

UNIVERSIDADE FUMEC  
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - FEA

Gabriel Henriques Rabelo Gouvêa

**REFORÇO ESTRUTURAL COM FIBRA DE CARBONO: EFICIÊNCIA À  
FLEXÃO EM CONCRETOS DE DIFERENTES RESISTÊNCIAS**

Orientador: Professor Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco

Belo Horizonte / MG

Maio / 2023

Gabriel Henriques Rabelo Gouvêa

# **REFORÇO ESTRUTURAL COM FIBRA DE CARBONO: EFICIÊNCIA À FLEXÃO EM CONCRETOS DE DIFERENTES RESISTÊNCIAS**

Dissertação de mestrado, apresentada à Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade FUMEC, como parte dos requisitos para conclusão do curso de Mestrado Profissional em Processos Construtivos.

Orientador: Professor Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco.

Belo Horizonte / MG

Maio / 2023

### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

G719r Gouvêa, Gabriel Henriques Rabelo, 1988-  
Reforço estrutural com fibra de carbono: eficiência à flexão em concretos de diferentes resistências / Gabriel Henriques Rabelo Gouvêa. - Belo Horizonte, 2023.  
95 f. : il.

Orientador: Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco  
Dissertação (Mestrado em Processos Construtivos),  
Universidade FUMEC, Faculdade de Engenharia e Arquitetura,  
2023.

1. Concreto armado. 2. Fibras de carbono. 3. Análise estrutural (Engenharia). I. Título. II. Branco, Luiz Antônio Melgaço Nunes. III. Universidade FUMEC, Faculdade de Engenharia e Arquitetura.

CDU: 691.328

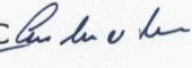
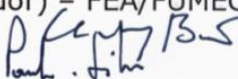

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Universitária-FUMEC

## **ATA DA REUNIÃO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO ALUNO: GABRIEL HENRIQUES RABELO GOUVÊA**

Aos Vinte e Seis (26) dias do mês de maio de dois mil e vinte e três (2023) às 14:30 horas, sob a presidência do Prof. Dr Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco (FUMEC), realizou-se a reunião da Comissão Examinadora indicada pelo Colegiado do Curso de Mestrado Profissional em Processos Construtivos para examinar a Dissertação intitulada: "**REFORÇO ESTRUTURAL COM FIBRA DE CARBONO: EFICIÊNCIA À FLEXÃO EM CONCRETOS DE DIFERENTES RESISTÊNCIAS**", proposto pelo aluno **Gabriel Henriques Rabelo Gouvêa** e seu orientador Prof. Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco. Compareceram o aluno e os professores Prof. Msc. Oswaldo Teixeira Baião Filho; Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva que compuseram a banca juntamente com o orientador. O Senhor Presidente declarou aberta a sessão e em seguida o aluno fez a apresentação da Dissertação. Após a apresentação, procedeu-se à discussão da mesma. Ao final a dissertação foi considerada:  
(X) aprovada/( ) reprovada por unanimidade.

Belo Horizonte, 26 de maio de 2023.  
xx

A comissão examinadora teve a seguinte composição:

Prof. Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco (Orientador) - FEA/FUMEC   
Prof. Msc. Oswaldo Teixeira Baião Filho; -FEA/FUMEC   
Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva - EE/UFGM 



**UNIVERSIDADE  
FUMEC**

Dissertação intitulada **“REFORÇO ESTRUTURAL COM FIBRA DE CARBONO: EFICIÊNCIA À FLEXÃO EM CONCRETOS DE DIFERENTES RESISTÊNCIAS”** de autoria de Gabriel Henriques Rabelo Gouvêa, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco – Universidade FUMEC  
(Orientador)

Prof. Dr. Oswaldo Teixeira Baião Filho – Universidade FUMEC  
(Examinador Interno)

Assinado de forma digital por  
Adriano de Paula e  
Silva:36512460600

Dados: 2023.06.01 21:12:29  
+03'00'

Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva – UFMG  
(Examinador Externo)

Prof. Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Processos Construtivos da Universidade  
FUMEC

Belo Horizonte, 26 de maio de 2023.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meu pais, Leize e Luiz, por me darem o dom da vida, estarem sempre presentes em todas as etapas de minha caminhada, me dando muito amor e forças para superar os obstáculos, me apoiando e incentivando em minhas decisões. Vocês sempre acreditaram em todo o meu potencial e sou muito grato por isso.

Aos meus familiares e amigos por estarem sempre presentes, tornarem a vida mais leve e agradável e por todo carinho demonstrado.

Ao meu irmão de vida, Daniel, e seus pais Jorge e Cleuza, por todos os anos de amizade, lealdade, respeito, apoio e conversas nos melhores e piores momentos de nossas vidas.

Aos meus grandes amigos Leonardo e Ian, com quem felizmente compartilho o gosto pela Engenharia Civil desde os anos de graduação, pelo seu companheirismo, lealdade e paciência em nossos estudos e projetos.

Ao meu professor e orientador Luiz Antônio por todos os seus ensinamentos, oportunidades concedidas, sua amizade, apoio, disponibilidade e paciência em todo o processo do mestrado, mesmo passando por períodos de muita turbulência em nosso caminho.

À minha psicóloga Heliana, sem a qual eu não seria a pessoa e o profissional que sou hoje, sou muito grato por me ajudar a enxergar o meu melhor lado.

Aos professores com quem tive o prazer de dividir experiências e conhecimentos em todas as disciplinas cursadas ao longo do curso.

A todos os que colaboraram com minha pesquisa, em especial Marcelo, Geraldo, Heron, Pedro Paulo e João, pela mão de obra e doação de materiais que foram fundamentais para o êxito do programa experimental dessa dissertação.

Por fim, a todos que de alguma maneira contribuíram para esta pesquisa, para meu desenvolvimento pessoal e profissional. Muito obrigado!

“Você está vivo. Esse é o seu espetáculo. Só quem se mostra se encontra. Por mais que se perca no caminho.”

**Cazuza**

vii

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xiii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	xiv
<b>RESUMO</b> .....	xv
<b>ABSTRACT</b> .....	xvi
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.1 Contextualização .....	15
1.2 Problema de Pesquisa .....	19
1.3 Objetivos .....	19
1.3.1 Objetivo Geral .....	19
1.3.2 Objetivos Específicos.....	19
1.4 Justificativa .....	20
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	21
2.1 O Concreto .....	21
2.2 O Concreto Armado.....	31
2.3 Fibras Utilizadas no Reforço do Concreto Armado.....	42
2.4 Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono .....	50
2.5 Concreto Reforçado com PRFC .....	54
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	60
3.1 Formas .....	60
3.2 Armaduras .....	60
3.3 Concreto.....	62
3.4 Fibras de carbono.....	64
3.5 Resina Epóxi .....	66
3.6 Ensaio de Flexão Simples .....	70
<b>4 RESULTADOS OBTIDOS</b> .....	73
<b>5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	87
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	90
<b>7 REFERÊNCIAS</b> .....	91



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Corrosão da armadura em um pilar .....	16
Figura 2 - Fissuras aparentes na estrutura de uma ponte em Raposo/MG.....	16
Figura 3 - Reforço com mantas de fibra de carbono no Viaduto de Santa Tereza....	18
Figura 4 - Pirâmide Escalonada .....	21
Figura 5 - Aparelho de Vicat.....	23
Figura 6 - Ponte de Souillac .....	23
Figura 7 - Gráfico de Resistência à Compressão (MPa) x Idade (dias) .....	24
Figura 8 - Componentes do concreto .....	25
Figura 9 - Classes de agressividade ambiental.....	27
Figura 10 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto .....	27
Figura 11 - Requisitos para o concreto, em condições especiais de exposição .....	28
Figura 12 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm.....	29
Figura 13 - Novos valores de $\eta_1$ .....	30
Figura 14 - Viga de concreto armado .....	33
Figura 15 - Viga biapoiada e diagramas de esforços solicitantes.....	33
Figura 16 - Comportamento resistente de uma viga biapoiada .....	34
Figura 17 - Valores do coeficiente $\gamma_f$ .....	35
Figura 18 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental .....	37
Figura 19 - Limites de deslocamentos.....	39
Figura 20 - Continuação.....	40
Figura 21 - Fibras para concreto .....	43
Figura 22 - Fibra de aço .....	44

Figura 23 - Resistência mecânica mínima do aço.....	46
Figura 24 - Fibra de aramida.....	47
Figura 25 - Propriedades da fibra de aramida.....	47
Figura 26 - Especificação da fibra utilizada.....	48
Figura 27 - Detalhe da Fibra de vidro reforçando o concreto.....	49
Figura 28 - Diagrama comparativo das propriedades à tração das fibras de carbono, aramida e vidro.....	50
Figura 29 - Fibras de carbono.....	51
Figura 30 - Sistema de reforço empregando fibra de carbono (fio, chapa e tecido)..	52
Figura 31 - Classificação de materiais compósitos.....	53
Figura 32 - Diagrama tensão-deformação específico das fibras, aço de construção e cordoalhas de protensão.....	54
Figura 33 - Estrutura de concreto com reforço de fibra de PRFC.....	55
Figura 34 - Deformações no pilar oriundas de uma carga concentrada.....	57
Figura 35 - Estrutura química da resina epóxi não curada.....	58
Figura 36 - Modelo para confecção das fôrmas de madeira.....	60
Figura 37 - Fôrmas com armaduras posicionadas, prontas para a concretagem.....	61
Figura 38 - Concretagem das vigas e adensamento utilizando haste de aço.....	63
Figura 39 - Fase de concretagem finalizada.....	63
Figura 40 - Dados técnicos das mantas de fibra de carbono.....	64
Figura 41 - Rolo de PRFC utilizado.....	65
Figura 42 - Realização dos cortes da manta de PRFC.....	66
Figura 43 - Resina Epóxi utilizada na colagem dos PRFCs.....	67
Figura 44 - Aplicação da primeira camada de resina.....	68
Figura 45 - Ferramenta estoura bolhas utilizada.....	68
Figura 46 - Vigas reforçadas com PRFC.....	69

Figura 47 - Dados da resina epóxi .....	69
Figura 48 - Esquema de ensaio de flexão de 3 pontos. ....	70
Figura 49 - Dispositivo de ensaio à flexão simples utilizado. ....	71
Figura 50 - CP pronto para ser ensaiado. ....	71
Figura 51 - Diagrama Esforço x Deformação CP 01 .....	74
Figura 52 - Fissuração sob carregamento máximo CP 01 .....	74
Figura 53 - Diagrama Esforço x Deformação CP 02 .....	75
Figura 54 - Fissuração sob carregamento máximo CP 02 .....	75
Figura 55 - Diagrama Esforço x Deformação CP 03 .....	76
Figura 56 - Fissuração sob carregamento máximo CP 03 .....	76
Figura 57 - Diagrama Esforço x Deformação CP 04 .....	77
Figura 58 - Fissuração sob carregamento máximo CP 04 .....	77
Figura 59 - Diagrama Esforço x Deformação CP 05 .....	78
Figura 60 - Fissuração sob carregamento máximo CP 05 .....	78
Figura 61 - Diagrama Esforço x Deformação CP 06 .....	79
Figura 62 - Fissuração sob carregamento máximo CP 06 .....	79
Figura 63 - Diagrama Esforço x Deformação CP 07 .....	80
Figura 64 - Fissuração sob carregamento máximo CP 07 .....	80
Figura 65 - Diagrama Esforço x Deformação CP 08 .....	81
Figura 66 - Fissuração sob carregamento máximo CP 08 .....	81
Figura 67 - Diagrama Esforço x Deformação CP 09 .....	82
Figura 68 - Fissuração sob carregamento máximo CP 09 .....	82
Figura 69 - Diagrama Esforço x Deformação CP 10 .....	83
Figura 70 - Fissuração sob carregamento máximo CP 10 .....	83
Figura 71 - Diagrama Esforço x Deformação CP 11 .....	84
Figura 72 - Fissuração sob carregamento máximo CP 11 .....	84

