disponível em: (<https://www2.gerdau.com.br/produtos/telas-gerdau>), acesso: 15.12.2020

### 5.1.4 Tecido de Fibra de Carbono

No Grupo C foi realizado um reforço a partir de um compósito de fibra de carbono com matriz epóxi. Em relação ao tecido empregado neste composto trata-se de um tecido de fibra de carbono MC-*Carbon Fiber* fornecido pela empresa MC-Bauchemie do Brasil, conforme Figura 69. Os principais dados técnicos do tecido são:

- peso próprio: 300 g/m<sup>2</sup>
- largura: 500 mm
- seção transversal da fibra: 0,166 mm
- alongamento na ruptura: 2,1% (manta não impregnada)
- resistência à tração: 3600 MPa (manta não impregnada)
- módulo de deformação: 230 GPa (NBR 8522:2008)

**Figura 69** - Tecido com PRFC.

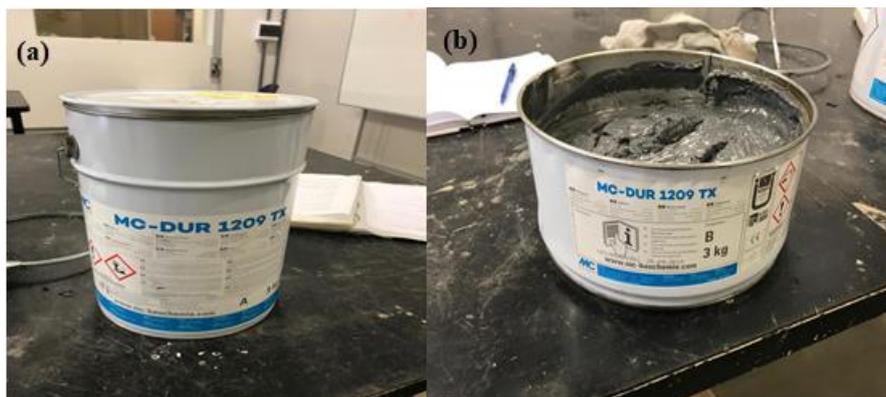


**Fonte:** autor

### 5.1.5 Resina Epoxídica

Em se tratando da resina epóxi empregada para confecção do reforço, neste caso empregou-se adesivos químicos da Empresa MC Bauchemie do tipo MC-Solid MC-DUR 1209 TX (antigo MC-DUR 1300 TX). Vale ressaltar que nestas amostras não foi empregada a resina de imprimação e a argamassa de regularização, não sendo necessária sua utilização (Figura 70).

**Figura 70** - Resina epoxídica – (a) Componente A e (b) Componente B.



Fonte: autor

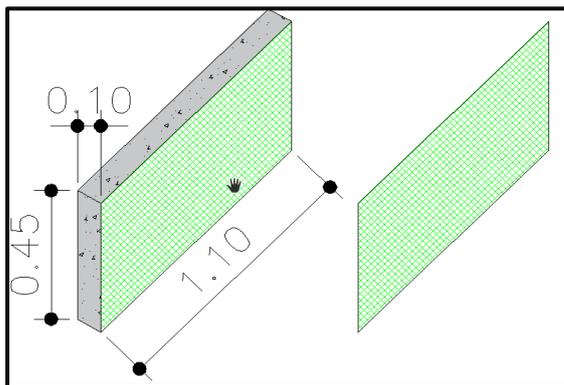
A seguir são apresentadas as características e dados técnicos do adesivo:

- densidade: 1,80 kg/L (NBR 13278:2005)
- consumo: 0,8 – 1,0 kg/m<sup>2</sup> (dependendo da rugosidade do substrato)
- resistência à compressão:  $\geq 60$  MPa 7 dias (NBR 7215:1996)
- aderência:  $\geq 10$  MPa (NBR 14050:1998)
- condições de aplicação:  $\geq 8 \leq 40^\circ\text{C}$
- temperatura do ar e do substrato:  $\geq 15 \leq 25^\circ\text{C}$
- temperatura do material:  $\leq 85\%$
- umidade Relativa:  $3^\circ\text{C}$  (substrato com temperatura acima do ponto de orvalho)

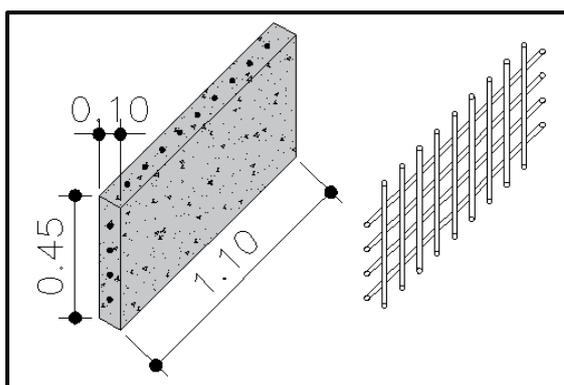
## 5.2 Confeção dos Corpos-de-Prova

Em relação à confecção dos corpos-de-prova para os testes de flexão relacionados as amostras do grupo A, grupo B e grupo C, estas foram dimensionadas e elaboradas seguindo critérios técnicos exigidos pela NBR 6118 de 2014 nas dimensões de 10 cm de espessura, 45 cm de largura e 110 cm de comprimento, adotou-se este padrão de dimensionamento das placas, com a finalidade de elevar e destacar o reforço de fibra de carbono, de conforme apresentado nos esquemas da Figura 71.

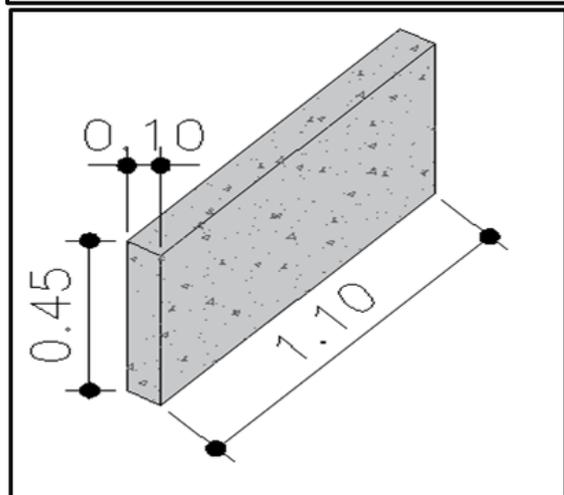
**Figura 71** - Esquemas com as dimensões dos corpos de prova das amostras para teste de flexão.



Grupo A - Placa com reforço com 01 camada de PRFC



Grupo B - Placa em concreto armado com tela de aço



Grupo C - Placa em concreto - sem reforço

**Fonte:** autor

Todas as placas foram moldadas empregando moldes de madeira conforme apresentado na Figura 72, foram aplicados desmoldantes nos moldes para facilitar a retirada das peças antes da concretagem, sendo considerada uma característica do concreto de 25 MPa.

**Figura 72-** Formas para moldagem das placas.



**Fonte:** autor

Todas as placas foram concretadas no mesmo dia, com utilização de uma betoneira com capacidade de 400 litros, conforme Figura 73 e todos os materiais utilizados foram cuidadosamente pesados em massa seca, com utilização de balança de precisão digital.

**Figura 73 -** Betoneira em operação.



**Fonte:** autor

A mistura procedeu-se com a brita, a areia, o cimento e água, com o traço especificado, em massa de 1,0, 2,02 e 3,28, constituídos de cimento, areia e agregado pedra nº. 0 (zero). A relação de água/cimento utilizada foi 0,63. Depois de realizada a mistura do concreto este foi injetada nos moldes de madeira conforme a Figura 74, sendo as peças deixadas em descanso para completar seu processo de cura por 28 dias.

**Figura 74 -** Placas concretadas.



**Fonte:** autor

Após a mistura do concreto também foram coletados 06 (seis) corpos de prova cilíndricos nas dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura (Figura 75), conforme os procedimentos descritos na norma NBR 5738 (ABNT, 2015), com propósito de realizar os testes de compressão de corpos cilíndricos segundo a NBR 5739 (ABNT, 2007).

**Figura 75 –** Corpos-de- prova cilíndricos.



**Fonte:** autor.

Outro teste também realizado foi o *Slump Test* ou teste de abatimento do concreto, aplicado com propósito de se definir e compreender as características referentes à consistência e trabalhabilidade do concreto fresco em sua aplicação, conforme a Figura

76.

**Figura 76** - Realização do *Slump-Test* no concreto empregado nas amostras.**Fonte:** autor.

A concretagem do teste de abatimento foi realizada de maneira manual, empregando um bastão metálico para o adensamento da massa. Ao analisar o abatimento identifica-se um adensamento de aproximadamente 5,5 cm apresentando a massa uma textura lisa e compacta com a incidência de poucos vazios, demonstrando uma consistência adequada, segundo especificações apresentadas por Helene e Terzian (1993) na Tabela 21.

**Tabela 21** - Consistência do concreto em função do tipo de elemento.

Elemento Estrutural	Abatimento (mm)	
	Pouco Armada	Muito Armada
Laje	$\leq 60 \pm 10$	$\leq 70 \pm 10$
Viga e Parede armada	$\leq 60 \pm 10$	$\leq 80 \pm 10$
Pilar do Edifício	$\leq 60 \pm 10$	$\leq 80 \pm 10$
Paredes de fundação, sapatas, tubulões	$\leq 60 \pm 10$	$\leq 70 \pm 10$

**Fonte:** adaptado de Helene e Terzian (1993).

Todo o processo demorou até a última placa, cerca de 6 horas. Não foi realizado nenhum procedimento de cura especial.

### 5.3 Aplicação do Reforço com Tecido de Carbono

A desforma das vigas ocorreu 28 dias após sua moldagem, sendo separadas as 3 placas pertencentes ao grupo A para que se realizasse o reforço com compósito de epóxi e fibra de carbono. Inicialmente realizou-se o lixamento mecânico e a limpeza das superfícies de forma cuidadosa, eliminando todas as impurezas como sujeiras e poeiras (Figura 77).

**Figura 77** - Preparação da superfície com lixamento mecânico.



Fonte: Autor

Em seguida o tecido de fibra de carbono foi cortado nas mesmas dimensões das placas (45 cm x 110 cm), sendo realizada a aplicação da resina epóxi na superfície da placa utilizando-se uma espátula e desempenadeira, de modo a espalhá-la uniformemente na superfície (Figura 78).

**Figura 78** - Aplicação de resina epóxi no substrato após lixamento.



Fonte: Autor

Nesta etapa houve uma precaução quanto à espessura do filme de epóxi aplicado, para que o mesmo não venha a apresentar uma camada muito espessa contribuindo para o descolamento e assim colapso do sistema. Vale lembrar que o preparo da resina foi realizando segundo instruções solicitadas pelo fabricante, para evitar possíveis problemas no processo de cura da resina e assim no seu desempenho.

Na sequência os tecidos de fibra de carbono foram pressionados na superfície das placas utilizando um rolo metálico para a retirada das bolhas de ar na interface de adesão das peças, aumentando assim sua área de contato (Figura 79).

**Figura 79** - Aplicação do tecido de fibra de carbono e retirada do ar com auxílio de rolo metálico.



**Fonte:** Autor

Ao finalizar a aplicação do reforço nas placas do grupo A, todas as amostras foram transportadas para o Laboratório de Testes da Universidade São Judas Tadeu, onde permaneceram por 7 dias em local seco, em temperatura e umidade controladas, sendo posteriormente realizados os testes.

## **5.4 Ensaios Mecânicos**

### **5.4.1 Tração da Fibra de Carbono**

Este teste foi proposto com intuito de identificar se a fibra utilizada atinge os valores de resistência apresentados pelo fabricante. Foram separadas 03 (três) amostras do tecido de fibra de carbono que será utilizado no reforço das vigas, tendo cada amostra a dimensão de 55 mm de largura por 340 mm de comprimento, sendo as amostras fixadas nas extremidades de uma prensa Kratos, modelo KE 20.000 MP, com capacidade de

20.000 kgf. A Figura 80 mostra as amostras do tecido de fibra de carbono. Após ser fixada na máquina, realizou-se o ensaio de tração através da aplicação de cargas na fibra no sentido inferior para posterior. O equipamento foi conectado a um computador que realiza a aquisição dos dados.

**Figura 80** - Amostra de fibra de carbono (esquerda); fibra de carbono estendida na máquina (centro), fibras de carbono rompidas após o teste.