Figura 73 - Diagrama Esforço x Deformação CP 12 .....	85
Figura 74 - Fissuração sob carregamento máximo CP 12 .....	85
Figura 75 - Diagrama Esforço x Deformação de Todos os CPs.....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Traços do concreto e resistências características fornecidos pelo Eng. Geraldo .....	62
Tabela 2 - Resumo dos Resultados de Todos os CPs.....	86
Tabela 3 - Média dos Resultados de Todos os CPs .....	87

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnica
CFC	Compósito de Fibras de Carbono
cm	Centímetro
CP	Corpo de prova
ELS	Estados-limites de serviço
ELU	Estados-limites últimos
fck	Resistência Característica do Concreto
MPa	Mega Pascal
mm	Milímetro
N	Newton
NBR	Norma Brasileira
PRFC	Polímero Reforçado com Fibra de carbono

## RESUMO

O panorama econômico brasileiro e a grande quantidade de imóveis obsoletos, existentes principalmente nos grandes centros urbanos, dão ênfase à necessidade de pesquisas na área de recuperação e reforço estrutural. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta uma pesquisa quantitativa sobre o reforço estrutural externo à flexão, ou seja, na face tracionada desses elementos, utilizando mantas unidirecionais de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC), em concretos de dois diferentes traços/resistências, 20 MPa e 35 Mpa, com o objetivo de avaliar o ganho de resistência e a eficiência do reforço. Para cada traço/resistência foram moldados 6 corpos de prova prismáticos, sendo 3 de referência, sem reforço, e 3 reforçados. Os CPs têm dimensões de 10x20x110cm e são armados com 4 barras longitudinais de 8mm e estribos de 5mm a cada 15cm, representando um modelo reduzido de vigas normalmente utilizadas em edificações de concreto armado. Os CPs foram moldados em usina concreteira para maior controle de qualidade do concreto e do processo de cura. Após a cura, foram aplicadas as mantas de PRFC externamente às peças reforçadas, utilizando-se resina epóxi apropriada. Finalizada a cura da resina epóxi, foram realizados os ensaios de flexão de 3 pontos em todos os CPs, com a respectiva aquisição de dados referentes aos deslocamentos, esforços e tensões, para cada CP. Os dados obtidos foram utilizados para elaborar curvas de Esforço x Deformação e para uma análise de fatores como a flecha, o ganho de resistência observado e a eficiência do reforço com PRFC para cada traço/resistência. Observou-se ganho de resistência, significativa diminuição das flechas e ausência total de fissuração para todos os CPs reforçados do programa experimental da atual pesquisa, o que demonstra a importante atuação das fibras de carbono no combate aos esforços de flexão.

**Palavras-chave:** Concreto Armado, Reforço estrutural, Retrofit, Fibra de Carbono.

## ABSTRACT

The Brazilian economic scenario and the large amount of obsolete properties, mainly in large urban centers, emphasize the need for research in the area of recovery and structural reinforcement. In this context, the present work presents a quantitative research on the external structural reinforcement to bending, that being the bottom face of the beams, using unidirectional layers of carbon fiber reinforced polymers (CFRP), in concretes of two different traits/strengths, 20 MPa and 35 MPa, aiming to evaluate the strength gain and the efficiency of the reinforcement. For each trait/strength, 6 prismatic specimens were molded, 3 of which were reference, without reinforcement, and 3 reinforced. The specimens dimensions are 10x20x110cm and they are reinforced with 4 longitudinal bars of 8mm and stirrups of 5mm every 15cm, representing a reduced model of beams normally used in reinforced concrete buildings. Specimens were molded in a concrete plant for greater quality and curing process control. After curing, CFRP blankets were applied externally to the reinforced specimens, using appropriate epoxy resin. Once the epoxy resin had cured, 3-point bending tests were carried out on all specimens, with the respective acquisition of data referring to displacements, forces and tensions, for each specimen. Obtained data were used to create Stress x Strain curves, in addition to discussing factors such as displacement, observed strength gain and CFRP reinforcement efficiency for each trait/strength. Strength gain, significant decrease in displacement and total absence of cracking were observed on all reinforced specimens in the experimental program of the current research, which demonstrates the important role of carbon fibers in combating bending/tension stress.

**Keywords:** Reinforced Concrete, Structural reinforcement, Retrofit, Carbon Fiber.



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Os maiores desafios enfrentados atualmente pela indústria da construção civil, variando da performance dos materiais às questões ambientais e de segurança, estão relacionados aos materiais e suas propriedades. O material estrutural mais utilizado hoje no mundo é o concreto e por isso vem sendo objeto de várias pesquisas no intuito de melhorar suas propriedades, visando maior resistência, durabilidade e eficiência. No que se refere às propriedades do concreto, estas variam de acordo com a escolha de cada elemento que o compõe, com a proporção entre eles, com a execução minuciosa da mistura, seu transporte, lançamento, adensamento e cura. A durabilidade de uma estrutura muitas vezes está relacionada à durabilidade do concreto.

Nos últimos anos, principalmente no Brasil, patologias como fissuras, deslocamento do concreto, corrosão das armaduras, dentre outras, se tornaram mais frequentes de serem vistas em estruturas de concreto armado. Não obstante, o surgimento de notícias sobre a ruptura de estruturas de concreto ficou mais frequente nos meios de comunicação. Há autores, como Menon (2008), que abordam sobre o pensamento equivocado da sociedade em acreditar que as estruturas de concreto são “eternas” e por isso não se realizam manutenções preventivas. Ainda segundo a mesma fonte, esse pensamento deve-se ao superdimensionamento dos sistemas construtivos utilizados que, por anos, resistiam aos agentes agressivos do ambiente em que se encontravam.

Nas figuras abaixo, pode-se observar dois tipos de patologias diferentes presentes nas estruturas. Na figura 1, tem-se um pilar com suas armaduras aparentes e corroídas, além de diversas fissuras ao longo da estrutura. Na figura 2, tem-se também a exposição da armadura, porém percebe-se que a força de arraste do rio carregou parte do concreto que envolvia os vergalhões, deixando diversos espaços vazios na junção da fundação com o pilar de sustentação da ponte.

Figura 1 - Corrosão da armadura em um pilar



Fonte: ASOPE Engenharia, (2018).

Figura 2 - Fissuras aparentes na estrutura de uma ponte em Raposo/MG



Fonte: Epitácio Pessoa/Estadão

Diante do exposto, aumentou-se o número de pesquisas relacionadas à manutenção, ao reforço e à recuperação (Retrofit) de estruturas de concreto, uma vez que, o surgimento de um número cada vez maior de patologias acarretou o questionamento da durabilidade e resistência do concreto, principalmente em ambientes agressivos, como por exemplo em regiões próximas ao mar. Ademais, sabe-se que o funcionamento adequado de estruturas de concreto é economicamente viável, ambientalmente sustentável e benéfico para toda sociedade.

No entanto, o elevado número de imóveis obsoletos, presentes principalmente nos grandes centros urbanos, enfatizam a necessidade da realização de pesquisas voltadas ao reforço e recuperação de estruturas, contribuindo para um maior entendimento das técnicas a serem utilizadas. Esses estudos se intensificaram nos últimos anos devido ao elevado custo de novas construções. Com isso, torna-se necessário a conservação e manutenção de obras existentes, buscando restabelecer as condições de uso para as quais foram projetadas ou a realização de adequações para novos usos.

Concomitantemente a essas pesquisas, o avanço da tecnologia em diversas áreas faz com que o surgimento de novos materiais e novas técnicas de fabricação sejam mais frequentes. Durante o período de Guerra Fria, 1947 a 1991, observou-se um crescimento e desenvolvimento sem precedente de infraestrutura no mundo, impactando inclusive na indústria da construção. Esses avanços possibilitaram a redução do tempo de construção, melhoria da estética, diversificação nos métodos construtivos, combinação de dois ou mais materiais com características mecânicas diferentes, economia financeira, melhor segurança em elementos estruturais, entre outras melhorias.

Nesse âmbito, a técnica de reforço estrutural à flexão com polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) vem ganhando espaço na indústria da construção civil, devido principalmente às propriedades desse material, como por exemplo: a elevada rigidez, o alto desempenho mecânico (principalmente resistência à tração), a leveza, a resistência à corrosão e a facilidade de aplicação.

Segundo Ferrari (2007), no Brasil a primeira estrutura a receber o reforço estrutural com PRFC foi o viaduto de Santa Tereza, localizado em Belo Horizonte/MG, local de elaboração desta pesquisa. Em 1998, foram reforçadas com mantas de fibra

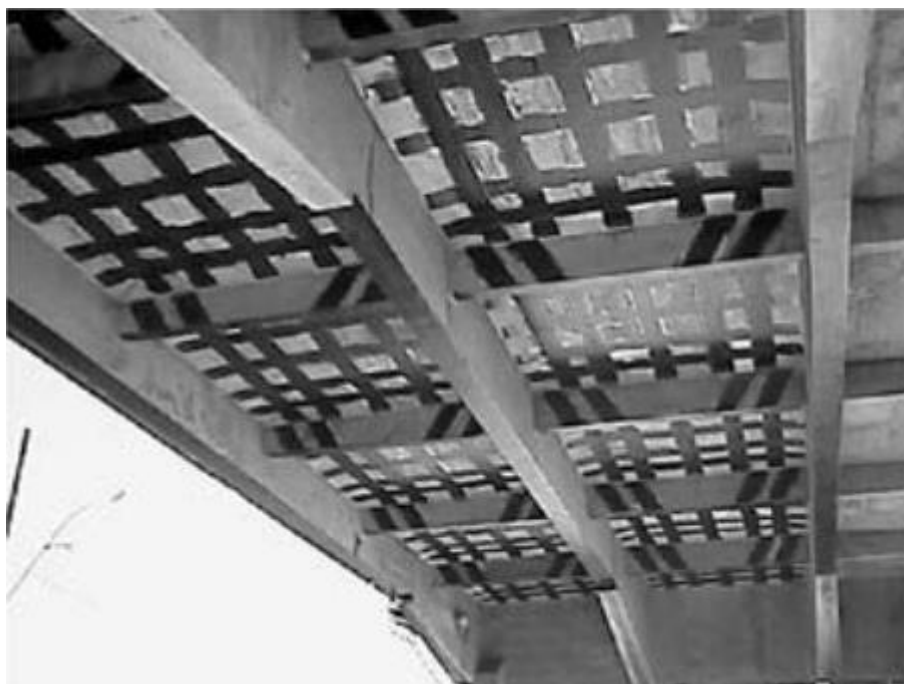
de carbono vigas longitudinais e transversais à flexão e ao cisalhamento e os panos das lajes à flexão.

O reforço com fibra de carbono do viaduto de Santa Tereza foi necessário, principalmente, devido ao aumento das cargas atuantes na estrutura ao longo dos anos. Em 1929, quando o viaduto foi construído, a carga nominal por roda de um caminhão era de 3 toneladas, valor muito inferior ao normativo atual de 7,5 toneladas, para o trem tipo classe 45.

Segundo Beber (2003), a escolha por mantas de fibra de carbono foi motivada por aspectos estéticos, devido ao fato de o viaduto ser tombado pelo patrimônio histórico. As fibras de carbono causam pouco ou nenhum impacto visual, principalmente pelo fato de não aumentarem significativamente o volume dos elementos estruturais e possibilitarem um bom acabamento posterior.

A Figura 3 ilustra o reforço aplicado às lajes e vigas do viaduto de Santa Tereza, antes do acabamento.

Figura 3 - Reforço com mantas de fibra de carbono no Viaduto de Santa Tereza



Fonte: Machado (2006).

## **1.2 Problema de Pesquisa**

Considerando-se o interesse do meio acadêmico e da indústria da construção civil em compreender a técnica, sua utilização e real eficiência de sua aplicação no reforço à flexão de elementos estruturais, apresenta-se o problema de pesquisa que se pretende examinar, discutir e responder neste estudo:

Qual a eficiência do reforço com polímeros reforçados com fibra de carbono, de elementos estruturais (vigas) submetidos à flexão, em concretos de diferentes resistências?

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo Geral**

De acordo com a questão de pesquisa apresentada aqui, propõe-se o seguinte objetivo geral para o estudo:

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a eficiência do reforço à flexão de vigas de concreto armado com duas resistências características ( $f_{ck}$ ), utilizando-se polímeros reforçados com fibra de carbono colados à face tracionada dos elementos.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Em consonância com o problema de pesquisa e o objetivo geral apresentados anteriormente, propõe-se os seguintes objetivos específicos para o estudo:

- Elaboração de curvas Esforço x Deformação;
- Avaliação do módulo de elasticidade;
- Avaliação comparativa das flechas;
- Avaliação visual e comparação do padrão de fissuração dos elementos de referência vs elementos reforçados.

#### **1.4 Justificativa**

A importância deste estudo se dá pela necessidade crescente da inserção de novas tecnologias às técnicas de construção, manutenção e reforço de estruturas existentes. A absorção de novas técnicas, principalmente na indústria da construção civil brasileira, é lenta e dispendiosa, levando à utilização de técnicas de baixa qualidade, que causam maior retrabalho, necessidade de manutenções periódicas e impactos ambientais e sociais.

O estudo evidencia os pontos positivos de utilização do reforço estrutural à flexão com mantas de fibra de carbono, o que traz uma melhor e mais ampla compreensão do assunto ao meio acadêmico e profissional, de forma a contribuir-se para a absorção da técnica pelo mercado brasileiro.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo tem como objetivo prover embasamento teórico à pesquisa, com a apresentação de fatos científicos sobre o assunto, evidenciando propriedades e características dos materiais utilizados e a posição de outros autores sobre o assunto proposto.

### 2.1 O Concreto

Nos primórdios da civilização, período Neolítico e início da Idade do Bronze (entre os anos 8000 a 4000 A.C.) as construções eram feitas com pedras. Eram monumentos que tinham a função de templos ou câmaras mortuárias. Durante o Império Egípcio (3000 a 1000 A.C.), a primeira grande construção em pedras ocorreu com a pirâmide escalonada (figura 4), considerada a primeira grande obra de concreto natural (rochas calcárias), projetada pelo primeiro arquiteto da humanidade Imhopet, o Faraó Djoser (BUNDER, 2016).

Figura 4 - Pirâmide Escalonada



Fonte: Ensinar História (<https://ensinarhistoria.com.br/sacara-onde-o-egito-antigo-e-mais-antigo/>)

Em meados de 800 antes de Cristo, na Grécia antiga, as construções eram compostas por tijolos de barro ou de pedras. Essa última era assentada com argila ou

diretamente umas sobre as outras e reforçadas com madeira. Entretanto, no templo Parthenon, as pedras eram precisamente assentadas sem argamassa, com grampos ou tarugos de ferro para os vedos. Já os pilares eram de madeira e faziam junção de sua composição. Esse conjunto já fazia alusão ao sistema moderno de pilares, vigas e lajes utilizados hoje.

Em 300 antes de Cristo, no Império Romano, surge de fato a concepção do concreto. O concreto romano era composto de agregados como cacos de pedras calcárias como mármore, areia, cal, Pozzolana e água. A pozzolana é um material silicioso (rocha) de origem vulcânica encontrada em abundância na época, em Pozzuoli, região do vulcão Vesúvio.

Uma das primeiras aplicações conhecidas foi na construção de aquedutos e muros de contenção de água, construídos pelos romanos (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Outra obra de expressividade foi o Panteão de Roma, que até 1912 era a estrutura com maior vão livre, com cerca de 44 metros. Essa construção tratava-se de um concreto obtido com a mistura de cal hidratada com argila pozzolânica. Nessa cúpula, o contraventamento dos esforços horizontais na base era feito com paredes estáveis e estruturais de 6 metros de largura. Utilizaram diferentes tipos de agregados, dentre eles: calcário, carvão, tijolos e pedra pome. As formas eram de bronze com caixões tipo “cubetas”, reduzindo assim o peso do material (HELENE; ANDRADE, 2010).

Entre os séculos V e XV, durante a Idade Média, pouco se evoluiu em tecnologia construtiva do ponto de vista do concreto. Entretanto, durante a Revolução Industrial, em 1818 na França, o Engenheiro Louis Joseph Vicat publicou estudos e conclusões com base em experimentos abordando a capacidade de endurecimento da argamassa sob a adição de água e desenvolveu um método para determinar o tempo de pega e endurecimento do cimento, baseado na penetração de uma agulha numa amostra de pasta de cimento fresco por meio de um aparelho de sua autoria denominado Aparelho de Vicat, apresentado na figura 5 abaixo (BUNDE, 2016).



Figura 5 - Aparelho de Vicat



Fonte: SOLOTEST (<https://solotest.com.br/>)

Vicat também projetou, em 1822, a primeira ponte de cimento artificial do planeta, sem pozolana em suas fundações, com extensão de 180 metros e 7 vãos de 22 metros, sem armação, utilizando apenas concreto. Na figura 6, pode-se observar essa estrutura.

Figura 6 – Ponte de Souillac



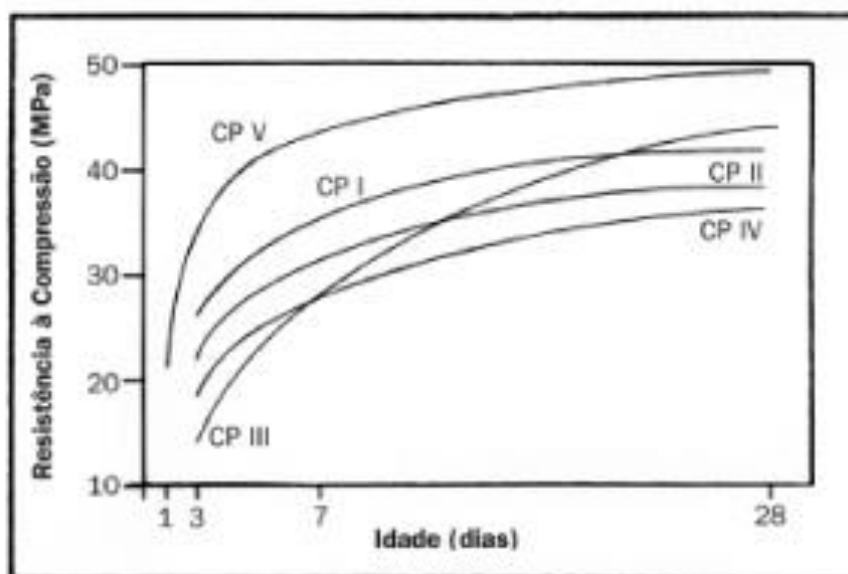
Fonte: Structurae (<https://structurae.net/en/structures/souillac-bridge>)

Já no século XIX, na Inglaterra, Joseph Aspdin descobriu o cimento Portland. Ele obteve o material queimando argila e calcário moídos em altas temperaturas, porém a forma como é produzido hoje não segue mais esse procedimento. Nesses primeiros anos de criação, o cimento Portland não foi muito utilizado mesmo nos

países mais desenvolvidos da época, Estados Unidos, França e Inglaterra. O cimento atual é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland com adições de gesso e, eventualmente, escória básica de alto-forno, pozolana e/ou filer carbonático.

Atualmente, possuímos 5 clases de cimento sendo elas: CPI (Cimento Portland Simples), CPII (Cimento Portland Composto), CPIII (Cimento Portland de Alto-forno), CPIV (Cimento Portland Pozolânico), CPV (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial ARI). O CPII possui três subdivisões: E, Z e F sendo Escória, Pozolana e Filer respectivamente. A Figura 7 apresenta um gráfico que mostra a evolução da resistência do cimento em relação ao passar dos dias. Ressalta-se que, a resistência do concreto depende da escolha do cimento e de sua respectiva resistência e propriedades.

Figura 7 – Gráfico de Resistência à Compressão (MPa) x Idade (dias)

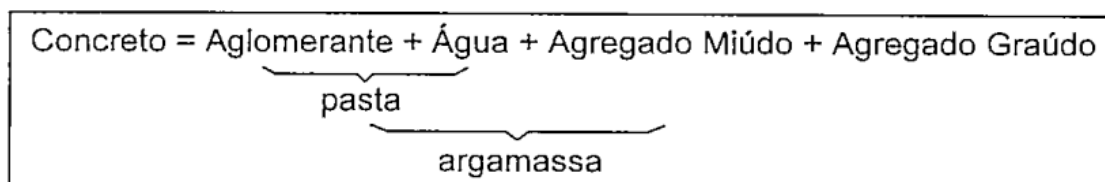


Fonte: NBR12655:2006

Em 1830, na Europa, o termo concreto foi estabelecido para uma massa sólida em que o cimento, areia, água e pedra são combinados. Segundo Mehta e Monteiro (2014), estima-se que o consumo atual de concreto no mundo seja da ordem de 11 bilhões de toneladas ao ano.

O concreto é um material heterogêneo basicamente composto por cimento, agregados miúdos (areias), agregados graúdos (britas ou pedras) e água. O traço do concreto varia de acordo com as propriedades desejadas, sendo possível acrescentar-se aditivos à mistura quando se busca melhorar certa propriedade (Bronze, 2016). Na figura 8 abaixo, temos um esquema representando todos os componentes do concreto. Percebe-se por ela que o concreto nada mais é que uma argamassa com agregado graúdo.

Figura 8 - Componentes do concreto



Fonte: (CLÍMACO, 2008)

As principais características do concreto são plasticidade no estado fresco e resistência mecânica e durabilidade, quando endurecido. Segundo Gasparini (2017), para obter-se uma massa de concreto que atenda a tais características, deve-se realizar o adequado dimensionamento dos componentes, conhecendo-se as características de cada um e sua influência sobre a mistura. É nesse princípio que se enquadra a dosagem do concreto.

Devido à sua grande versatilidade de moldagem e utilização, bem como a excelente relação custo-benefício, o concreto é utilizado como principal material de construção nas mais variadas atividades da indústria da construção civil, mesmo quando existe possibilidade de uso de outros materiais, como o aço e a madeira (Rocha, 2005).

No que se refere às propriedades do concreto, estas variam de acordo com a escolha de cada elemento que o compõe, a proporção entre eles, a execução minuciosa da mistura, seu transporte, lançamento, adensamento e cura. A durabilidade de uma estrutura muitas vezes está ligada a durabilidade do concreto.

A proporção dos elementos constituintes do concreto, denominada como traço, pode ser definida como uma receita a ser seguida para se obter uma resistência ou plasticidade específica. O traço define a quantidade de areia e de brita que devem ser usadas na mistura para uma unidade de cimento. Por exemplo: 1:2:3, significa que será uma unidade de cimento por duas unidades de areia e três unidades de brita, sempre obedecendo essa ordem. A quantidade de água varia dependendo da umidade da areia e da trabalhabilidade final do concreto e é denominada fator água/cimento.