Fonte: Autor

#### 5.4.2 Resistencia à Compressão

Após elaborar a massa de concreto “trato” em uma betoneira, foram confeccionadas seis amostras de corpos-de prova cilíndricos (Figura 81), para a análise e caracterização do concreto, visando identificar se ele apresenta uma resistência à compressão condizente com o tipo de material especificado no trabalho.

**Figura 81** - Corpos de prova confeccionados para o teste de compressão.



Fonte: Autor

Neste caso empregou-se a norma NBR – 5739 (ABNT, 2007) para a condução destes testes, sendo utilizada uma prensa eletro-hidráulico da Solotest com capacidade de 150 tonelada/força. Na Figura 82 é possível visualizar a amostra posicionada na prensa eletro-hidráulica para realização do teste.

**Figura 82** - Ensaio do primeiro corpo, ensaio: compressão simples.



Fonte: Autor

### 5.4.3 Ensaio de Flexão

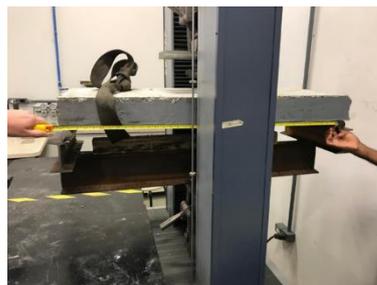
Para a realização dos testes de flexão das placas empregou-se como base as diretrizes da norma NBR 6118 (ABNT, 2014). Como equipamento empregou-se uma prensa Kratos, modelo KE 20.000 MP, com capacidade de 20.000 kgf, sendo a carga aplicada no centro.

Assim utilizou-se um sistema bi-apoiado com carga no centro da viga, o dispositivo adotado foi desenvolvido pelo próprio laboratório baseando-se na NBR 6118 (ABNT, 2014), no qual a viga metálica encontra-se apoiada sobre o pórtico do equipamento, contendo em suas extremidades duas bases de apoio metálicas (vigas) com cilindros no ponto de apoio da amostra, sendo a carga aplicada no centro da face superior da viga. A Figura 83 ilustra os ensaios realizados nos diferentes grupos de vigas. Para leitura dos dados foi utilizado o sistema de aquisição de dados desenvolvido pela fabricante do equipamento de testes da marca Kratos.

**Figura 83** – Ensaio de flexão nas diversas placas.



(a) Prensa com dispositivo desenvolvido especificamente para este ensaio pelo próprio laboratório da mecânica da USJT.



(b) Esquema de montagem do sistema de placa-biapoiaida para teste de flexão.



(c) Imagens da ruptura das placas do Grupo C. Detalhe da viga (PL 7) após a ruptura nota-se a fragilidade no momento de ruptura.



(d) Imagens da ruptura das placas do Grupo C. Observa-se o mesmo comportamento que o da placa 7.



(e) Imagens da ruptura das placas do Grupo C. Detalhe da viga (PL 7) após a ruptura nota-se a fragilidade no momento de ruptura e com baixa ductilidade.



(f) Imagens da ruptura das placas do Grupo B. Detalhe da placa (PL 04) após a ruptura nota-se um aumento de resistência momento de ruptura.



(g) Imagens da ruptura das placas do Grupo B. Detalhe da viga (PL 04) após a ruptura nota-se um aumento de resistência momento de ruptura.



(h) Imagens da ruptura das placas do Grupo B. Detalhe da placa (PL 06) após a ruptura nota-se um aumento de resistência no momento de ruptura.



(i) Imagens da ruptura das placas do Grupo A. Detalhe da ruptura da viga (PL 1).



(j) Imagens da ruptura das placas do Grupo A. Detalhe do descolamento da manta.

Fonte: autor.

## 6. Resultados e Discussões

### 6.1 Análise dos Resultados de Tração da Fibra

Os resultados dos ensaios de tração na fibra estão apresentados na Tabela 22. Ao realizar o teste de tração das fibras identificou-se que elas apresentaram uma força máxima de resistência média de  $(1246,7 \pm 118,50)$  kgf ou  $(12 \pm 1)$  kN.

**Tabela 22** - Resultados obtidos do ensaio de resistência a tração do tecido de fibra de carbono das amostras f1, f2 e f3.

Amostra	Força máxima (kgf)	Limite de resistência (kgf/mm <sup>2</sup> )	Módulo elasticidade (kgf/mm <sup>2</sup> )
f1	1310,0	349,6	3374,5
f2	1110,0	292,3	3109,4
f3	1320,0	-	-
Média	1246,7	321	3242
Desvio padrão	118,5	41	187

Fonte: Autor

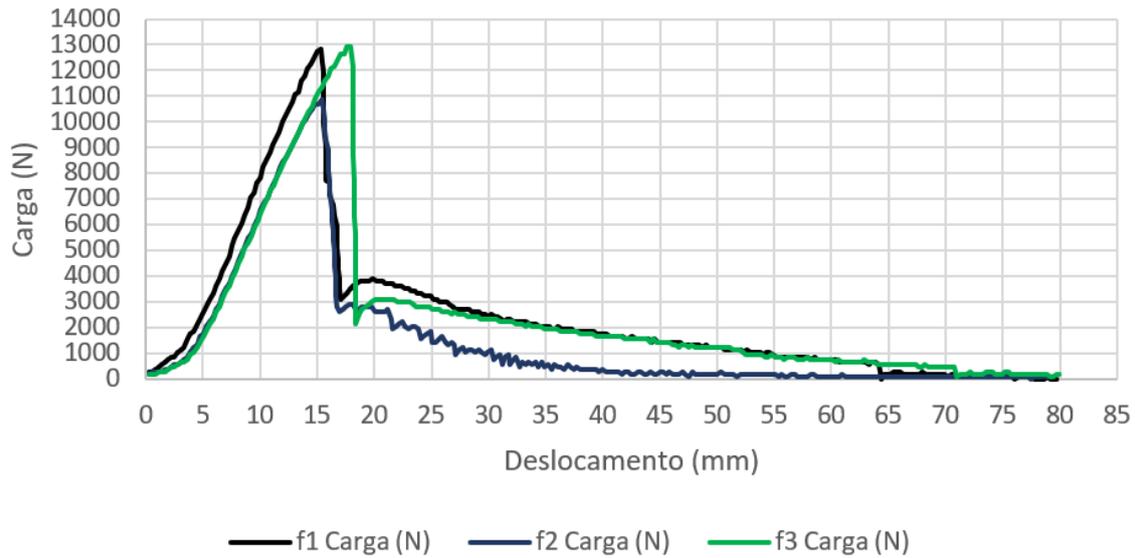
Já no caso do limite de resistência das fibras, a amostra f3 apresentou um resultado muito discrepante, não sendo considerado para o cálculo da média. Assim é possível dizer que o limite de resistência médio da fibra de carbono foi de  $(321 \pm 41)$  kgf/mm<sup>2</sup>.

Pela análise do gráfico da Figura 84 nota-se um comportamento similar entre as três amostras quanto a sua relação tensão versus deformação, demonstrando assim uma homogeneidade de suas características, pois ambas apresentaram uma região de escoamento de aproximadamente 13 kN, com respectivo deslocamento de 15 mm.

Porém quando comparado o valor médio do limite de resistência obtido com o valor apresentado pelo fabricante (Tabela 24), percebe-se que o material testado apresentou um desempenho 12,05% inferior ao informado pelo fabricante, podendo esta diferença estar relacionada a uma série de fatores adversos.

### 6.2 Análise dos Resultados de Resistência à Compressão

Com a realização dos ensaios de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos, obteve-se uma carga média de  $(17,19 \pm 0,63)$  Tf. Como resultado as amostras apresentaram um  $f_{ck}$  médio de  $(24,35 \pm 0,90)$  MPa, conforme apresentado na Tabela 24.

**Figura 84** - Gráfico da carga versus deslocamento para as amostras de tecido de fibra de carbono.

Fonte: Autor

**Tabela 23** - Comparação dos limites de resistência dos testes e do fabricante.

Amostras	Limite de Resistência (Kgf/mm <sup>2</sup> )
Valor médio dos ensaios	322,95
Especificado pelo fabricante	367,10
Variação (%)	- 12,05

Fonte: Autor

**Tabela 24** - Resultados dos testes de compressão simples.

CP	C-25	
	Carga (Tf)	$f_{ck}$ (MPa) -28 dias
1	17,89	25,34
2	16,61	23,53
3	16,58	23,48
4	17,57	24,89
5	16,68	23,62
6	17,82	25,24
Média	17,19	24,35
Desvio Padrão	0,63	0,90

Fonte: Autor

Deste modo, pode-se concluir que o concreto está dentro dos padrões especificados pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014) qual descreve que concretos de classe C-25 a C30 são indicados para utilização em construção predial em geral, por apresentar baixas deformações e permeabilidade.

## 6.3 Análise dos Resultados do Ensaio de Flexão

Analisando os resultados dos ensaios de flexão, observou--se de modo geral que:

- a ruptura das placas do grupo C, referente as placas de concreto simples sem reforço de tecido de fibra de carbono e sem armação de tela de aço interna, apresentou maior fragilidade do concreto e baixa ductilidade.
- a ruptura das placas do grupo B, referente as placas de concreto com a armação de tela de aço interna, notou-se que a armadura possibilitou que o concreto atinja sua deformação através da absorção de uma maior quantidade de energia.
- a ruptura das placas do grupo A, referente as placas de concreto com reforço de composto epóxi com fibra de carbono, apresentou uma maior carga máxima suportada até a ruptura, além de serem observados maiores deslocamentos, de modo a absorver os esforços solicitantes de tração.

### 6.3.1 Grupo C - Placas sem Reforço de Fibra e sem Armadura de Tela de Aço

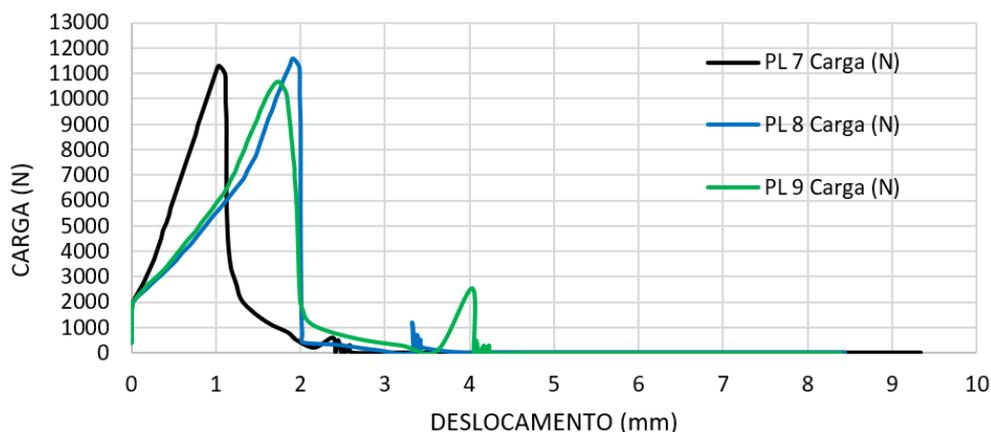
As placas do grupo C são consideradas de referência para o estudo, pois consistem em vigas de concreto puro sem armação ou qualquer tipo de reforço. Na Tabela 25 estão os resultados da carga máxima obtidas para cada uma das amostras. Neste caso, as vigas apresentaram uma carga máxima média de  $(11,2 \pm 0,4)$  kN.

**Tabela 25** - Resultados obtidos do ensaio das placas PL 7, PL 8 e PL 9.

Amostra	Carga máxima (kgf)	Carga máxima (N)
PL7	1150,0	11277,7
PL8	1180,0	11571,8
PL9	1090,0	10689,3
Média	1140,0	11179,6
Desvio padrão	45,8	449,4

Fonte: Autor

A fragilidade do concreto, proveniente de sua baixa ductilidade, pode ser vista no gráfico da carga versus deslocamento da Figura 85, no qual nota-se que o concreto apresentou uma carga máxima de 11571,9 N, com um deslocamento de 2 mm, passando deste ponto de escoamento para a ruptura da estrutura.

**Figura 85** - Gráfico da carga versus deslocamento – Grupo C.

**Fonte:** Autor.

O concreto na sua forma simples se apresenta como um material frágil com baixa ductilidade, de modo que sua resistência será resultante das energias de coesão presentes na interface dos constituintes do concreto (cimento, areia e agregados), assim a partir do momento em que a energia aplicada no sistema supera a capacidade de absorção energética do conjunto o mesmo irá entrar em colapso, resultando no aparecimento de fissuras que tenderão a progredir para trincas até que haja a ruptura do conjunto.