A dosagem pode ser feita de forma prática ou racional. A primeira medida em volume, baseia-se apenas na experiência do profissional técnico. Ela é indicada para concretos de resistência moderada aplicados em pequenas construções. Já a segunda, a dosagem racional, medida em massa, é exercida por concreteiras especializadas que atendem obras médias a grande porte.

O concreto com função estrutural pode aparecer de forma simples, como por exemplos em blocos, de forma armada, resultante da junção do concreto simples com barras de aço com a perfeita aderência entre ambos, ou de forma protendida, barras de aço pré-tracionadas envoltas pelo concreto.

A principal norma relacionada ao concreto de cimento Portland é a NBR12655 que aborda sobre o preparo, controle e recebimento desse material nos canteiros de obra. Ela aborda sobre as classes de agressividade ambiental, apresentadas na figura 9, que por meio do tipo de ambiente obtém-se o risco de deterioração da estrutura e a agressividade.

Figura 9 - Classes de agressividade ambiental

Tabela 6.1 – Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <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: NBR12655:2006

A partir da classe de agressividade e utilizando a tabela da figura 10, da NBR 6118 (ABNT, 2014), é possível encontrar a relação água cimento.

Figura 10 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Tabela 7.1 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

Concreto <sup>a</sup>	Tipo <sup>b, c</sup>	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	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 NBR 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 protendido.

Fonte: NBR6118:2014

Com a informação sobre a relação água/cimento em massa, utiliza-se a tabela da figura 11, para obter-se o valor mínimo de  $f_{ck}$ .

Figura 11 - Requisitos para o concreto, em condições especiais de exposição

Condições de exposição	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal	Mínimo valor de $f_{ck}$ (para concreto com agregado normal ou leve) MPa
Condições em que é necessário um concreto de baixa permeabilidade à água	0,50	35
Exposição a processos de congelamento e descongelamento em condições de umidade ou a agentes químicos de degelo	0,45	40
Exposição a cloretos provenientes de agentes químicos de degelo, sais, água salgada, água do mar, ou respingos ou borrifação desses agentes	0,40	45

Fonte: NBR12655:2006

Também é possível obter-se o valor do cobrimento nominal (mm) para cada tipo de componente e seu respectivo tipo de estrutura como vemos na figura 12 a seguir:

Figura 12 - 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 (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV <sup>c</sup>
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje <sup>b</sup>	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo <sup>d</sup>	30		40	50
Concreto protendido <sup>a</sup>	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

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

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

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

<sup>d</sup> No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal  $\geq 45$  mm.

Fonte: NBR6118:2014

Essas são algumas informações normativas necessárias para se obter um concreto seguro, resistente e econômico para diversos elementos estruturais como pilares, vigas e lajes. É extremamente importante que se siga todos os procedimentos de verificação, classificação, cálculos presente na norma. Além disso, as normas sofrem alterações e atualizações com o passar do tempo devido ao surgimento de novas tecnologias, materiais e métodos de produção e execução, além de mudanças em critérios como o peso unitário de veículos típicos como mencionado anteriormente. As normas citadas acima, NBR6118 e NBR12655 são exemplos disso.

A norma NBR6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento passou por revisão coordenada pela CE-002:124.015 – Comissão de Estudo de Estruturas de Concreto-Projeto e Execução do Comitê Brasileiro da Construção Civil (ABNT/CB/02) no ano de 2022. Nessa comissão fizeram parte: representantes de

universidades, entidades do setor e profissionais da área. Eles preparam um texto final para a norma substituta a fim de cancelar a norma em vigor. Esse texto é enviado a ABNT, que posteriormente o coloca em consulta pública para posterior aprovação. As principais mudanças dessa norma foram a avaliação de conformidade do projeto e o uso indiscriminado do controle rígido dos cobrimentos. Não obstante, foi alterado a fórmula para resistência a tração. Na norma de 2014, utiliza-se a equação 1 e a nova norma utiliza-se a 2.

$$f_{ct,m} = 2,12 \text{ Ln} (1 + 0,11f_{ck}) \quad (1)$$

$$f_{ct,m} = 2,12 \text{ Ln} [1 + 0,1(f_{ck} + 8)] \quad (2)$$

Houve mudança no valor do coeficiente de aderência ( $\eta_1$ ) que atualmente é definido em função do tipo de superfície (lisa, entalhada e nervurada) e que passa a ser em função da categoria do aço e toma os seguintes valores apresentados na figura 13:

**Figura 13 - Novos valores de  $\eta_1$**

Categoria do aço	$\eta_1$
CA-25	1,00
CA-50	2,25
CA-60	1,00

Fonte: Prado (2022)

No item 8.2.10.1- compressão, houve alteração no que diz respeito ao acréscimo de um fator  $\eta_c$  conforme mostrado na figura a seguir. Esse item aborda os diagramas tensão-deformação de compressão do concreto. O  $\eta_c$  toma valores iguais a 1 para concretos de  $f_{ck}$  menor ou igual a 40 Mpa e utiliza-se a equação 4 para determinar para concretos com  $f_{ck}$  acima de 40 Mpa.

$$\sigma_c = 0,85\eta_c * f_{cd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^\eta \right]$$



$$\eta_c = \left(\frac{40}{f_{ck}}\right)^{1/3}$$

Sendo:

$\sigma_c$  = tensão à compressão no concreto

$\varepsilon$  - deformação específica

Segundo Prado (2022), essa alteração é considerável pois reduz o valor de  $\sigma_c$  entre 10% (C55) a 24% (C90). No capítulo 20, referente ao detalhamento de lajes, item 20.1 - Prescrições gerais, limitou-se o espaçamento máximo para barras com diâmetro maior que 20 mm para 15 vezes o diâmetro da barra. Atualmente esse limite é igual a 20 cm. Outras alterações foram em relação ao concreto protendido, concreto com armaduras ativas, as quais recebem uma pré-tensão antes da cura do concreto.

Algumas mudanças da NBR6118, como por exemplo alterações apresentadas no capítulo 20, trazem a necessidade de que ocorram intervenções em estruturas já executadas de forma que essas se tornem mais seguras. Essas intervenções podem ser feitas com reforços ao longo da estrutura existente como a utilização do PRFC, atendendo assim os novos padrões de segurança.

## 2.20 Concreto Armado

Em 1849, Joseph Monier desenvolveu o primeiro conceito de concreto armado, reforçando o concreto com aço. Monier percebeu que uma grande deficiência do concreto simples era em relação a esforços de tração. Assim, resolveu combinar a resistência à tração do aço com as particularidades de resistência do concreto, sua resistência à compressão. Ele armou cubos e tubos e os preencheu com concreto (REGANATI, 2020).

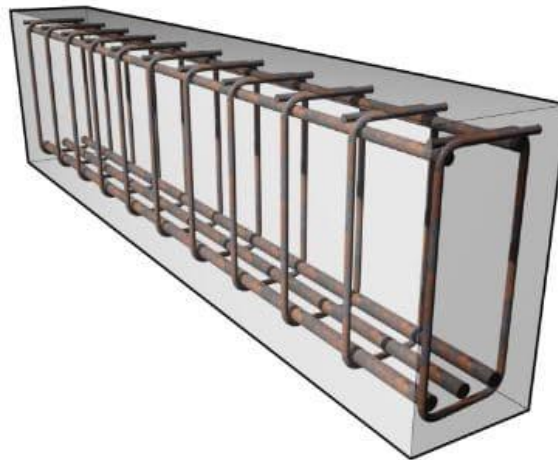
Sua patente foi comprada por Gustav Adolf Wayss que desenvolveu e impulsionou a ideia com sua empresa Wayss & Freytag a partir de 1875, empresa que teve grande influência no Brasil, Uruguai e Argentina em meados de 1900. (HELENE; ANDRADE, 2010). Porém, em 1878, Thaddeus Hyatt patenteia nos Estados Unidos o concreto armado e constrói em 1893 o primeiro edifício na Califórnia.

Em 1901, o Engenheiro e Professor Emil Morsh, realizou uma série de publicações de artigos estabelecendo bases científicas do concreto armado. Esse conhecimento possibilitou que naquele mesmo ano fosse construído o primeiro edifício de concreto armado, construído com pilares, vigas e lajes, com sete pavimentos destinados à instalação da empresa e da residência de François Hennebique. No Brasil, o primeiro arranha-céu construído foi o Edifício Sampaio Moreira com 50 metros de altura, construído em São Paulo à Rua Líbero Badaró.

Contudo, no século XX com a expansão do uso do concreto armado, houve um aumento do número de acidentes e falhas construtivas decorrentes de projetos equivocados, falhas de execução e materiais de baixa qualidade. As primeiras publicações de normas de projeto e execução de estruturas em concreto armado ocorreram em 1903 na Suíça e na Alemanha, em 1906 na França, em 1907 na Inglaterra, em 1910 nos Estados Unidos e em 1931 no Brasil (BUNDER, 2016)

As estruturas de concreto armado são compostas basicamente por três principais elementos: vigas, lajes e pilares. Os dois primeiros são submetidos, na maioria dos casos, à flexão normal simples, flexão sem a presença de força normal. As vigas são elementos lineares, ou seja, seu comprimento longitudinal supera, no mínimo, três vezes a maior dimensão da seção transversal. A armação de uma viga é composta por armaduras longitudinais, que são barras de aço responsáveis, principalmente, pela resistência às tensões de tração provenientes da flexão, contribuindo também na resistência às tensões de compressão; e armaduras transversais, dimensionadas para suportarem aos esforços cortantes, denominados estribos. Na figura 14 a seguir pode-se observar as barras e os estribos montados para a concretagem da viga.

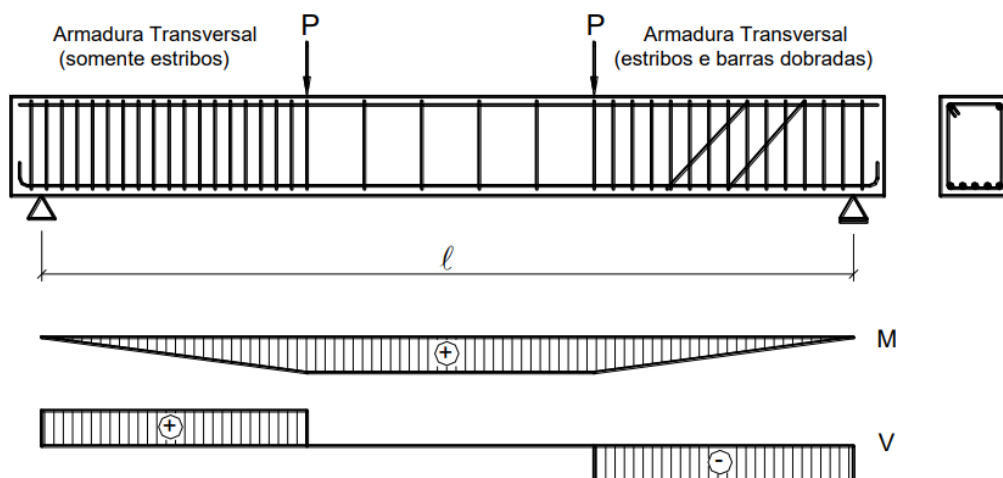
Figura 14 - Viga de concreto armado



Fonte: Meneghel (2022)

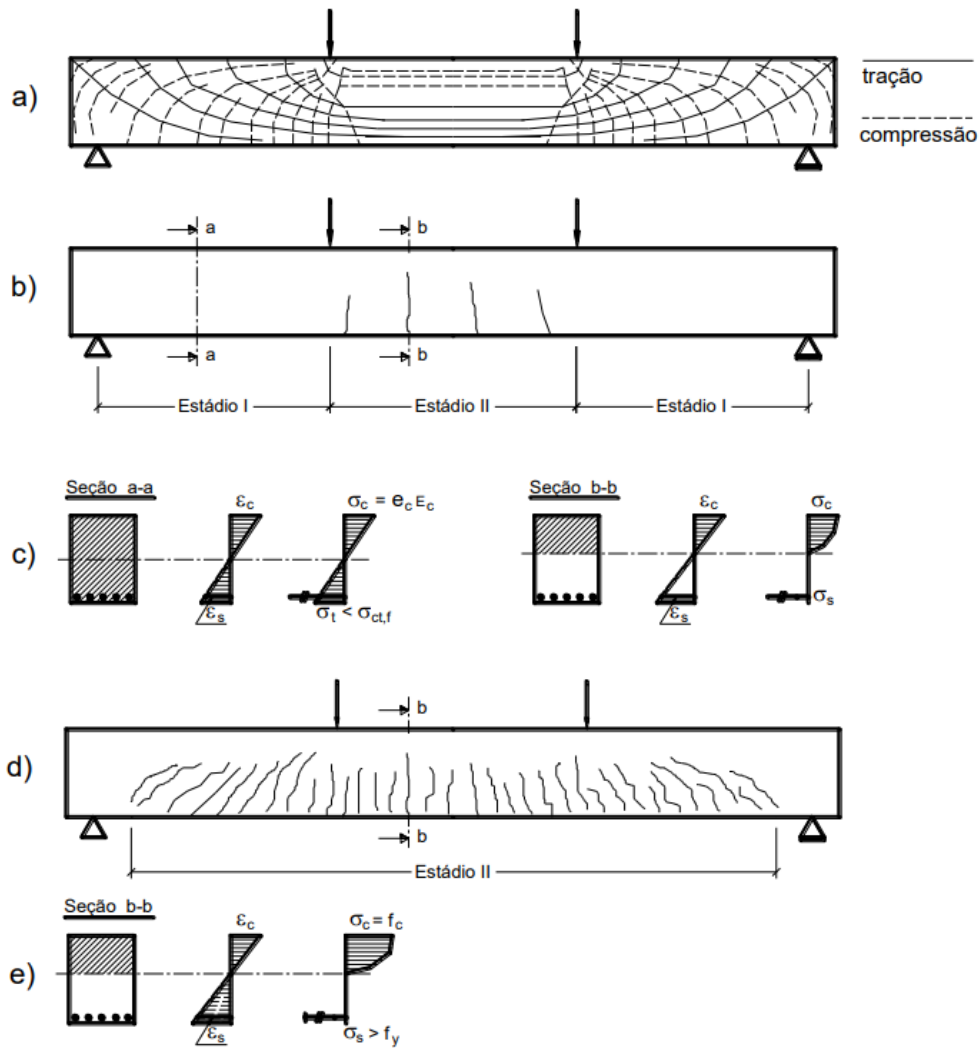
Na figura 15 a seguir, tem-se a representação de uma viga biapoiada submetida a duas forças concentradas  $P$  de igual intensidade e seu diagrama de momento fletor e força cortante. Já na figura 16 a), pode-se observar a trajetória das tensões principais de tração e compressão da viga. Observa-se que no trecho de flexão pura as trajetórias das tensões de compressão e de tração são paralelas ao eixo longitudinal da viga. Entretanto, nos outros trechos, devido a força cortante, as tensões são inclinadas.

Figura 15 - Viga biapoiada e diagramas de esforços solicitantes



Fonte: LEONHARDT e MÖNNIG (1982)

Figura 16 - Comportamento resistente de uma viga biapoada



Fonte: LEONHARDT e MÖNNIG (1982)

Em uma viga de concreto armado submetida a flexão simples, vários tipos de ruína são possíveis, entre as quais: ruínas por flexão; ruptura por falha de ancoragem no apoio, ruptura por esmagamento da biela, ruptura da armadura transversal, ruptura do banzo comprimido devida ao cisalhamento e ruína por flexão localizada da armadura longitudinal.

As vigas e outros elementos estruturais precisam atender aos Estados Limites de Serviço (ELS), que estão relacionados ao conforto do usuário e à durabilidade, aparência e boa utilização das estruturas. Em geral, o coeficiente de ponderação das ações para estados-limites de serviço é dado pela expressão:

$$\gamma_f = \gamma_{f2}$$

$\gamma_{f2}$  = tem valor variável conforme a verificação que se deseja fazer (veja figura 17)

$\gamma_{f2} = 1$  para combinações raras;

$\gamma_{f2} = \psi_1$  para combinações frequentes;

$\gamma_{f2} = \psi_2$  para combinações quase permanentes

Figura 17 - Valores do coeficiente  $\gamma_{f2}$

Ações		$\gamma_{f2}$		
		$\psi_0$	$\psi_1^a$	$\psi_2$
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas <sup>b</sup>	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas <sup>c</sup>	0,7	0,6	0,4
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

<sup>a</sup> Para os valores de  $\psi_1$  relativos às pontes e principalmente para os problemas de fadiga, ver Seção 23.  
<sup>b</sup> Edifícios residenciais.  
<sup>c</sup> Edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos.

Fonte: NBR6118:2014

O estado limite de serviço possui subdivisões dentre elas:

- ELS-F (estado-limite de formação de fissuras) – estado no qual inicia-se a formação de fissuras. Ele ocorre quando a tensão de tração máxima na seção transversal for igual a resistência à tração na flexão ( $f_{ct,f}$ );
- ELS-W (estado-limite de abertura de fissuras) – estado em que as fissuras possuem abertura iguais aos máximos especificados no item

13.4.2 na NBR 6118:2014. Segundo essa normativa, a abertura máxima característica  $w_k$  das fissuras quando não excede valores entre 0,2mm a 0,4mm sob ação das combinações frequentes, não tem importância significativa na corrosão das armaduras passivas. No caso das armaduras ativas, a possibilidade de corrosão é maior sob tensão. Assim, esses limites devem ser mais restritos e função direta da agressividade do ambiente, dada pela classe de agressividade ambiental. Na figura 18 a seguir, temos dados de valores-limites da abertura característica  $w_k$  das fissuras, como também, outras providências, visando garantir a proteção adequada das armaduras no quesito corrosão. No entanto, não se deve esperar que as aberturas de fissuras reais correspondam estritamente aos valores estimados na norma, pois fissuras reais podem eventualmente ultrapassar esses limites.

Figura 18 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	–
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D <sup>a</sup>	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D <sup>a</sup>	Combinação frequente

<sup>a</sup> A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com  $a_p = 50$  mm (Figura 3.1).

**NOTAS**

1 As definições de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2.

2 Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV, exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens.

3 No projeto de lajes lisas e cogumelo protendidas, basta ser atendido o ELS-F para a combinação frequente das ações, em todas as classes de agressividade ambiental.

Fonte: NBR 6118:2014

- ELS-D (estado-limite de descompressão) – estado onde em um ou mais pontos da seção transversal, a tensão normal é nula, não existindo tração no restante da seção;
- ELS-DP (estado-limite de descompressão parcial) – estado no qual é garantida a compressão na seção transversal, na região onde existem armaduras ativas;
- ELS-CE (estado-limite de compressão excessiva) – estado em que as tensões de compressão atingem seu máximo estabelecido no limite convencional. Sua utilização é comum na aplicação da protensão em concreto protendido;

- ELS-VE (estado-limite de vibrações excessivas) – estado onde se atinge os limites de vibrações para a utilização normal da construção.
- ELS-DEF (estado-limite de deformações excessivas) – estado em que as deformações se equiparam aos limites normativos. Na figura 19 a seguir, temos um recorte da tabela 13.3 da NBR 6118:2014 retratando os tipos do efeito juntamente com a razão da limitação, exemplos e o deslocamento limite permitido. A aceitabilidade sensorial está relacionada a vibrações indesejáveis ou efeito visual desagradável. Já os efeitos específicos têm relações aos deslocamentos que podem surgir impedindo a utilização adequada da construção. Esses deslocamentos podem ocorrer em elementos não estruturais causando o mesmo problema de mau funcionamento.



Figura 19 - Limites de deslocamentos

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$l/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	$l/350$
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	$l/250^a$
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	$l/350 + \text{contraflecha}^b$
			Ocorrido após a construção do piso	$l/600$
	Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com recomendação do fabricante do equipamento
Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	$l/500^c$ e 10 mm e $\theta = 0,0017 \text{ rad}^d$
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	$l/250^c$ e 25 mm
		Movimento lateral de edifícios	Provocado pela ação do vento para combinação frequente ( $\psi_1 = 0,30$ )	$H/1700$ e $H_f/850^e$ entre pavimentos <sup>f</sup>
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	$l/400^g$ e 15 mm

Fonte: NBR 6118:2014

Figura 20 - Continuação

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Efeitos em elementos não estruturais	Forros	Movimentos térmicos horizontais	Provocado por diferença de temperatura	$H/500$
		Revestimentos colados	Ocorrido após a construção do forro	$l/350$
		Revestimentos pendurados ou com juntas	Deslocamento ocorrido após a construção do forro	$l/175$
	Pontes rolantes	Desalinhamento de trilhos	Deslocamento provocado pelas ações decorrentes da frenagem	$H/400$
Efeitos em elementos estruturais	Afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas	Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-os ao modelo estrutural adotado.		
<p><sup>a</sup> As superfícies devem ser suficientemente inclinadas ou o deslocamento previsto compensado por contraflechas, de modo a não se ter acúmulo de água.</p> <p><sup>b</sup> Os deslocamentos podem ser parcialmente compensados pela especificação de contraflechas. Entretanto, a atuação isolada da contraflecha não pode ocasionar um desvio do plano maior que <math>l/350</math>.</p> <p><sup>c</sup> O vão <math>l</math> deve ser tomado na direção na qual a parede ou a divisória se desenvolve.</p> <p><sup>d</sup> Rotação nos elementos que suportam paredes.</p> <p><sup>e</sup> <math>H</math> é a altura total do edifício e <math>H_i</math> o desnível entre dois pavimentos vizinhos.</p> <p><sup>f</sup> Esse limite aplica-se ao deslocamento lateral entre dois pavimentos consecutivos, devido à atuação de ações horizontais. Não podem ser incluídos os deslocamentos devidos a deformações axiais nos pilares. O limite também se aplica ao deslocamento vertical relativo das extremidades de lintéis conectados a duas paredes de contraventamento, quando <math>H_i</math> representa o comprimento do lintel.</p> <p><sup>g</sup> O valor <math>l</math> refere-se à distância entre o pilar externo e o primeiro pilar interno.</p> <p><b>NOTAS</b></p> <p>1 Todos os valores-limites de deslocamentos supõem elementos de vão <math>l</math> suportados em ambas as extremidades por apoios que não se movem. Quando se tratar de balanços, o vão equivalente a ser considerado deve ser o dobro do comprimento do balanço.</p> <p>2 Para o caso de elementos de superfície, os limites prescritos consideram que o valor <math>l</math> é o menor vão, exceto em casos de verificação de paredes e divisórias, onde interessa a direção na qual a parede ou divisória se desenvolve, limitando-se esse valor a duas vezes o vão menor.</p> <p>3 O deslocamento total deve ser obtido a partir da combinação das ações características ponderadas pelos coeficientes definidos na Seção 11.</p> <p>4 Deslocamentos excessivos podem ser parcialmente compensados por contraflechas.</p>				

Fonte: NBR 6118:2014

Existem também os ELUs, estados-limites últimos, relacionados ao colapso ou ruína estrutural. Caso a verificação de estado-limite último não seja atendida em uma estrutura, é necessário que se determine a paralisação de uso. A segurança das

estruturas de concreto deve sempre ser verificada em relação aos seguintes estados-limites últimos segundo a NBR6118:2014:

- a) estado-limite último da perda do equilíbrio da estrutura, admitida como corpo rígido;
- b) estado-limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, devido às solicitações normais e tangenciais, admitindo-se a redistribuição de esforços internos, desde que seja respeitada a capacidade de adaptação plástica definida na Seção 14, e admitindo-se, em geral, as verificações separadas das solicitações normais e tangenciais; todavia, quando a interação entre elas for importante, ela estará explicitamente indicada nesta Norma;
- c) estado-limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, considerando os efeitos de segunda ordem;
- d) estado-limite último provocado por solicitações dinâmicas (ver Seção 23);
- e) estado-limite último de colapso progressivo;
- f) estado-limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, considerando exposição ao fogo, conforme a ABNT NBR 15200;
- g) estado-limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, considerando ações sísmicas, de acordo com a ABNT NBR 15421;
- h) outros estados-limites últimos que eventualmente possam ocorrer em casos especiais.