### 6.3.2 Grupo B - Placas com Armadura de Tela de Aço

Em se tratando da análise dos resultados do teste de flexão das placas contendo armadura de tela de aço, identificou-se que a viga PL4 apresentou um comportamento não condizente com o apresentando pelas amostras PL5 e PL6, proveniente de uma falha na adesão concreto com a tela de aço, ou problemas na constituição do corpo-de-prova, sendo assim desconsiderada nos resultados apresentados na Tabela 26.

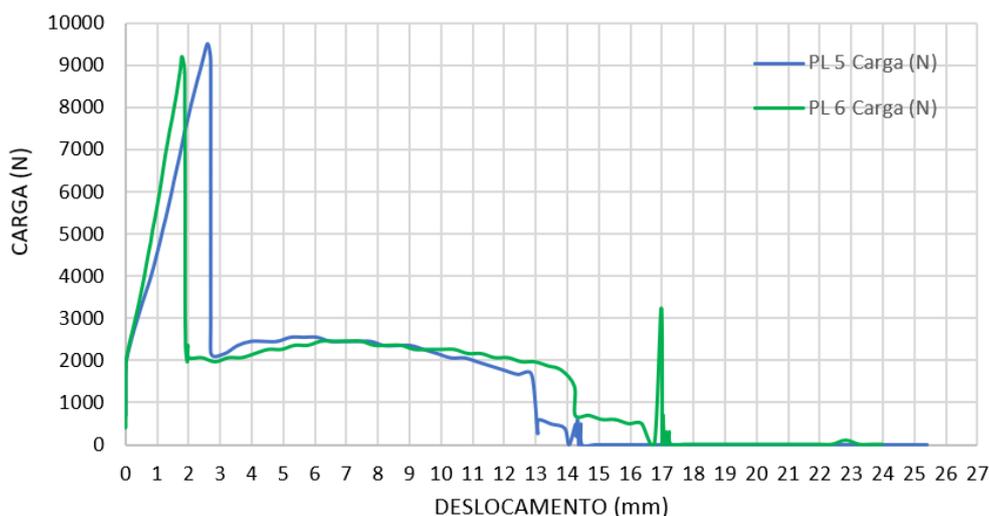
**Tabela 26** - Resultados obtidos do ensaio das placas PL 4, PL 5 e PL 6.

Amostra	Carga máxima (kgf)	Carga máxima (N)
PL4	-	-
PL5	970,0	9512,4
PL6	940,0	9218,3
Média	955,0	9365,4
Desvio padrão	21,2	207,0

**Fonte:** Autor

Houve um aumento da ductilidade da placa quando comparada ao grupo padrão que pode ser identificado através do gráfico da Figura 86, no qual a curva mantém-se dentro do limite de escoamento até aproximadamente 9300 N com uma deformação entre 2 e 3 mm, porém a partir deste ponto já houve a fratura do concreto, passando para o escoamento da tela de aço em seu interior, e posterior ruptura da armadura.

**Figura 86** - Gráfico da carga versus deslocamento – Grupo B.



**Fonte:** Autor

De acordo com Machado (2005) o concreto vem a ser um material frágil de baixa ductilidade, porém, a incorporação de armaduras de aço tornando-o um concreto armado ou protendido tende a conferir um comportamento dúctil à estrutura resultante da deformação inelástica da armadura, possibilitando que o concreto atinja sua deformação total, através da absorção de uma maior quantidade de energia.

Para Machado (2005) é possível acompanhar o processo de ruptura de uma estrutura contendo armadura de aço (Figura 87). Segundo Machado (2005, p.70) são constituídas as seguintes etapas:

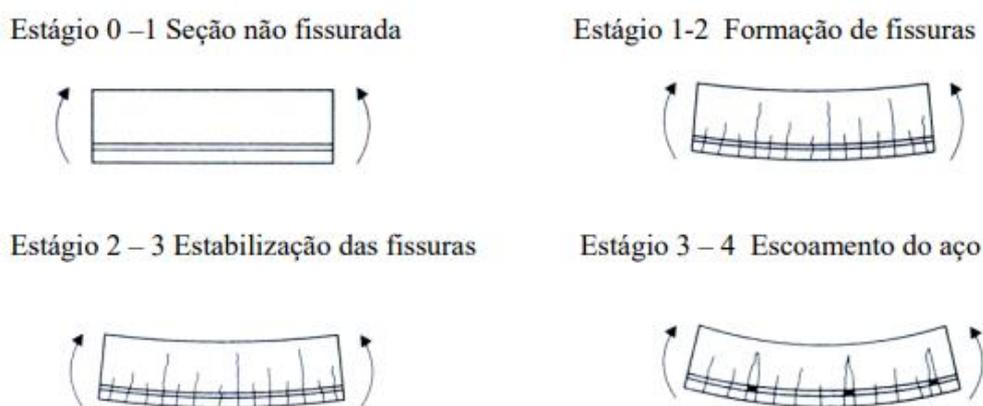
Estágio 0 – 1: Seção Não-Fissurada - A seção não apresenta fissuras, donde a armadura de aço não contribui para a resistência da seção, que pode ser considerada composta de um material homogêneo;

Estágio 1 – 2: Formação de Fissuras - As primeiras fissuras começam a surgir, aumentam e alcançam a zona de compressão da seção. As fissuras subsequentes possuem comprimentos menores (devido à influência das primeiras fissuras), pois a seção transversal não é plenamente tracionada. Novas fissuras poderão surgir junto à armadura de flexão;

Estágio 2 – 3: Estabilização das Fissuras - Nessa fase tem-se uma estabilização das fissuras, e não aparecem novas fissuras. As fissuras existentes têm sua abertura aumentada;

Estágio 3 – 4: Escoamento do Aço - Após o crescimento paulatino das fissuras tem-se o escoamento da armadura de flexão. A curvatura aumenta acentuadamente, enquanto o aumento do momento fletor é praticamente constante. Os acréscimos finais da curvatura ocorrem em virtude do pequeno aumento do braço de alavanca interna, e o concreto na área de compressão atinge a ruptura, o que corresponde ao ponto 4.

**Figura 87** - Estágios básicos do processo de ruptura de um concreto com armadura de aço.



Fonte: Machado (2005)

### 6.3.3 Grupo A - Placas com Reforço de Fibra de Carbono

Após realizar o ensaio de tração na flexão no Grupo A, relativo às vigas com reforço de compósito epóxi com fibras de carbono, obteve-se uma carga máxima média de  $(52,0 \pm 4,0)$  kN, conforme mostra os dados da Tabela 27.

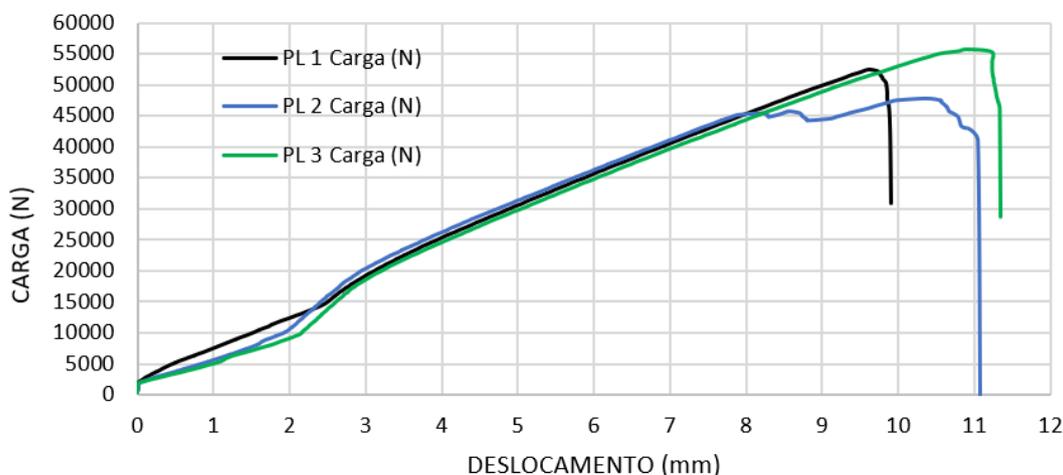
**Tabela 27** - Resultados obtidos do ensaio das placas PL 1 PL 2 e PL 3.

Amostra	Carga máxima (kgf)	Carga máxima (N)
PL1	5360,0	52563,6
PL2	4870,0	47758,4
PL3	5680,0	55701,8
Média	5303,3	52007,9
Desvio padrão	408,0	4000,7

Fonte: Autor

Quando analisada a relação carga versus deslocamento é possível compreender a o ganho de tenacidade, ou seja, sua capacidade de absorção de energia até seu rompimento, promovido pelo reforço com fibra de carbono (Figura 88).

**Figura 88** - Gráfico da carga versus deslocamento – Grupo A.



**Fonte:** Autor

Em se tratando de estruturas reforçadas, a sua ruptura poderá ser proveniente da ruptura do compósito, ainda que não se atinja a deformação inelástica necessária, as fissuras neste caso são induzidas pela liberação de uma enorme quantidade de energia de deformação elástica liberada na ruptura pelo reforço polimérico de fibra de carbono, assim parte da energia elástica liberada é absorvida pelo concreto acarretando o aumento das fissuras (MACHADO, 2005).

#### 6.4 Análise Comparativa dos Resultados dos Grupos A, B e C

Ao realizar a comparação entre os resultados obtidos nos três grupos de estudos é possível identificar diferenças entre a placa de concreto sem nenhum reforço, a placa reforçada com uma armação de tela aço e a placa de concreto sem nenhum reforço. Neste caso para a análise inicial empregam-se os valores médios obtidos em cada grupo (lembrando que no grupo B, foi desconsiderada a amostra PL4 para determinação da média) estando os valores apresentados na Tabela 28. Na Figura 89 ilustra o gráfico comparativo entre os grupos.

Quando analisada a carga suportada até a ruptura da placa, percebe-se que o grupo A – referente à placa reforçada com compósito de fibra de carbono, apresentou uma carga

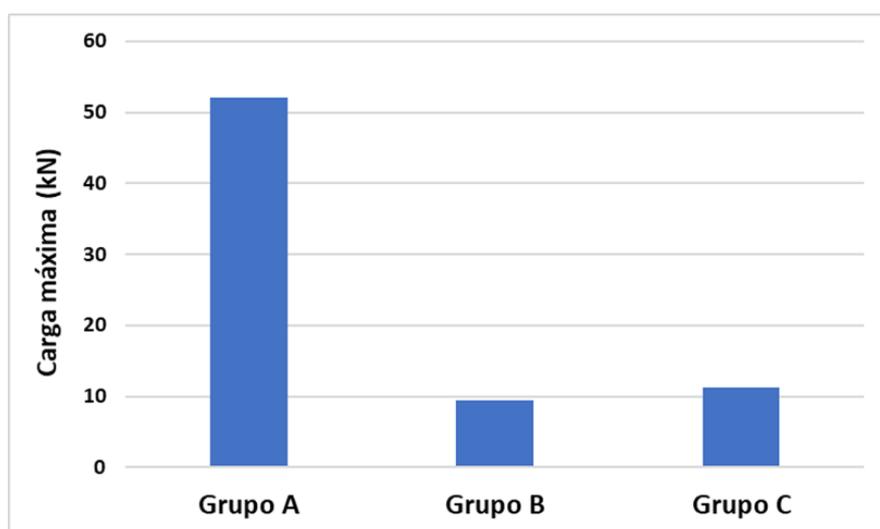
máxima 365% superior a suportada pela viga padrão e 455,32% superior frente à placa contendo armadura de tela de aço, demonstrando a eficácia que esse tipo de reforço pode promover.

**Tabela 28** - Comparativo dos resultados médios do ensaio de flexão das amostras.

Grupo	Carga máxima (kN)
A	(52,0 ± 4,0)
B	(9,4 ± 0,2)
C	(11,2 ± 0,4)

Fonte: Autor.

**Figura 89** – Comparação entre as cargas máximas suportadas para cada um dos grupos.



Fonte: autor.