No caso do exemplo das figuras apresentadas anteriormente (figuras 15 e 16), o elemento atingiu o ELS-F, o estado em que se inicia a formação de fissuras. Esse estado-limite é atingido quando a tensão de tração máxima na seção transversal for igual a  $F_{ct,f}$ . No entanto, em um edifício com muitos pavimentos nem sempre é evidente identificar os esforços presentes em cada estrutura, como nas figuras 15 e 16.

“Quando é possível definir claramente qual viga serve de apoio e qual viga está apoiada em outra, a carga concentrada na viga que serve de apoio é igual a

reação de apoio daquela que está apoiada. Em determinados pavimentos, a escolha de qual viga apoia-se sobre qual fica muito difícil. A escolha errada pode se tornar perigosa. Para contornar este problema, pode-se calcular os esforços e deslocamentos de todas as vigas por meio de uma grelha, com o auxílio de um programa de computador. Desse modo, os resultados são excelentes e muito próximos aos reais.” (BASTOS, 2020)

### **2.3 Fibras Utilizadas no Reforço do Concreto Armado**

No concreto armado convencional, sem adição de fibras, quando são ultrapassados os Estados Limites Últimos (ELU) relacionados à flexão, rompe de forma repentina. Entretanto, quando se reforça o concreto com fibras de diferentes materiais, como por exemplo vidro e carbono, há uma tendência no aumento da capacidade de carga dos elementos. Em 1971, houve a primeira utilização de fibras no concreto para reforço estrutural. Foram construídos painéis de 3250mm<sup>2</sup> e 65mm de espessura e colocados na garagem de um estacionamento no aeroporto em Londres (MEHTA e MONTEIRO ,2008).

Fibras que tem alto módulo de elasticidade tem melhor desempenho como reforço estrutural e são denominadas macro fibras. Existem também fibras que possuem um baixo módulo de elasticidade denominadas microfibras que não são empregadas para reforço estrutural, uma vez que além de não gerarem resultados satisfatórios, seria necessário colocar altos teores de fibras, encarecendo o empreendimento e tornando-se inviável sua utilização. Elas são destinadas a outras finalidades como redução de fissuras (FIGUEIREDO, 2011). A quantidade de fibras utilizadas para reforçar a estrutura de concreto depende de qual objetivo deseja-se alcançar e principalmente das características dessa.

Segundo Figueiredo (2011), a eficiência das fibras está diretamente relacionada ao seu desempenho como ponte de transferência de tensão na fissura do concreto. A capacidade de reforço depende do teor de fibras adicionadas a mistura. Assim, quanto maior o teor adotado, maior será o número de fibras exercendo o trabalho de ponte de transferência de tensão. Com isso, o reforço pós fissuração também aumenta. A geometria e a resistências das próprias fibras também influenciam no desempenho final. Shah analisando Mehta e Monteiro (2008, p.520), destrincha a tenacidade em concreto reforçado com fibras:

“O compósito suportará cargas cada vez maiores após a primeira fissura da

matriz, caso a resistência das fibras ao arrancamento na primeira fissura for maior do que a carga na primeira fissuração; [...] em uma seção fissurada, a matriz não resiste a nenhuma tensão e as fibras suportam toda a carga do compósito. Com uma carga cada vez maior sobre o compósito, as fibras tendem a transferir a tensão adicional para a matriz através de tensões de aderência. Se as tensões de aderência não excederem a resistência de aderência, então pode haver fissuração adicional na matriz. Esse processo de fissuração múltipla continuará até que haja rompimento das fibras ou até que o escorregamento local acumulado leve ao arrancamento da fibra.”

Atualmente, os três tipos de materiais mais utilizados na fabricação de fibras para o concreto são: aramida, vidro e carbono. Porém, existem fibras de poliéster, sintética, celulose, amianto, sisal e fibras vegetais. As fibras de vidro e polímero são classificadas como sintéticas, enquanto as metálicas são feitas com aço. Abaixo, temos a ilustração de algumas dessas:

Figura 21 - Fibras para concreto



Fonte: Aoki (2010)

Entre os três tipos, a mais comercializada é a fibra de aramida, porém todos os tipos têm a mesma funcionalidade.

As fibras de aço são filamentos de aço descontínuos produzidos especificamente para o uso em reforço com a função de aumentar a resistência residual pós-fissuração do concreto, tornando-o mais dúctil. São empregadas em peças delgadas e moldadas em concretos de ultra resistência, concretos de pós-reativos, em aplicações muito específicas.

Figura 22 - Fibra de aço



Fonte: Guimarães ATC

Podem ser obtidas de três formas: extraídas de chapas de aço, de lã de aço ou obtidas por meio de arame trefilado. Por ter uma característica de alto módulo de deformação, as fibras de aço possuem alta resistência a fissurações ocorridas por retração (ANAPRE, 2012). De acordo com a NBR 15530:2007, elas são basicamente, caracterizadas e classificadas pelos seguintes parâmetros:

- comprimento
- diâmetro equivalente
- fator de forma
- limite de resistência à tração

Tais parâmetros variam de acordo com os seguintes critérios:

- Quanto à conformação da fibra ou sistema de ancoragem (geometria)

- Tipo A: com ancoragem nas extremidades
  - Tipo C: corrugada
  - Tipo R: reta (sem ancoragem nas extremidades)
- Quanto ao processo de produção
- Classe I: oriunda de arame trefilado a frio;
  - Classe II: oriunda de chapa laminada cortada a frio;
  - Classe III: oriunda de arame trefilado e escarificado
- Disposição das fibras
- Soltas: fibras dispostas de forma separada ou unitariamente;
  - Coladas: fibras dispostas na forma de pentes colados ou unidas entre si por uma cola solúvel em água;
- Tipo de revestimento
- Polidas (ou bright): fibras de aço sem revestimento metálico;
  - Galvanizadas: fibras de aço galvanizado
- Tipo de material
- Aço carbono: baixo, médio ou alto teor de carbono;
  - Aço inoxidável

A resistência mecânica mínima das fibras de aço depende da geometria e da classe da fibra, conforme apresentado na figura a seguir. De acordo com o tipo de geometria e classe da fibra, obtemos o limite de resistência à tração do aço.

Figura 23 - Resistência mecânica mínima do aço

Tipo (geometria)	Classe da fibra(+)	Limite de resistência à tração do aço fu MPa (*)
A - Com ancoragem nas extremidades	I	1000
	II	500
C - Corrugada	I	800
	II	500
	III	800
R - Reta (sem ancoragem nas extremidades)	I	1000
	II	500

(\*) Esta determinação deve ser feita no aço, no diâmetro equivalente final imediatamente antes do corte.

(†) Para as fibras de classe I e III, o ensaio deve ser realizado no fio, com o diâmetro final da fibra conforme ABNT NBR 6207. Para as fibras de classe II, o ensaio deve ser realizado na chapa conforme a ASTM A 370.

Fonte: ANAPRE CF003/2012

As fibras de aço utilizadas como reforço do concreto são protegidas da corrosão pelo meio alcalino do concreto. Nas estruturas convencionais com barras, o cobrimento mínimo fica entre 30 e 40 mm, enquanto nas fibras basta 1 a 2 mm para a sua proteção efetiva.

A fibra de aramida ou Kevlar é uma fibra sintética da família da Poliamida com composição química e propriedades únicas, resistência mecânica e ao impacto, leveza e fadiga. São compostas por materiais orgânicos aromáticos sintéticos, constituídos por carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio e são resultantes da extrusão e trefilação de um tipo de nylon, cuja estrutura molecular é formada por cadeias de benzeno e aramida (CARNEIRO E TEIXEIRA, 2008). A seguir temos um recorte da fibra de aramida, como demonstrado na figura 24.



Figura 24 - Fibra de aramida



Fonte: Autor desconhecido

Ademais, é extremamente resistente ao calor e seu maior diferencial é a possibilidade de interação com matrizes poliméricas diversas, formando compósitos super-resistentes. A composição da fibra de aramida com variados polímeros, termofixos e termoplásticos pode resultar em compósitos que chegam a ser 7 vezes mais resistentes que o aço (GAMA; COSTA; SILVA JUNIOR, 2019). Na figura 25, observa-se diversas propriedades dessa fibra.

Figura 25 - Propriedades da fibra de aramida

Propriedade	Unidade	Aramida (Amarela)
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	1,44
Elongação até a ruptura	%	2,7
Módulo de Elasticidade	GPa	107
Resistência à Tração	MPa	2950
Condutividade Elétrica	-	Não condutor
Resistência aos álcalis	-	Média resistência
Resistência aos ácidos	-	Média resistência
Efeito ao calor	-	Decompõe-se a > 480°C
Resistência à abrasão	-	Alta resistência

Fonte: TEXIGLASS, 2022

Além de ser uma fibra ecologicamente segura, não é uma fibra tóxica. Em situações no qual ela é tratada termicamente em temperaturas superiores a 120°C, o acabamento da fibra pode evaporar-se ou decompor-se. Por não conduzir

eletricidade, é ideal para aplicação em trabalhos subaquáticos. O compósito formado pela fibra de aramida e a resina epóxi é a única opção quando o assunto é reforço junto às linhas de transmissão ou de comunicação, não oferecendo interferências eletromagnéticas às ondas de rádio e de instrumentação. (GAMA; COSTA; SILVA JUNIOR, 2019)

As fibras de vidro também auxiliam no controle de retração e exsudação do concreto, pois tem módulo de elasticidade muito alto, sendo sua densidade a grande diferença em relação à fibra de aramida. Enquanto a fibra de vidro para concreto apresenta densidade de 2,65 g/cm<sup>3</sup>. Com isso emprega-se uma quantidade muito maior de fibra de vidro e aço para o concreto do que as fibras de aramida devido à determinação das dosagens serem em massa. Na imagem abaixo, tem-se alguns parâmetros da fibra de vidro fornecidos pela FIBROTEC, sendo a fibra do tipo roving CPIC400:

Figura 26 - Especificação da fibra utilizada

Módulo de Elasticidade	30-55 GPa
Deformação	2-4,5 %
Resistência última	517-1207 MPa

Fonte: Silva, Cardoso e Barbosa (2018)

As microfibras de vidro são obtidas em um processo de fusão sílica. Apesar de serem muito usadas na indústria automobilística, são indicadas para uso em conjunto com o concreto usinado nas obras de pisos com a utilização de telas soldadas. A figura 27 a seguir ilustra como são as fibras de vidro empregadas na construção civil (AOKI, 2010).