De acordo com Machado (2005), quando se adiciona um reforço externo a estruturas de concreto, tal modificação lhes permitirá absorver uma maior quantidade de energia (carga), sem que sua capacidade de deformação se altere, assim é possível que a estrutura atinja sua ruptura sem que se atinja a sua deformação potencial. A estrutura reforçada dispõe de uma energia elástica acumulada superior a existente em estruturas sem reforço, e em contrapartida uma energia inelástica acumulada inferior à mesma. Desta forma, as estruturas reforçadas deverão apresentar uma ductilidade menor do que as estruturas convencionais.

Conforme os resultados anteriormente apresentados e analisados e todo o estudo realizado durante o trabalho chegou-se a algumas conclusões, principalmente, referentes ao estudo experimental, que os objetivos inicialmente propostos para este trabalho foram alcançados. Sendo assim, pode-se concluir que:

- O reforço de vigas através de colagem de polímero reforçado com fibras de carbono na sua face inferior (banzo), quando submetidas aos esforços de tração, mostrou-se eficaz, apresentando considerável ganho de carga máxima suportada das vigas ensaiadas;
- O modo de ruína de vigas com reforços de tecido de fibra de carbono apresentou grandes deslocamentos verticais, sendo capaz de absorver os esforços solicitantes de tração;
- Vale a pena comentar que, embora tenham sido realizados poucos ensaios experimentais, os resultados obtidos mostraram a eficiência do uso de tecido de fibra de carbono como reforço em estruturas de concreto.

## **7. Aplicação Técnica do Composto Reforçado com Fibra de Carbono na Recuperação de Estruturas de Concreto Armado**

Este capítulo tem por propósito demonstrar as vantagens da utilização do compósito epóxi com fibra de carbono em projetos de recuperação de estruturas de concreto armado, frente à utilização de um sistema que propõe a adição de armadura (tela soldada), fôrmas de madeira e graute, para correção das anomalias presentes na sua ruptura.

Serão apresentados fatos das constatações evidenciadas pela análise dos elementos estruturais do Condomínio Edifícios Praias de Guarujá, extraídos durante inspeções realizadas pela empresa ENPLATEC. O Condomínio Edifícios Praias de Guarujá que é constituído por seis blocos: A, B, C, D, E, e F. Localizado na Av. Alexandre Migués Rodrigues, 547, Praia do Tombo, Guarujá, São Paulo (Figura 90).

**Figura 90** - Vista geral de acesso aos blocos.



Fonte: Autor

### **7.1 Descrição do Empreendimento de Estudo**

Dentre os blocos existentes no Condomínio Edifícios Praias de Guarujá, foi utilizado como estudo o bloco C, pois este apresentava um estado de patologia avançado

devido às reações do tipo químico. Conforme o laudo técnico, os edifícios originalmente apresentavam uma fachada constituída por elementos em concreto aparente e forros em gesso. Em algum momento no passado o concreto recebeu um revestimento cerâmico e o forro de gesso foi substituído por um forro de PVC.

Foram estabelecidas diretrizes para manter as condições de segurança estrutural, vigentes pela ABNT NBR 6118, com adoção de soluções, tecnologias e materiais específicos e procedimentos para restauro das fachadas conforme projeto original. Foram realizadas inspeções na estrutura com propósito de se identificar e caracterizar a presença de manifestações patológicas presentes nas áreas externas sob o revestimento cerâmico das fachadas das edificações. Desde que não fosse comprometer significativamente a fachada, durante a sua inspeção, quando ficava evidenciada alguma anomalia oculta, o revestimento era removido, como ilustrado na Figura 91.

**Figura 91** – (a) Remoção do revestimento com indícios de anomalia e (b) remoção do forro em PVC.



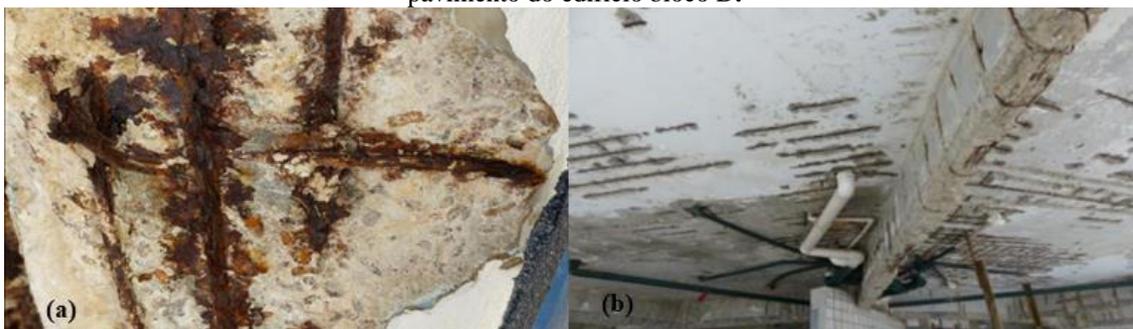
Fonte: Autor

### 7.1.1 Análise Estrutural e Identificação das Anomalias

A estrutura do edifício apresentava um alto teor de corrosão em grande parte das armaduras, e se encontrava com as mesmas expostas. Na inspeção realizada foi possível constatar que o cobrimento nominal das armaduras não estava condizente com o especificado na NBR 6118.

Tanto o cobrimento que não estava condizente com a norma, tal como a mudança do revestimento sem uma manutenção adequada formou fatores, que juntos agem de forma propícia para a ocorrência de patologias. A manifestação patológica constatada é apresentada na Figura 92.

**Figura 92** - (a) Vista em detalhe da viga do 1º pavimento do edifício bloco D e (b) Vista do teto do 1º pavimento do edifício bloco D.



Fonte: autor

Esse efeito acaba ocasionando a desagregação do concreto, acelerando de forma brusca a corrosão das armaduras proporcionando uma perda de seção considerável das mesmas, comprometendo assim a durabilidade da estrutura, como mostra a Figura 93.

**Figura 93** - Exemplos de anomalias encontradas na inspeção da torre. (a) Armadura com alto teor de corrosão com estribos e a barra de aço rompido, (b) cobrimento não condizente com a norma e (c) vista em detalhe da viga e pilar externo.

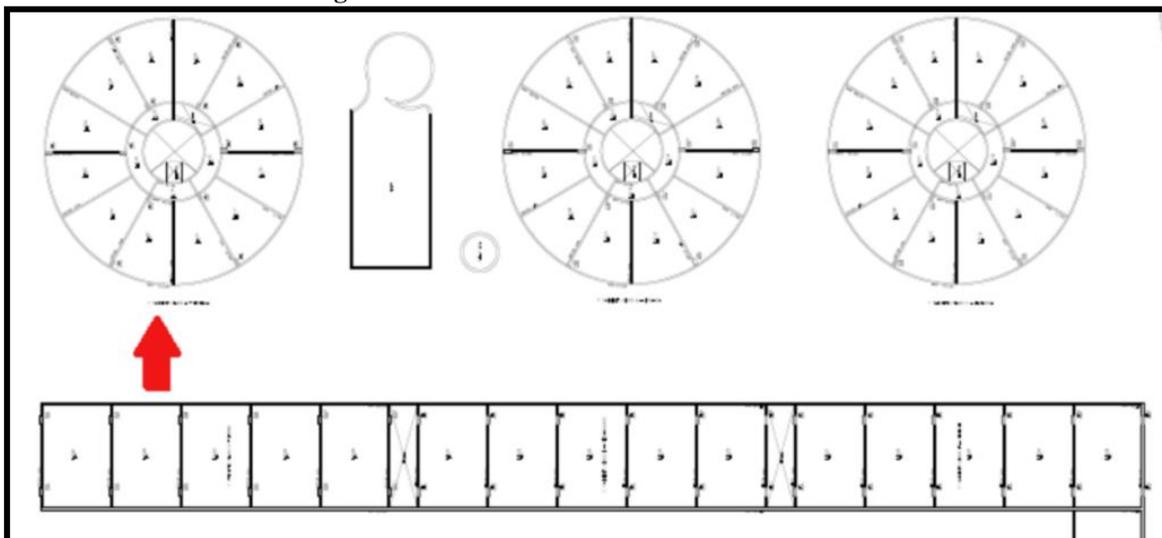


Fonte: Autor

## 7.2 Projeto de Reforço Estrutural

Fundamentados no cadastramento e nas inspeções realizadas, foi elaborado o projeto de reforço estrutural n°3.404 da ENPLATEC. Conforme os projetos e registros, as soluções dadas para cada anomalia foram particularizadas, não sendo dadas soluções padrões e/ou genéricas.

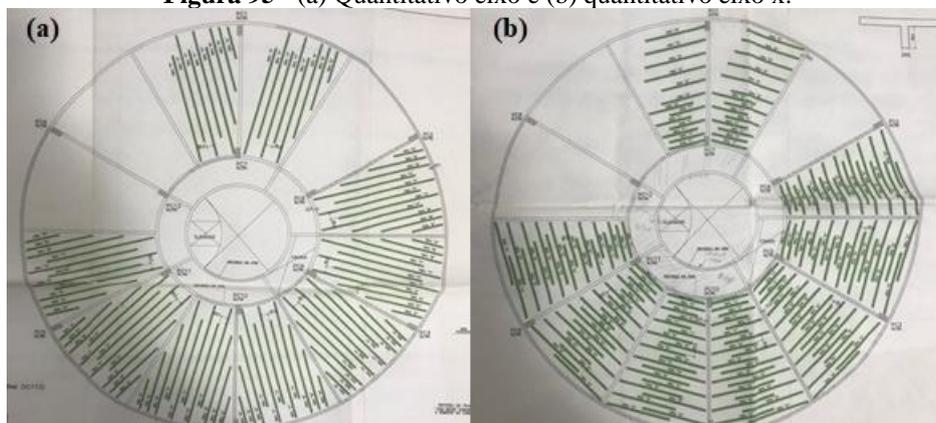
O reforço estrutural e o tratamento do aço e do concreto, para o pavimento térreo, (laje do 1º pavimento) foi pormenorizado ao longo das três pranchas do projeto de reforço do bloco D, E e F. Planta de Cadastramento, para localização dos blocos, identificado em vermelho o bloco C, referente neste estudo de caso e mostrado na Figura 94.

**Figura 94** - Planta de cadastramento dos blocos.

Fonte: Laudo técnico Enplatec

### 7.3 Simulação de Projetos de Recuperação e Reforço Estrutural

Neste estudo realizaram-se duas simulações de possíveis técnicas para recuperação da estrutura de reforço da laje de concreto armado maciça, em específico do Bloco C. Um dos projetos propõe a adição de armadura (tela soldada), fôrmas de madeira e graute, enquanto o outro consiste na realização de um reforço pela adição de fibra de carbono à estrutura (Figura 95).

**Figura 95** - (a) Quantitativo eixo e (b) quantitativo eixo x.

Fonte: Laudo técnico Enplatec

Os custos dessa simulação foram desenvolvidos de forma simplificada e baseada na tabela CPOS/19 (COMPANHIA PAULISTA DE OBRAS E SERVIÇOS) – VERSÃO 176; Vigência: a partir de 01/07/2019 – Boletim Referencial de Custos – Tabela de Serviços (SEM DESONERAÇÃO/ONERADO) e Tabela da Convenção Coletiva de

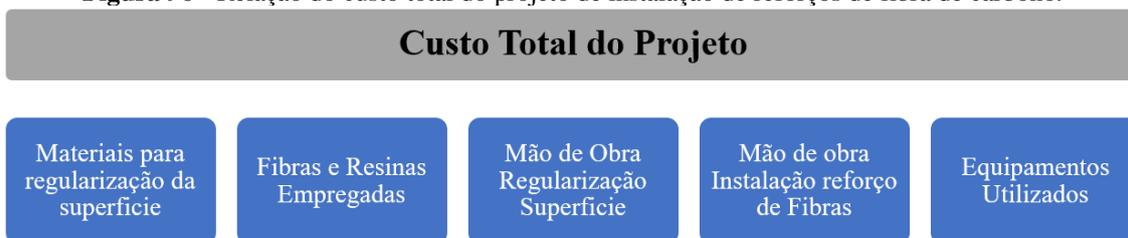
Trabalho do Setor da Construção Civil de maio de 2019 e, com base nas cotações dos materiais adquiridos na época da obra que ocorreu em 2017 e atualizados com data base de setembro/19.

Para a realização do levantamento dos relativos custos do projeto, consideraram-se somente os respectivos custos relacionados à fabricação do serviço, não sendo considerados custos e despesas como: transporte, manutenção de equipamentos, despesas administrativas, dentre outros.

## 7.4 Custos do Projeto de Reforço com Compósito de Fibra de Carbono

Para que se possa realizar a simulação do projeto de instalação de compósitos de fibra de carbono na recuperação da estrutura de uma laje, e assim identificar seus relativos custos, as seguintes etapas apresentadas na Figura 96 serão consideradas para sua consecução.

**Figura 96** - Relação do custo total do projeto de instalação de reforços de fibra de carbono.



Fonte: Autor

### 7.4.1 Relação dos Custos Relativos aos Materiais para Regularização da Superfície

Antes de aplicar o reforço com fibra de carbono, em alguns trechos da laje do Bloco C, houve a necessidade de sua planicidade, correções de irregularidades e aderência, com a finalidade de eliminar os índices vazios entre o substrato e fibra, garantindo a funcionabilidade do sistema, para executar está etapa foi utilizada uma argamassa polimérica, com espessura média de 2 cm, por isso, este custo será demonstrado a seguir e também uma análise sem o seu uso, assim, podemos analisar o custo somente do reforço e não somente de sua preparação de superfície (substrato).

Para garantir a planicidade e aderência da instalação do reforço com tecido de fibra de carbono adotou-se para efeito de cálculos os 09 panos de lajes, sendo que cada pano laje, corresponde a uma área estimada de 22,52 m<sup>2</sup>, totalizamos uma área total de 202,68 m<sup>2</sup> a ser reforçada, com espessura média de 2cm aproximadamente. Assim o consumo será aproximado de 2,66 m<sup>3</sup>, considerando que o consumo teórico da argamassa seja de 1.849,00Kg/m<sup>3</sup>, será necessário um total de 4.931,73Kg (Tabela 29).

**Tabela 29** - Quantidade de materiais para regularização das superfícies.

<b>Material</b>	<b>Quantidade (kg)</b>
Zentrifix CR Argamassa com agente adesivo incorporado	4.931,73

**Fonte:** Autor

Para que se obtenha o custo do material empregado na regularização da superfície, multiplicou-se a quantidade total de argamassa necessária pelo valor unitário do material contido na tabela da CPOS/19 (Companhia Paulista de Obras e Serviços) – versão 176 em vigência a partir de 01/07/2019 – Boletim Referencial de Custos, conforme demonstrado na Tabela 30.

**Tabela 30** - O custo de material da argamassa polimérica para regularização das superfícies.

<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço Unitário</b>	<b>Preço Total</b>
Zentrifix CR Argamassa com agente adesivo incorporado	4.931,73,40 Kg	R\$2,60/m <sup>2</sup>	R\$12.822,58
		Total	R\$12.822,58

**Fonte:** Autor

Assim, será necessário um total de R\$ 12.822,58 para aquisição da argamassa polimérica Zentrix CR, para a realização da correção e uniformização da superfície.

#### **7.4.2 Relação dos Custos Relativos aos Materiais – Fibras e Resinas Empregadas**

Para o levantamento do consumo do reforço com tecido com fibra de carbono, foi necessário executar a soma de cada tipo de tecido, especificado no projeto, conforme suas dimensões e calcular a área em metros quadrados, como mostrado na Tabela 31.

Após realizado o levantamento do total de fibra a ser empregada na restauração, deve-se estimar a quantidade dos demais materiais necessários como resinas de impregnação, laminação e regularização, conforme Tabela 32.

**Tabela 31 - Consumo de tecido na recuperação da estrutura.**

<b>Tipo</b>	<b>Quant.</b>	<b>Dimensões</b>	<b>m</b>	<b>m<sup>2</sup></b>
TIPO “1”	84	0.125 X 2.00	108.00	13,50
TIPO “2”	34	0.125 X 2.50	85.00	10,62
TIPO “3”	72	0.125 X 3.50	252.00	31,50
TIPO “4”	16	0.10 x 1.80	28.80	2,88
TIPO “5”	16	0.10 x 3.60	57.60	5,76
TIPO “6”	16	0.10 x 5.40	86.40	8,64
TIPO “7”	45	0.10 x 6.00	270.00	27,00
TIPO “8”	10	0,125 x 6.00	60.00	7,50
TIPO “9”	85	0.10 x 0.95	80.75	8,07
TIPO “10”	160	10 x 0.55	88.00	8,80
TIPO “11”	10	0.10 X 1.55	15.50	1,55
	<b>Total</b>		<b>1132.05</b>	<b>125,83</b>

**Fonte:** Autor

**Tabela 32 - Quantidade de materiais para execução do reforço com tecido de fibra de carbono.**

<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>
Fibra de Carbono	125,83m <sup>2</sup>
Resina de Impregnação	5,75kg
Resina de Laminação	61,60kg
Resina de Regularização	57,80kg

**Fonte:** Autor

Partindo-se das respectivas quantidades de cada material a ser utilizado, realiza-se a sua multiplicação pelos valores unitários contidos na tabela da CPOS/19 – versão 176 em vigência a partir de 01/07/2019 – Boletim Referencial de Custos, conforme demonstrado na Tabela 33

**Tabela 33 - Materiais necessários para o reforço em questão e respectivos preços.**

<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço Unitário</b>	<b>Preço Total</b>
Fibra de Carbono	125,83m <sup>2</sup>	R\$61,00/m <sup>2</sup>	R\$7.675,63
Resina de Impregnação	51,40kg	R\$63,73/kg	R\$3.275,72
Resina de Laminação	61,60kg	R\$76,38/kg	R\$4.705,00
Resina de Regularização	57,80kg	R\$71,67/kg	R\$4.142,52
	<b>Total</b>		<b>R\$19.798,87</b>

**Fonte:** Autor

Deste modo, o valor total do material necessário para a realização do reforço de fibra de carbono será de R\$ 19.798,87 referente à aquisição das fibras de carbono e das resinas de laminação, impregnação e regularização.

### 7.4.3 Relação dos Custos Relativos à Mão de Obra para Regularização da Superfície

Para calcular o custo financeiro da mão de obra de execução de regularização das superfícies, instalação do reforço com tecido de fibra de carbono, foi utilizada a Tabela CPOS – versão 176, com vigência a partir de 01/07/2019.

Neste caso, adota-se o custo é R\$ 1.354,00 por m<sup>3</sup>, com base na espessura executada de 0,02m, o custo avaliado por m<sup>2</sup>, totalizará o valor de R\$27,09/m<sup>2</sup> x 202,68/m<sup>2</sup> (área de regularização) = R\$5.490,60, conforme mostrado da Tabela 34.

**Tabela 34** - Materiais necessários para o reforço em questão e respectivos preços.

<b>Material</b>	<b>Preço Unitário</b>
Mão de obra de Regularização	R\$ 27,09 /m <sup>2</sup>
Área total a ser regularizada	202,68 / m <sup>2</sup>
Valor Total da Mão de Obra	R\$ 5.490,60

Fonte: Autor

### 7.4.4 Relação dos Custos Relativos à Mão de Obra para Instalação do Reforço

Para realizar o levantamento do respectivo custo da mão de obra para instalação das fibras de reforço, realizou-se uma pesquisa junto ao Sindicato do setor, através da consulta da Convenção Sindical, podem-se levantar os respectivos salários dos profissionais envolvidos com seus respectivos custos de encargos.

Neste caso, foi considerado que a realização do serviço demandaria o período de um mês, para quantificar o valor dos salários e devidos encargos. Assim neste período seria realizado um gasto de R\$ 17.746,07 referente ao custo total da mão de obra empregada (Tabela 35).

**Tabela 35** - Custo de mão de obra de reforço com adição de tecido de fibra.

<b>Função</b>	<b>Qtd</b>	<b>Salário c/ Encargos + Leis Sociais (126,72%)</b>	<b>Prazo (mês)</b>	<b>Total (R\$)</b>
Encarregado	1	9.500,00	1	R\$9.500,00
Pedreiro	1	4.662,63	1	R\$4.662,63
Ajudante	1	3.583,44	1	R\$3.583,44
			Total	R\$17.746,07

Fonte: Autor

### 7.4.5 Relação dos Custos Relativos aos Equipamentos Utilizados

Para realizar o cálculo do custo de equipamentos utilizados nas etapas do projeto de reparo, tais como apoio para instalação do reforço, e preparação de superfície, considera-se que serão utilizadas 16 torres de andaimes, medindo 1,0 x 1, 0 x 1, 0m e duas lixadeiras, conforme mostrado na Tabela 36.

**Tabela 36 - Equipamentos necessários para o reforço com adição de tecido de fibra de carbono e respectivos custos de aluguel.**

<b>Equipamento</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço Mensal (R\$)</b>
Lixadeira 7"	2	R\$1.200,00
Andaimes	16 torres	R\$ 720,00
	Total	R\$1.920,00

**Fonte: Autor**

Demais insumos como EPIs, réguas, tesouras, estiletes, dentre outros não foram aqui considerados, assim o custo total com locação de equipamentos será de R\$ 1.920,00 durante o projeto.

### 7.4.6 Relação do Custo Total do Projeto de Reforço com Fibra de Carbono

Ao realizar a somatória dos custos relativos ao projeto de instalação de reforços de fibra de carbono na estrutura analisada, chega-se a um montante de R\$ 57.778,12 relativo ao custo total do projeto (Tabela 37).

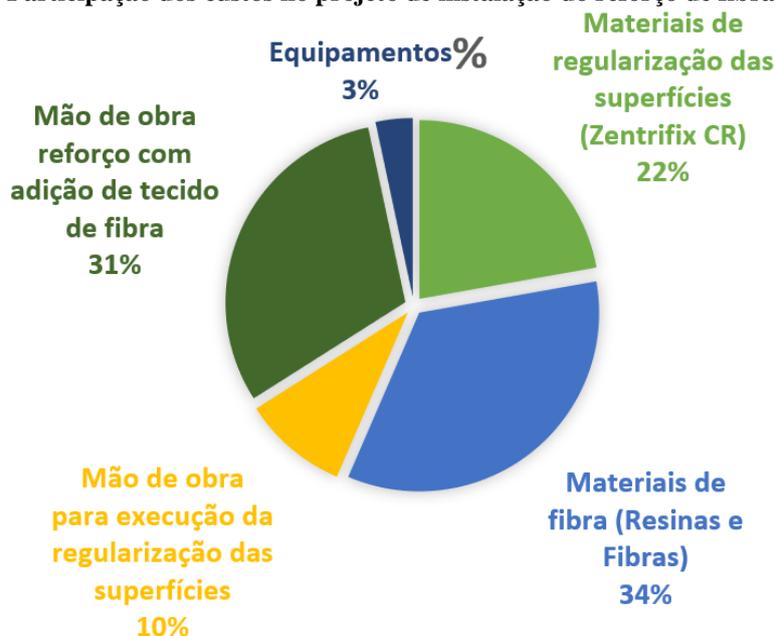
**Tabela 37 - Custo total e suas composições para o reforço com adição de fibra de carbono.**

<b>Relação de Materiais</b>	<b>Valor</b>	<b>%</b>
Materiais de regularização das superfícies (Zentrifix CR)	R\$ 12.822,58	22,2%
Materiais de fibra (Resinas e Fibras)	R\$ 19.798,87	34,3%
Mão de obra para execução da regularização das superfícies	R\$ 5.490,60	9,5%
Mão de obra reforço com adição de tecido de fibra	R\$ 17.746,07	30,7%
Equipamentos	R\$ 1.920,00	3,3%
Total	R\$ 57.778,12	100,0%

**Fonte: Autor**

Ao analisar os relativos custos identifica-se que o custo para aquisição das fibras e resinas o reforço vem a ser o principal fator de custo com 34,3% da participação, estando o custo da mão de obra com a instalação do reforço em segundo lugar com um percentual de 30,7%, representando ambos a uma participação de 65% dos custos totais, conforme apresentado na Figura 97.

**Figura 97 - Participação dos custos no projeto de instalação do reforço de fibra de carbono.**



Fonte: Autor

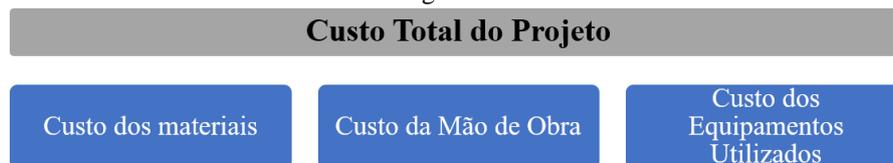
## **7.5 Custos do Projeto de Reforço com Adição de Armadura, Fôrma de Madeira e Graute**

Para elaboração do cálculo dos custos da obra com recuperação estrutural executada em armadura, fôrma de madeira e graute se fez necessário seguir os procedimentos descritos pelo engenheiro calculista pela elaboração do projeto que levantando os seguintes itens:

- escoramento na região a ser recuperada;
- apicoamento manual com espessura máxima de 02 (dois) centímetros até encontrar a armadura existente;
- montagem de fôrmas de madeiras estanques;
- incorporação de armadura de reforço indicada;
- preenchimento com graute na região a ser recuperada.