Figura 27 - Detalhe da Fibra de vidro reforçando o concreto



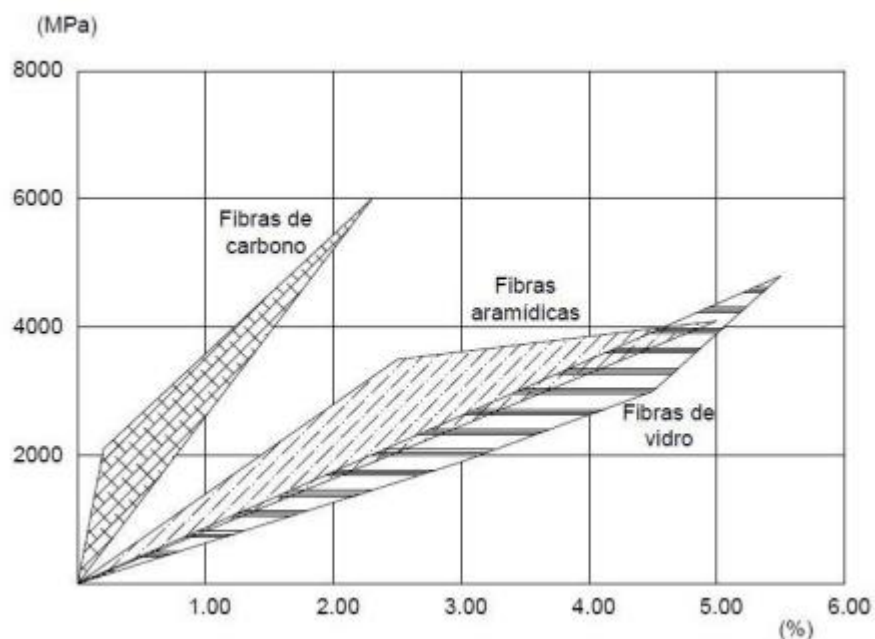
Fonte: Autor desconhecido

No entanto, as fibras de vidro possuem baixo módulo de elasticidade se comparadas às fibras de aramida e aço. Também apresentam suscetibilidade à ruptura por fluência e a reduzida resistência à humidade e a ambientes alcalinos. Estas fibras se dividem em E (eletrical), C (Chemical) e S (high tensile strength). O tipo E apresenta maior generalização de seu uso pois se comparado aos outros, é o que possui maior resistência mecânica e à agentes agressivos, além de ter boas propriedades de isolamento elétrico. (FIGUEIRA, apud FIORELLI, 2002)

Antigamente, as fibras para concreto eram utilizadas exclusivamente para evitar retração ou reforçar a resistência mecânica. Porém, atualmente, foram incorporadas diversas outras aplicações, como por exemplo, o uso de fibras de polipropileno em concretos submetidos a temperaturas elevadas ou com grande risco de incêndio. Neste caso, a extinção das fibras dá origem a diversos canais interligados na massa de concreto, que aliviam a pressão interna gerada pelo vapor d'água e evitam o deslocamento (AOKI, 2010).

Como apresentou-se anteriormente, há uma gama de produtos que podem ser implementados e a escolha varia em função de suas características mecânicas à tração (módulo de elasticidade, tensão e extensão de ruptura). Na figura 28 abaixo, temos o gráfico que apresenta um diagrama comparativo das propriedades à tração dos três tipos de fibras mencionados. Percebe-se pela interpretação do diagrama que a que possui o melhor desempenho é a fibra de carbono que será apresentada ao decorrer deste trabalho.

Figura 28 - Diagrama comparativo das propriedades à tração das fibras de carbono, aramida e vidro

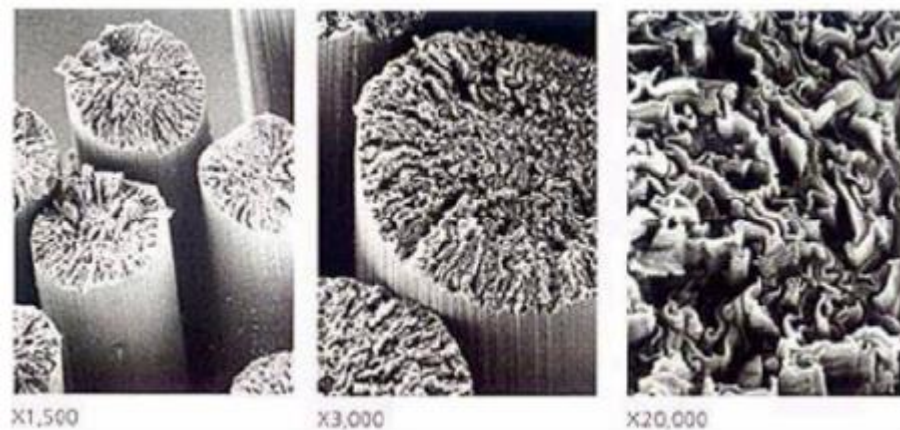


Fonte: (Paula, 2003)

## 2.4 Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono

De acordo com Gribniak *et al.* (2017), os PRFCs são materiais com propriedades mecânicas excepcionais e qualidade consistente, pois são produzidos sob processos altamente controlados e, portanto, não influenciáveis pela variabilidade natural de propriedades intrínsecas aos materiais. A figura 29 apresenta imagens de fibras de carbono.

Figura 29 - Fibras de carbono



Fonte: (Luca, 2006)

São vários os processos utilizados para fabricação e, as propriedades das fibras de carbono produzidas dependerão do material base usado. De acordo com Hanna *et al.* (2011), atualmente as fibras de carbono são predominantemente fabricadas a partir de precursores de poliacrilonitrila. Quanto mais elevada a temperatura durante o processo de fabricação, maiores os valores do módulo de elasticidade e, conseqüentemente, maior o custo do material (MACHADO, 2002).

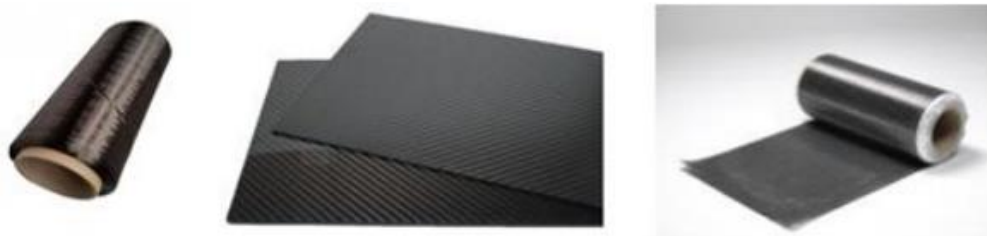
As fibras de carbono são produto de um processo de oxidação de fibras orgânicas precursoras, tais como a poliacrilonitrila, ou com base no alcatrão derivado do petróleo e do carvão, seguido do processamento em ambiente inerte a elevadas temperaturas (cerca de 1500°C), pelo qual o polímero torna-se muito fino e dá origem à fibra de carbono. Quando este processamento ocorre sob temperaturas próximas a 3000°C, são obtidas fibras de grafite. O produto apresenta elevadíssima resistência mecânica, devido ao alinhamento dos átomos de carbono ao longo da fibra precursora que ocorre durante o processo térmico. O módulo de elasticidade do material resultante varia de 100GPa a 300GPa para as fibras de carbono e até 650GPa para as fibras de grafite. Quanto maior o módulo de elasticidade, mais o preço material, sendo a fibra de grafite cerca de 15 a 20 vezes mais cara que a fibra de carbono (MACHADO, 2006).

Os compósitos de fibras de carbono estão comercialmente disponíveis em inúmeras formas, sendo as principais: tecidos, chapa pultrudadas e fios. Um

compósito é constituído pela união de determinados materiais não solúveis entre si para formar um produto com qualidade superior. A matriz do compósito é uma fase contínua que envolve a denominada de dispersa. Os compósitos fibrosos podem ser um metal, um polímero ou uma cerâmica.

A escolha varia de acordo com a necessidade de cada projeto, em função de parâmetros como: direção das cargas aplicadas, facilidade de conformação em superfícies, custo e processo de manufatura (FIORELLI, 2002). De acordo com Menacker (2021), parafraseando (BEBER et al., 1999 apud SERRA E SILVA, 2019), os tecidos são colados na superfície com uma resina epóxi com espessura semelhante à de uma parede, os fios são colados na superfície do concreto sob tensão ou a seca e as mantas são coladas nas superfícies do concreto por meio de adesivo na forma de perfis contínuos. Na figura 30, são apresentados os três sistemas de reforços aplicados na confecção de compósitos com fibra de carbono.

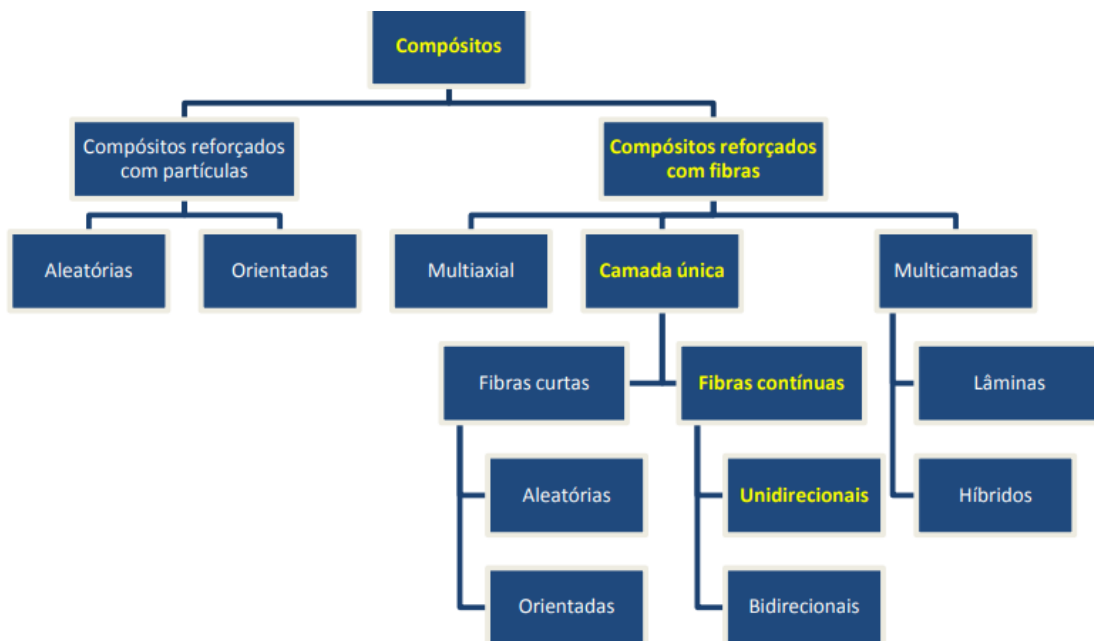
Figura 30 - Sistema de reforço empregando fibra de carbono (fio, chapa e tecido)



Fonte: Menacker (2021)

Na figura 31, observa-se o diagrama de compósitos classificados conforme as características do reforço presente com destaque para o tipo de material estudado.