Para que se possa realizar a simulação do projeto de reforço com adição de armadura, fôrma de madeira e graute na recuperação da estrutura de uma laje, e assim identificar seus relativos custos, as seguintes etapas apresentadas na Figura 98 serão consideradas para sua consecução.

**Figura 98** - Relação do custo total do projeto reforço com adição de armadura, forma de madeira e graute.



Fonte: Autor

### 7.5.1 Relação do Custo dos Materiais Empregados

Para realização dos respectivos custos dos materiais utilizados no projeto de recuperação da estrutura com adição de Armadura, Fôrma de Madeira e Graute, adotou-se para efeito de cálculos os 09 panos de lajes, sendo que cada pano laje corresponde a uma área estimada de 22,52 m<sup>2</sup> x 09 panos, totalizamos uma área total a ser reforçada de 202,68 m<sup>2</sup>.

Para o reforço estrutural considera-se uma tela soldada tipo Q92, painel com 2,45 m x 6,00 m, peso de cada painel aproximadamente 21,76 kg. Considerando-se a área total de 202,68 m<sup>2</sup>, realiza-se sua divisão pela área de cada painel, obtendo assim a quantidade de 14 painéis necessários, responsáveis por um peso adicional de 304,64 kg sobre a estruturada laje.

Considerando que o consumo de graute seja de 2.200 kg/m<sup>3</sup>. Para determinar a quantidade de graute necessária, já considerando a recomposição do apicoamento de 2 cm nesta área, determina-se um total de 4,03 m<sup>3</sup> de graute. Em continuidade multiplica-se a quantidade necessária de graute pelo seu consumo por m<sup>3</sup>(4,03m<sup>3</sup>x2. 200kg), obtendo um total de 8.910,00 kg de graute a utilizar.

Quanto às formas de madeira a se utilizar, serão necessários de 202,68 m<sup>2</sup> de fôrmas de madeira, sem contar com os elementos de escoramento (pontaletes ou escoras metálicas), e outros elementos (pregos, sarrafos, gesso) necessários para a execução da fôrma. Consideram-se também um incremento de 10% no consumo sobre o total relativo às perdas devido às dimensões comerciais das placas (Tabela 38).

**Tabela 38** - Relação das quantidades de materiais utilizados no projeto com grau te.

Material	Quantidade
Aço	304,64 kg e/ou 14 painéis
Graute	8.910,00kg
Madeira	202,68m <sup>2</sup>

Fonte: Autor

Assim utilizando a Tabela CPOS – versão 176, com vigência a partir de 01/07/2019, levantou-se que a fôrma terá um custo de R\$ 60,51 / m<sup>2</sup>, determinando assim os respectivos custos apresentados na Tabela 39. Com base nas quantidades estima-se o custo total dos materiais utilizados neste projeto, somando um montante de R\$ 27.601,16, sendo a maior parte relativa ao aço e a madeira empregada.

**Tabela 39** - Relação dos custos com materiais para o projeto de reforço com graute.

<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço Unitário</b>	<b>Preço Total</b>
Aço	304,64Kg e/ou 14 painéis	R\$ 204,50/painel	R\$ 2.863,00
Graute	8.910,00kg	R\$1,40/kg	R\$ 12.474,00
Madeira	202,68m <sup>2</sup>	R\$ 60,51/ m <sup>2</sup>	R\$ 12.264,16
		Total	R\$ 27.601,16

Fonte: Autor

### 7.5.2 Relação dos Custos da Mão de Obra Utilizada

Para levantar os custos referentes à mão de obra necessária para a consecução do projeto de reforço com graute, estima-se inicialmente a quantidade e o tipo de mão de obra necessário respeitando as características e etapas de sua condução, novamente foi considerada que a obra terá uma duração de 1 mês.

Neste projeto serão necessários 11 funcionários para realização do projeto, ao levantar os respectivos salários e encargos, estima-se que o valor da mão de obra envolvida será de R\$ 51.809,54 no mês de trabalho (Tabela 40).

**Tabela 40** - Mão de obra do reforço com adição de armadura e respectivos custos.

<b>Função</b>	<b>Qtd</b>	<b>Salário c/ Encargos + Leis Sociais (126,72%)</b>	<b>Prazo (Mês)</b>	<b>Total (R\$)</b>
Encarregado	1	9.500,00	1	R\$9.500,00
Pedreiro	2	4.662,63	1	R\$9.325,26
Carpinteiro	2	4.662,63	1	R\$9.325,26
Armador	2	4.662,63	1	R\$9.325,26
Ajudante	4	3.583,44	1	R\$14.333,76
			Total	R\$51.809,54

Fonte: Autor

### 7.5.3 Relação dos Custos dos Equipamentos Empregados

Os gastos relativos à locação e aquisição de equipamentos para a realização da obra será de R\$ 4.698,00, conforme descrito na Tabela 41.

**Tabela 41** - Equipamentos alugados, utilizados na preparação e execução do reforço.

Equipamento	Quantidade	Preço Mensal (R\$)
Martelete 5kg	2	R\$1.600,00
Serra Circular 7"	2	R\$260,00
Andaimes	06 torres	R\$1.800,00
Escoras	173	R\$1.038,00
	Total	R\$4.698,00

Fonte: Autor

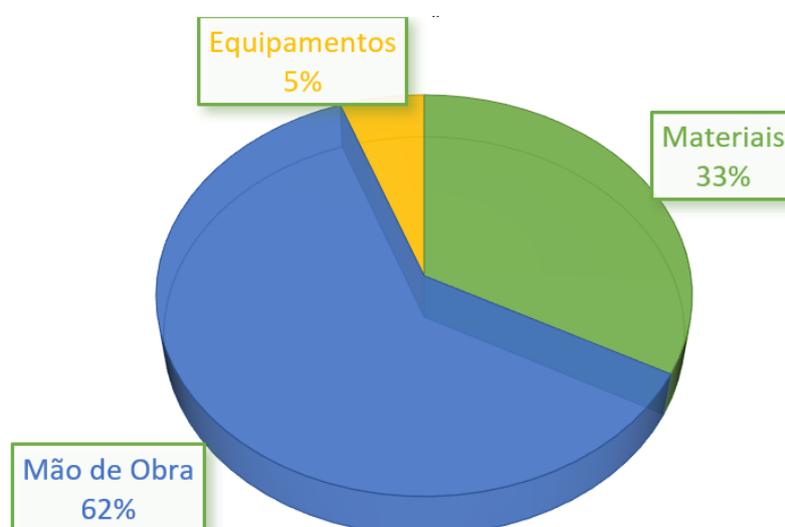
### 7.5.4 Relação do Custo Total Projeto de Reforço com Adição de Armadura, Fôrma de Madeira e Graute

Realizando a somatória dos custos referentes ao processo de reforço da estrutura com adição de armadura, fôrma de madeira e graute, pode-se visualizar que os gastos relativos com a mão de obra representam 61,60% do total despendido, ficando os gastos com materiais responsáveis por 32,82%, conforme a Tabela 42. A Figura 99 apresenta as partes que compõe os custos.

**Tabela 42** - Custo total e suas composições para o reforço com adição de armadura.

Fator	Valor	%
Materiais	R\$ 27.601,16	32,82%
Mão de Obra	R\$ 51.809,54	61,60%
Equipamentos	R\$ 4.698,00	5,59%
Total	R\$ 84.108,70	100%

Fonte: Autor

**Figura 99** - Participação dos custos no projeto de instalação do reforço com graute.

Fonte: Autor

## 7.6 Comparação dos Custos Totais do Reforço com Fibra de Carbono e do Reforço com Graute

Para que se possam comparar os custos de cada projeto, inicialmente foi necessário igualar as classes de custos, através da somatória dos custos relativos ao projeto de reforço com compósito de fibra de carbono, que neste caso, realizou-se a soma dos custos de mão de obra unificando-os, assim como os custos de materiais (Tabela 43).

**Tabela 43** -Custo total e suas composições para o reforço com adição de armadura.

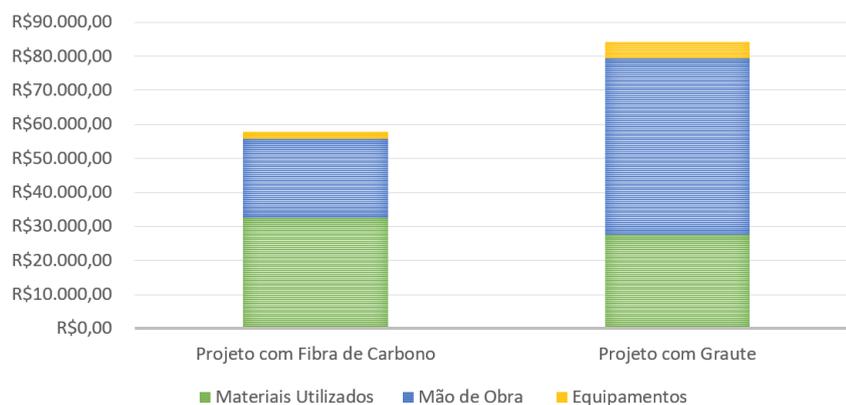
Fator	Projeto com Fibra de Carbono	Projeto com Graute
Materiais Utilizados	R\$ 32.621,45	R\$ 27.601,16
Mão de Obra	R\$ 23.236,67	R\$ 51.809,54
Equipamentos	R\$ 1.920,00	R\$ 4.698,00
Total	R\$ 57.778,12	R\$ 84.108,70

Fonte: Autor

Para que se realize o processo de recuperação da estrutura através do uso de armadura, fôrma de madeira e graute serão necessárias um gasto no valor de R\$ 84.108,70, valor este 45,57% superior ao gasto necessário para a realização do reforço com compósito de fibra de carbono (R\$ 57.778,12).

Quando comparado os gastos com os materiais empregados percebe-se que o projeto com fibra de carbono irá demandar um total de R\$ 32.621,45, valor este 18,18% maior do que o projeto com armação, madeira e graute, porém esta diferença é compensada quando se analisa os custos com Mão de Obra, já que o projeto com reforço de armação, madeira e graute demandará um total de R\$ 51.809,54, valor 122,96% maior que o projeto de reforço com fibra de carbono (Figura 100).

**Figura 100** - Custo total e suas composições para o reforço com adição de armadura.



Fonte: Autor

Assim é possível concluir que a utilização de técnicas de recuperação e reforço de estruturas através da utilização de compósitos de fibra de carbono vem a ser financeiramente mais viável do que o uso da técnica com armadura de aço, madeira e graute, já que seu custo é relativamente inferior, assim como a demanda por mão de obra e o trabalho a ser despendido.

## **7.7 Vantagens e Desvantagens do Uso do Sistema de Fibra de Carbono versus Sistema Convencional**

Em muitos casos, antes de decidir sobre qual será o método a ser utilizada para executar uma obra, a questão do custo é essencial. Desta forma é fundamental um estudo comparativo para o cliente e, assim, decidir qual método será utilizado na realização do reforço estrutural.

Vale comentar, que uso da fibra de carbono, é muitas vezes descartado antes mesmo da realização de um estudo preliminar. Pelo simples fato de saber de que a fibra por ser um material importado, vem a ser relativamente caro. Porém ao levantar uma composição de preços e custos dos projetos, deve-se considerar outros itens, como: transporte de entulho, fretes, equipamentos, preparação de superfícies, mão-de-obra, capazes de tornar as outras técnicas muito mais caras que o reforço com fibra de carbono.

A obra referenciada no estudo de caso descrito neste trabalho, já foi projetada e realizada utilizando um compósito de fibra de carbono, sendo elaborada com o auxílio de um engenheiro calculista uma simulação do trecho empregado no comparativo deste trabalho.

De acordo com Beber (2000), cada 2 kg de um compósito de fibra de carbono utilizado em um reforço, equivale ao mesmo ganho de resistência que uma estrutura de 47 kg de aço. Assim, sendo, reforços com fibra de carbono conseguem atingir resultados de resistência equivalentes a outras técnicas, utilizando-se de uma quantidade menor de material.

Vale lembrar que além do peso, existem outros diferenciais a se considerar, tal como a facilidade do processamento, a maleabilidade do tecido de carbono, a simplicidade de sua aplicação, a logística de transporte do material, o volume ocupado pelo material, bem como, as características da fibra de carbono. A depender das condições da estrutura, assim como da complexidade da geometria da estrutura, a utilização de

chapas de aço e formas de madeira, se tornaria inviável operacionalmente, devido ao volume de tubulações e caixas sifonadas e, tubulações de elétricas. Com o emprego de tecido de carbono, é possível executar os reforços sem nenhuma alteração das redes já existentes. Reforçar somente onde ocorreu à perda de seção de armadura.

O reforço no Bloco C, por exemplo, após todo preparo de superfície como: tratamento de armaduras remoção de corrosão das armaduras por processo mecânico e manual, aplicação de inibidor de corrosão, regularização das superfícies a aplicação do tecido de carbono foi executado em apenas 15 dias em todo o bloco, com um tempo infinitamente menor caso fosse realizar o reforço da laje utilizando o processo convencional, com adição de armaduras, chapas de aço e grautes. Na Figura 101 é possível visualizar as principais etapas do projeto de recuperação do bloco.

Um fator importantíssimo que antecedeu a escolha das fibras de carbono está relacionado ao fato deste tipo de reforço proporcionar uma grande resistência à corrosão do sistema, uma vez que elimina uma série de cuidados necessários associados a reforços com chapas metálicas e incorporação de armaduras. Assim para uma melhor exemplificação das vantagens na utilização do compósito de fibra de carbono frente a outros métodos convencionais (formas de madeira, escoras, graute), estas foram organizadas na Tabela 44.

Finalmente, na Figura 102, estão algumas imagens atuais (tiradas em 02/06/2021) do condomínio onde foram feitas as obras de reparo. Visualmente é possível notar a durabilidade do reparo nas diversas partes onde o tecido de fibra de carbono foi utilizado como reparo estrutural.

**Figura 101** - Etapas do processo de recuperação do bloco com reforço de fibra de carbono.



(a) ilustração da remoção do revestimento para análise e identificação das patologias.



(b) jateamento com água.



(c) a remoção do concreto desagregado.



(d) aplicação da fibra de carbono em lajes.



(e) aplicação da fibra de carbono em vigas e pilares.



(f) aplicação da camada final de epóxi.



(g) lançamento da sílica nas fibras aplicadas na laje.



(h) detalhe do lançamento da sílica nas fibras aplicadas na laje.



(i) aplicação do Emcepob Nanoperm T da Mc Bauchimie.



(j) as vigas e os pilares finalizados.

**Fonte:** Autor

**Tabela 44** - Principais diferenças entre a técnica de reforço com fibra de carbono frente ao método tradicional com graute.

<b>Fator analisado</b>	<b>Fibra de carbono e resina epóxídica</b>	<b>Convencional (forma, aço e graute)</b>
Prazo de execução, liberação de uso e cura	Preparo de superfície, Corte da Fibra, Aplicação e Cura, Liberação em 07 dias	Corte de madeira, montagem de forma, corte e dobra de aço, escoramento, cimbramento, concretagem com Graute, Liberação em 15 dias.
Logística / Transporte / Volume de Materiais	De fácil transporte, podendo ser utilizados até uma caminhonete e peso reduzido. Resina epóxídica e Rolo de Fibra de Carbono (peso específico de aproximadamente 300g/m <sup>2</sup> )	Haveria de uma necessidade de vários fornecedores, uso de caminhões desde betoneiras, com auxílio de bomba para concretagem de caminhões no transporte do madeiramento e do graute, envolvendo uma logística maior.
Variação das peças recuperadas	A fibra de carbono e a resina não ultrapassam 3 mm de espessura.	No mínimo o aumento seria de 3 cm, em obediência a NBR.
Peso agregado à estrutura	Os calculistas desprezam esta grandeza tanto no cálculo, como na sua execução	O peso cálculo em atendimento ao mínimo de cobrimento é de aproximadamente 75 Kg /m <sup>2</sup>

**Fonte:** Autor

**Figura 102** - Relatório fotográfico – pós-obra 02/06/2021 – Condomínio Edifício Praias de Guarujá.



**Fonte:** autor.

## 8. Conclusão

Este trabalho investigou a utilização de um compósito epóxi com fibras de carbono para a reparação de estruturas de concreto. A partir dos estudos, das análises, dos resultados experimentais e de uma aplicação prática, conclui-se que:

- os ensaios experimentais indicaram que a utilização do reforço com fibra de carbono conferiu um aumento na resistência mecânica das vigas.
- uma aplicação técnica utilizando esse tipo de reparo mostrou que em relação à questão econômica, a recuperação da estrutura com a utilização do reforço com fibra de carbono apresentou uma economia de 31,30% no valor gasto em comparação a um projeto empregando armadura de aço e graute.

Outros aspectos também foram observados quanto à utilização do reforço com fibra de carbono, sendo:

- prazo de execução, liberação de uso e cura muito menor;
- a logística de transporte mais simples, devido ao menor volume ocupado pelo material utilizado;
- menor variação na dimensão das peças recuperadas;
- menor variação no peso da estrutura, de modo que seu aumento seja minimizado;

Os reforços tecidos de fibra de carbono apresentados neste estudo mostram resultados satisfatórios em relação a sua eficiência em estruturas em concreto armado. Com os reforços com fibras de carbono é possível manter a geometria original da seção transversal da peça, além do ganho de tempo na execução devido à agilidade do processo, restabelecendo assim o conceito de vida útil da estrutura. Trata-se de uma tecnologia de grande interesse por parte da comunidade, devido às vantagens que possuem, das quais algumas foram demonstradas neste trabalho.

Para trabalhos futuros destacam-se alguns tópicos de interesse:

- o desenvolvimento de estudos sobre a utilização de tela (malha) fabricada de fibra de carbono como elemento estrutural na fabricação em estruturas pré-fabricadas,

assim, como painéis de lajes e para pequenas passarelas e ligações de acessos em vias, públicas e privadas. Garantindo leveza a estrutura e, evitando-se gastos futuros de manutenção futuras por causa de corrosão de armadura.

- As fibras de carbono, por apresentarem alta resistência à tração, poderiam também, contribuir com um estudo na sua utilização nas obras que se se utilizam protensões de cabos, assim, os cabos de aço hoje utilizados, poderiam ser substituídos por cabos executados de fibra de carbono.
- Outro possível estudo, seria a fabricação de vergalhões de fibra de carbono para construção civil, assim é possível evitar não só processos de corrosão de armaduras e, conseqüentemente manutenções futuras, bem como, redução do tamanho dos elementos estruturais que compõe a estrutura de pilares, vigas e lajes, pois o a utilização do cobrimento de superfície da armadura seria reduzida com este estudo, não havendo mais há necessidade de seguir rígidos padrões já constados em norma. Conseqüentemente haveria uma redução do consumo de concreto, madeira e aço nas edificações impactando-se diretamente o meio ambiente.
- Modelagens computacionais pelo método de elementos finitos que testem os resultados sugeridos pelos métodos.

## 9. Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de Cimento Portland – Preparo, Controle, Recebimento, Aceitação e Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.23p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da Consistência Pelo Abatimento do Tronco de Cone. Rio de Janeiro, 1998.8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR/NM ISO 3210-2**: Peneiras para ensaio com telas de tecido metálico. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM DO BRASIL. **Manual do concreto dosado em central**. São Paulo, 2007. Disponível em: <http://www.abesc.org.br/assets/files/manual-cdc.pdf>. Acesso em 10.06.2021

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. 2 ed. Rio de Janeiro, 2008. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. S.i., 2005. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14050** – Projeto, execução e avaliação do desempenho – procedimentos. Rio de Janeiro, 1998.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE- Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures **ACI 440. 2R**, 2003.

ARAUJO, Ana Carolina Neves. **Estudo Experimental do Reforço à Flexão de Vigas de Concreto Armado utilizando Compósitos com Tecido de Fibras de Carbono**. Dissertação. Departamento de Engenharia Civil da Pontífica Universidade católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Maio de 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. **NBR 6118**, ABNT, 2014, 238p.

BALTHAR, V. K. B. L. **Retração autógena e evolução de propriedades mecânicas de pastas pozolânicas**. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

BASTOS, P. S. D. S. **Estruturas de concreto armado**. Unesp, Universidade Estadual Paulista. Bauru. 2019.

BASTOS, A.B.B. **Caracterização da degradação estrutural baseada no estudo das propriedades dinâmicas de uma estrutura**. 2017. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa. Janeiro de 2017.

BATTISTI, Fernando. **Recuperação de Vigas em Concreto Armado utilizando Polímero Reforçado com Fibras de Carbono**. Monografia. UNIVATES – Universidade do Vale do Taquari. Lajeado – SC. Novembro de 2017.

BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra carbono**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BORGES, Igor de Oliveira. **Estudo de Reforço de Vigas e Lajes com Compósitos de Fibra de Carbono Colados**. Monografia. UNB – Universidade de Brasília. Depto de Engenharia Civil. Brasília – DF. Dezembro de 2016.

BOTELHO, M.H.C.; Marchetti, O. **Concreto armado eu te amo**. São Paulo: Edgar Blucher, 1996.

BRAGA, T.M.G. **Cronologia do Uso dos Metais**. Portal Metálica: Construção Civil. São Paulo, 2009.

BRONZE, Ricardo Alves. **Estudo comparativo: Uso do Sistema de Fibras de Carbono e Sistema Convencional para reforço de Estruturas de Concreto**. Monografia. UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ. Julho de 2016.

CARDOSO, Rafael do Valle Pereira. **Projeto estrutural em Concreto Armado**. Monografia. Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis – SC. 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/115444/RAFAEL%20DO%20V%20ALLE%20PEREIRA%20CARDOSO.pdf?sequence=1&isAllowed=y> acesso: 08.12.2020

CARVALHO, R C; Figueiredo Filho, J R de. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**: segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. São Carlos, 2014

COELHO, Ronaldo Sergio de Araújo. **Concreto Armado na Prática**. São Luiz – MA. Editora UEMA. 2008. Disponível em: (<https://www.editorauema.uema.br/wp->

<content/uploads/files/2018/02/livro-concreto-armado-na-pratica-ronaldo-sergio-1519142039.pdf>), acesso 05.12.2020

COSTA C.M.R. **Comportamento Estrutural de Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra**. Porto, 2009.

COSTA, Lucio. **O arranha-céu e o Rio de Janeiro**. (Entrevista concedida a) s.a. O Paíz, Rio de Janeiro, n. p., 1º. De julho de 1928. In: NOBRE, Ana Luiza (org.). Lucio Costa. Rio de Janeiro: Becodo Azougue, 2010, p.20-25.

COUTO, João P.; COUTO, Armanda M. **Importância da Revisão de Projectos na Redução dos Custos de manutenção das Construções**. In 3º Congresso Nacional de Construção. Universidade de Coimbra. Coimbra – PT. Dezembro de 2007. Disponível em: ([http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/8754/2/camready98\\_2\\_eslrcyshyxh\\_wwcotkdj\\_corr.pdf](http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/8754/2/camready98_2_eslrcyshyxh_wwcotkdj_corr.pdf)), acesso: 15.12.2020

FERRARI, V.J. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbono (prfc) aderido a substrato de transição constituído por compósito cimentício de alto desempenho**. São Carlos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007, 310p.

FONTES, Gabriela Azevedo Fontes; CUNHA, Larissa Lisboa. **Estudo do Ganho de Resistência da Aplicação de manta de Fibras de Carbono em Vigas de Concreto Simples**. UniEvangélica. Anápolis – GO. 2017.

FORTES, Adriano Silva. **Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Fibras de Carbono**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis – SC. 2000.

FRANÇA, Ricardo. **Trincas, Fissuras e Rachaduras; Entenda a diferença**. Website ARQWEB. 28 de junho de 2020. Disponível em: [Trincas, fissuras e rachaduras. - arqweb.com.br](http://arqweb.com.br) - acesso em: 08.12.2020

FREITAS, Maria Luiza Macedo Xavier. **Concreto Armado no Brasil: Invenção, História, Revisões**. Salvador – BA. In 13º Seminário Docomomo Brasil. outubro de 2019. Disponível em: <https://docomomo.org.br/wp-content/uploads/2020/04/119437.pdf> -acesso em: 15.11.2020

GARCIA, Cilene de Cassia. **Incidências patológicas no subsistema estrutura de edifícios habitacionais na região de São Carlos/SP**. Dissertação. Escola da Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – USP. São Carlos – SP. 1999. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-14092016-165339/publico/Dissert\\_Garcia\\_CileneC.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-14092016-165339/publico/Dissert_Garcia_CileneC.pdf)), acesso: 08.12.2020

HELENE, Paulo R.L. **Manual prático para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

HELENE, Paulo Roberto do Lago; TERZIAN, Paulo. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. Editora Pini. São Paulo. 1993.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Corrosão em construção civil**. Brasil. Disponível em: <[http://www.ipt.br/solucoes/272-corrosao\\_em\\_construcao\\_civil.htm](http://www.ipt.br/solucoes/272-corrosao_em_construcao_civil.htm)>. Acesso em: 10.06.2021

JESUS, J.J.C. **Caraterização Geométrico-Estrutural de Pontes em Arco de Alvenaria na Região de Bragança**. São Paulo: Instituto Politécnico de Bragança, 2013.

LEAL, Lilian Luna De Souza. FAGUNDES, Fabiano. **Reforço estrutural com fibra de carbono**. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. Ano 05, Ed. 11, Vol. 09, pp. 31-46. novembro de 2020. ISSN: 2448-0959. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/fibra-de-carbono>.

LEVY Neto, Flaminio; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos Estruturais**. Ciências e Tecnologia. 1º Edição. São Paulo. Editora Edgard Blucher. 2006

LIMA, F.A.A. **A ideia de cidade no renascimento**. FAU-USP. Tese de Doutorado – História e Fundamentos da Arquitetura e do Urbanismo. SÃO PAULO, 2012.

MACEDO, Eduardo Augusto Venâncio Britto de. **Patologias em obras recentes de construção civil: análise crítica das causas e consequências** / Eduardo Augusto Venâncio Britto de Macedo – Rio de Janeiro: UFRJ/ ESCOLA POLITÉCNICA, 2017.

MARCELLI, M. **Sinistros na construção civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obras**. São Paulo. Editora Pini. 2007.

MACHADO, A. P. **Reforço Estrutural de Concreto Armado com Fibras de Carbono**, 2002. São Paulo, PINI. 82.

MACHADO, A. P. **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**, 2010. São Paulo, PINI.

MACHADO, Marcela Gomes. **Estudo Experimental da ductilidade de vigas em concreto armado reforçadas à flexão utilizando compósitos com tecido de fibra de carbono**. Rio de Janeiro – RJ. Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RJ. Janeiro de 2005. Disponível em: [https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5867/5867\\_4.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5867/5867_4.PDF), acesso: 11.12.2020.

MARIANO, José Roberto. **Recuperação Estrutural com ênfase no método da protensão externa**. Monografia. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte – MG. Agosto de 2015. Disponível em: [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBDA9MJKE/1/monografia\\_j.\\_r.\\_mariano\\_especializa\\_o\\_const.\\_civil\\_ufmg\\_2015.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBDA9MJKE/1/monografia_j._r._mariano_especializa_o_const._civil_ufmg_2015.pdf) acesso : 10.06.2021

OLIVEIRA, Clayton Mendes; MONTESSANTI JUNIOR, Eustenio; NASCIMENTO, Ramon Costa; TEODORO, Roberto Leal. **Compósitos de Fibra de carbono para reforço estrutural em pilares, vigas e lajes**. Monografia. UMC – Universidade Mogi das Cruzes. Mogi das Cruzes – SP. 2014

PLACIDO, Carlos Eduardo. **Análise do ganho de resistência em vigas de concreto armado submetidas à flexão reforçadas com de fibra de carbono**. Monografia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão – PR. 2014.

POLITO, Giulliano. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação**. 2006. 191 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Avaliação e Perícia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

RABELLO, Marcelo Silveira; **Aditivação de Polímeros**; São Paulo; editora Artliber; 2000.

REIS, Lilia Silveira Nogueira. **Sobre a Recuperação e Reforço de Estrutura de Concreto Armado**. Dissertação. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte – MG. Abril de 2001.

ROMERO, José Roberto H. **Durabilidade do Concreto**. Apresentação. Universidade Paulista – UNIP. São Paulo – SP. 2019. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/13344562/>, acesso: 18.12.2020

SAMPAIO, A. C; SILVA, K. R. C; GONÇALVES, G. H. V. **Concreto armado: Análise de corrosão, prevenção e tratamento**. 2018. 19f. Graduação em Engenharia Civil no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, São Paulo, 2018.

SANTOS, P.; MORAIS, M.; VARUM, H. **Proposta de um método construtivo de pontes de alvenaria em arco**. 1º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes ASCP. Lisboa, 2009.

SANTOS, Camila Freitas dos. **Patologia de estruturas de concreto armado**, 2014.

SANTOS, Paulo Mascarenhas. **Comparação de Reforço com Chapas de Aço e Fibras de carbono em vigas de concreto armado submetidas à flexão simples**. Monografia. Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana – BA. Setembro de 2008.

SANTOS, Ana Rafaela Souza; VIEIRA, Mylene de Melo; *ET AL*. **Determinação da Área Ótima de Fibra de Carbono utilizada no reforço à flexão de vigas de concreto armado**. In Anais do 55º Congresso Brasileiro de Concreto – IBRACON. Outubro de 2013.

SERRA, Marcus Vinícius Cardoso; SILVA, Thiago Henrique Lira. Fibra de carbono: reforço estrutural em estrutura de concreto armado. In **Revista Científica Semana Acadêmica**. Fortaleza – CE. Editora Unieducar. Novembro de 2019. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo- fibra de carbono.pdf>, acesso: 11.12.2020

SILVA, Gabriel Daoud; CRUZ, Luana Maris Pedrosa; AREDES, Breno Augusto Ribeiro. **Análise da Aplicabilidade de Polímeros reforçados com fibras de carbono no reforço de estruturas de concreto armado**. Instituto Politécnico do Centro Universitário UNA. 2019. Disponível em:

[https://www.academia.edu/38960177/an%C3%81lise\\_da\\_aplicabilidade\\_de\\_pol%C3%8dmeros\\_refor%C3%87ados\\_com\\_fibras\\_de\\_carbono\\_no\\_refor%C3%87o\\_de\\_estruturas\\_de\\_concreto\\_armado](https://www.academia.edu/38960177/an%C3%81lise_da_aplicabilidade_de_pol%C3%8dmeros_refor%C3%87ados_com_fibras_de_carbono_no_refor%C3%87o_de_estruturas_de_concreto_armado), acesso: 15.11.2020

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo. Editora Pini, 1998. 255 p.

THOMÉ, Gustavo Rintzel. **Reforço Estrutural á flexão com fibras de carbono: automatização do modelo de cálculo de dimensionamento**. Monografia. Universidade do Sul de Santa Catarina. Palhoça – SC. 2017.

VERSCHLEISSER, R. **Aplicação de Estruturas de Bambu no Design de Objetos como construir objetos leves, resistentes, ecológicos e de baixo custo**. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO. Rio de Janeiro, 2008.

ZUCHETTI, Pedro. **Patologias da construção civil: Investigação patológica em edifício corporativo de administração pública no Vale Do Taquari/RS**. Lajeado, 2015. Disponível em: Acesso em: 10 de abril de 2020.

## Anexos

## ANEXO A – CONVENÇÃO COLETIVA DE TRABALHO DO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL



Sindicato dos  
Trabalhadores nas  
Indústrias da  
Construção e do  
Mobiliário de Santos



### BASE TERRITORIAL

Santos, São Vicente,  
Guarujá, Bertioga, Cubatão,  
Praia Grande, Mongaguá,  
Itanhaém e Peruibe

### SEDE PRÓPRIA

Rua Júlio Conceição, 102  
Vila Mathias - Santos  
CEP: 11015-906  
Tel./Fax: (13) 3878-5050

### SUBSEDES

#### SÃO VICENTE

Rua José Bonifácio, 166  
Centro - São Vicente  
CEP: 11310-080  
Tel.: (13) 3466-8151

#### GUARUJÁ

Rua Amazonas, 292  
Vila Alice - Guarujá  
CEP: 11450-210  
Tel.: (13) 3341-3027

#### CUBATÃO

Av. Joaquim M. Couto, 337  
Centro - Cubatão  
CEP: 11500-000  
Tel.: (13) 3361-3557

#### PRAIA GRANDE

Av. 31 de Março, 786  
Vila Mirim - Praia Grande  
CEP: 11704-700  
Tel.: (13) 3471-8556

#### BERTIOGA

Rua Arslides Pedro de Castro, 112  
Veleiros - Bertioga  
CEP: 11250-000  
Tel.: (13) 3317-2819

www.sintracomos.org.br

CIRCULAR Nº 001/2019 - SINTRACOMOS - SEC/SANTOS.

Santos, Maio de 2019.

### REF:- CONVENÇÃO COLETIVA DE TRABALHO DO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Senhor Empregador:-

Por força da Cláusula 1ª - Convenção Coletiva em epígrafe, as empresas concederão aos empregados com salários acima dos pisos um reajuste salarial de **5,07% (cinco vírgula zero sete por cento)**, a partir de **01 de Maio de 2019**, aplicados sobre os salários de **30 de Abril de 2019**.

### PISOS SALARIAIS

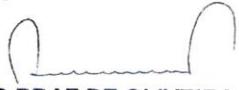
<b>QUALIFICADOS</b>	-	<b>R\$ 2.056,56 (9,35 P/HORA)</b>
<b>NÃO QUALIFICADOS</b>	-	<b>R\$ 1.580,13 (7,19 P/HORA)</b>

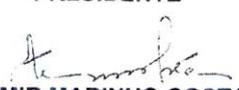
**TICKET REFEIÇÃO:-** Fornecer o Ticket aos empregados no valor de **R\$ 28,27 (vinte e oito reais e vinte e sete centavos)** equivalentes aos dias efetivamente trabalhados por mês.

OU

**TICKET ALIMENTAÇÃO:-** Fornecer o Ticket aos empregados no valor de **R\$ 249,44 (duzentos e quarenta e nove reais e quarenta e quatro centavos)** em substituição ao Ticket Supermercado / Vale Supermercado / Cheque Supermercado.

**SINDICATO DOS TRABALHADORES NAS INDÚSTRIAS  
DA CONSTRUÇÃO E DO MOBILIÁRIO DE SANTOS**

  
**MARCOS BRAZ DE OLIVEIRA - MACAÉ  
PRESIDENTE**

  
**ALMIR MARINHO COSTA  
SECRETÁRIO GERAL**

**ANEXO B – BOLETIM REFERENCIAL DE CUSTOS SEM DESONERAÇÃO  
(ONERDAO) – VERSÃO 176 – CUSTO DE REPARO SUPERFICIAL COM  
ARGAMASSA POLIMÉRICA (tixotrópica), bicomponente**



**CPOS - COMPANHIA PAULISTA DE OBRAS E SERVIÇOS**  
BOLETIM REFERENCIAL DE CUSTOS - TABELA DE SERVIÇOS  
SEM DE SONERAÇÃO (ONERADO)

VERSÃO 176  
Vigência: a partir de 01/07/19

BDI : 0,00%

L.S.: 126,72%

Referência	Descrição	Un	Material	Mão de Obra	Custo Total
11.20.120	Reparo superficial com argamassa polimérica (tixotrópica), bicomponente	m <sup>2</sup>	6.668,11	1.354,60	8.022,71

**ANEXO C – BOLETIM REFERENCIAL DE CUSTOS SEM DESONERAÇÃO  
(ONERDAO) – VERSÃO 176 – CUSTO DE FORMA EM MADEIRA  
COMPENSADA**



**CPOS - COMPANHIA PAULISTA DE OBRAS E SERVIÇOS**  
BOLETIM REFERENCIAL DE CUSTOS - TABELA DE SERVIÇOS  
SEM DE SONERAÇÃO (ONERADO)

VERSÃO 176  
Vigência: a partir de 01/07/19

BDI : 0,00%

L.S.: 126,72%

Referência	Descrição	Un	Material	Mão de Obra	Custo Total
09.02	<b>Forma em madeira compensada</b>				
09.02.020	Forma plana em compensado para estrutura convencional	m <sup>2</sup>	60,51	48,41	108,92