Figura 31 - Classificação de materiais compósitos



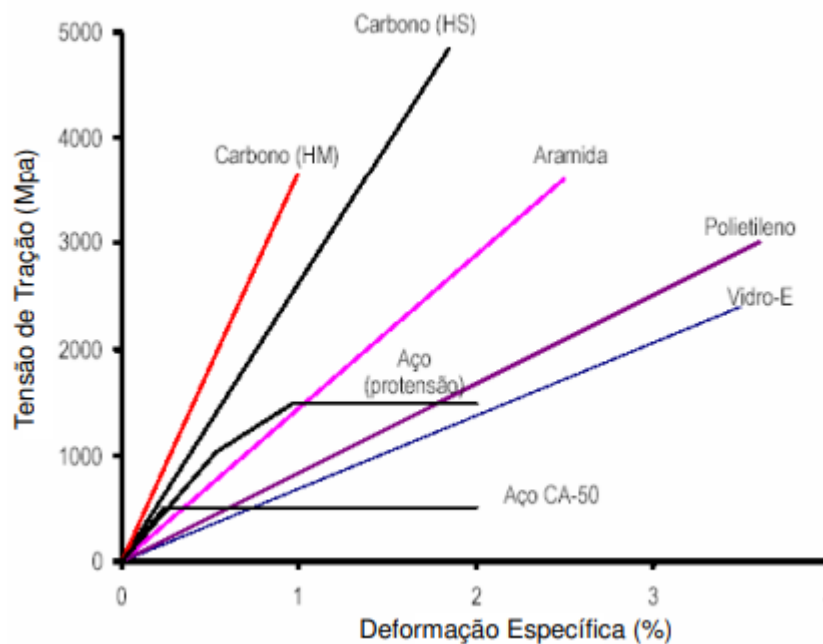
Fonte: NOSSA, 2011

Como descreve Garcez (2007), as vantagens de utilização da fibra de carbono são inúmeras, tornando essa tecnologia uma excelente solução para reforços estruturais em concreto:

- Tem uma elevada taxa resistência-peso, podendo ser cinco vezes menor que o aço estrutural;
- Possui um valor alto do módulo de elasticidade em relação às outras fibras, apresentando elevada rigidez;
- Ótimo comportamento à fadiga sendo fundamental em atuação de cargas cíclicas;
- São resistentes à presença de ácidos, solventes e bases à temperatura ambiente;
- Não são afetadas pela corrosão.

A figura 32, apresenta um diagrama tensão-deformação comparativo apresentando a eficiência das fibras de carbono em relação as outras tecnologias.

Figura 32 - Diagrama tensão-deformação específico das fibras, aço de construção e cordoalhas de protensão



Fonte: (Beber, 2003)

## 2.5 Concreto Reforçado com PRFC

As estruturas de concreto armado frequentemente necessitam de intervenções, devido ao aumento da capacidade das cargas iniciais ou para recuperação do material deteriorado. Além disso, outros problemas estruturais e patológicos podem surgir ao longo do tempo, devido ao subdimensionamento dos elementos componentes das edificações ou ações das intempéries. Com o crescimento do uso do concreto, tornou-se necessário criar soluções para os problemas de reforços das estruturas. Se uma estrutura de concreto não tem condições de ser utilizada em suas funções originais, ou se existe uma alteração no uso que determine que a estrutura tenha uma ampliação em sua capacidade de suporte de carga, o reforço estrutural é a tecnologia a ser aplicada.

Dentre as soluções criadas para o reforço de estruturas de concreto armado, se destaca o reforço externo com polímeros reforçados com fibras de carbono, que se apresenta como uma alternativa melhor se comparada aos reforços mais comumente utilizados na indústria da construção civil como, por exemplo, o emprego de chapas de aço coladas ou chumbadas à estrutura. Isso se dá, principalmente, pelos altos



valores de resistência e rigidez do material, além da facilidade de aplicação, permitindo a utilização de baixas espessuras e pesos, resultando em um menor acréscimo de carga permanente. Na figura 33, apresenta-se uma ilustração de uma estrutura de concreto reforçada com fibra de polímero.

Figura 33 - Estrutura de concreto com reforço de fibra de PRFC



Fonte: **Metre® Micro Fibras**

Outra vantagem em relação a outros tipos de fibras, é a flexibilidade das mantas de fibra de carbono, que se adequam a qualquer forma, não exigem muita manutenção e, além disso, são altamente resistentes à corrosão. (Ferreira e Cunha, 2013).

Para a colagem dos PRFCs nas estruturas de concreto armado são utilizadas resinas epóxi específicas. Segundo Gallardo (2002), essas resinas são derivadas do petróleo, resultantes da combinação da epiclоридина e do bisfenol.

Zhang *et al.* (2020) mostra a influência de diferentes tamanhos de ligação do reforço com o concreto, em vigas reforçadas com PRFC, bem como a relevância da força de ligação entre os dois materiais para o sucesso do método. O autor evidencia uma tendência crescente na força de união Fibra x Concreto com o aumento do comprimento de ligação entre os materiais. Vigas reforçadas em PRFC com 150mm

de comprimento tiveram força de união cerca de 35% maior do que com 90mm de comprimento.

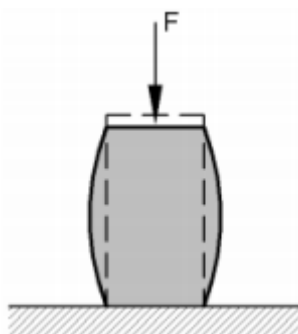
Xie e Hu (2012) demonstram, experimentalmente, que o reforço com uma camada de PRFC eleva a capacidade portante de vigas de concreto de 60% a 78%, falhando por ruptura do PRFC, enquanto o reforço com duas camadas de PRFC eleva a capacidade portante de 82% a 113% e falha por deslocamento do reforço em relação ao concreto.

O reforço com PRFC também abrange à esforços de compressão. O principal elemento submetido a esse tipo de esforço é o pilar. O uso de resinas e fibras como reforço estrutural em pilares pode ser realizado de modo contínuo, confinamento total, ou de modo parcial, confinamento parcial, e as fibras pode ser preparada perpendicularmente ou de forma inclinada (helicoidal) com relação ao eixo longitudinal do pilar (CARNEIRO, 2004). Os pilares de ponte e viadutos são as estruturas que mais se usufruem essa tecnologia.

A técnica mais comumente utilizada é o encamisamento, que consiste em um aumento da seção transversal de um elemento estrutural por meio de adição de armadura complementar e de uma camada de concreto que envolve a seção inicial, onde será acrescida a nova armadura. No caso da utilização das mantas de PRFC esse aumento da seção transversal será mínimo ou insignificativo. Nos pilares o reforço por encamisamento envolve normalmente toda a seção, sendo este denominado encamisamento fechado. O tipo aberto é usado quando existem condicionantes arquitetônicas, executando-se o encamisamento em algumas faces do pilar (FIGUEIRA, 2016).

Segundo Silva, apud Figueira (2016), esse tipo de reforço visa aumentar significativamente o desempenho estrutural a compressão, a flexão e ao esforço transversal, elevando a resistência do concreto a compressão e a ductibilidade, acarretando um aumento da admissão de cargas e absorção dos elementos reforçados. Na figura 34, temos a ilustração de um pilar recebendo um ponto concretada ao longo do seu eixo transversal. Nela podemos ver as deformações transversais e longitudinais que o pilar sofre devido a aplicação dessa ação.

Figura 34 - Deformações no pilar oriundas de uma carga concentrada



Fonte: (Figueira, 2016).

Atualmente, somente Estados Unidos e alguns países da Europa possuem normas regulamentadoras abordando o encamisamento de pilares com reforço de PRFC, um exemplo é a norma técnica norte-americana ACI 440.2R:2008 que utiliza como base o modelo de Mander, Priestley e Park (1988) para o cálculo de pilares confinados com sistemas PRFC. Resinas Utilizadas para Colagem

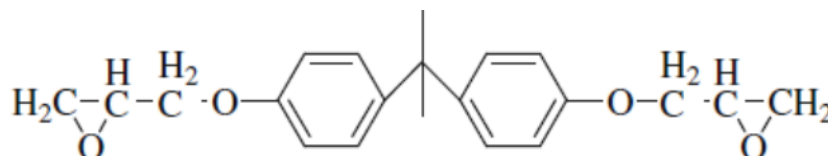
As resinas são responsáveis por envolver e unir o reforço, permitindo boa transferência de tensões. São materiais usados como ponte de aderência entre dois elementos, sendo um desses a superfície do concreto velho. Elas são as matrizes dos materiais compósitos e fixam os polímeros as estruturas. As resinas têm resistência limitada ao fogo, o que influencia no coeficiente de segurança da fibra.

Segundo Helene (1995) e Konrad (2003), o inventor desse material foi o Dr. Pierre Castan em 1936 na Suíça. Ele desenvolvia um produto para a fabricação de dentaduras e outras próteses odontológicas. Atualmente, os produtos se popularizaram no ramo da construção civil e estão cada vez mais sendo utilizados na construção de elementos pré-fabricados, na correção de manifestações patológicas (reforços estruturais, preenchimento de fissuras e juntas de concreto novo com antigo), em pisos industriais, entre outras aplicações.

As resinas epóxi são usualmente utilizadas como matriz em compósitos poliméricos termorrígidos, são bi-componentes (resina e endurecedor). Essas resinas foram introduzidas no mercado após a Segunda Guerra Mundial, sendo consideradas um avanço em relação a algumas resinas termorrígidas existentes como a fenólica e a poliéster. Epóxi é um termo utilizado para descrever o anel oxirano, representado

por um composto monocíclico com um átomo de oxigênio ligado a outros dois átomos, formando um anel de três átomos, como ilustrado a seguir na figura 35.

Figura 35 - Estrutura química da resina epóxi não curada



Fonte: NOSSA (2011).

A resina epóxi se torna um polímero termorrígido por meio de um processo denominado cura, onde agentes endurecedores atuam. Após a cura, ela não mais se funde e passa a ter alta estabilidade térmica e rigidez. Sua desvantagem é não ser um material reciclado (NOSSA, 2011).

No contexto das resinas, dois termos são importantes: “pot life” (tempo de utilização) e “open time” (tempo de contato). O primeiro é referente ao tempo de manuseio a partir da mistura. Sob altas temperaturas, esse tempo é mais curto e sobre baixas, é maior. Altas quantidades na mistura levam ao encurtamento do tempo de manuseio, uma vez que, a reação é exotérmica, libera calor. É possível resfriar os componentes antes de misturá-los como forma de aumentar esse tempo. Com o esgotamento desse tempo, a mistura perde drasticamente suas características de aderência. Já o segundo, é referente ao intervalo de tempo que decorrer entre a aplicação e o início do endurecimento. É influenciado, diretamente, pela temperatura do ambiente e da superfície de aplicação (ARQUEZ, 2010).

“Por apresentarem elevada adesão ao concreto, elevada resistência mecânica, serem impermeáveis e possuírem elevada durabilidade ao ataque químico (resistem a solventes e muitos produtos químicos), as resinas epoxídicas são as responsáveis pela ligação entre o laminado de polímero reforçado com fibra de carbono e o entalhe realizado no cobrimento de concreto, através da técnica de NSM. “(ARQUEZ, 2010, p.73)

De acordo com Arquez apud (JUVANDES, 1999), deve-se ter atenção especial na escolha das resinas, pois existem diversas formulações e viscosidades no mercado. Além disso, há a possibilidade de adição de solventes, flexibilizantes e

pigmentos nas resinas para obter-se compósitos específicos para cada aplicação. A escolha da melhor resina traz a necessidade de conhecimentos além do curso de graduação em engenharia civil, segundo Helene (1995), pois além de serem complexas formulações, envolvem sigilos industriais dos fabricantes. “A escolha incorreta da resina pode reduzir a eficiência do reforço estrutural” (ARQUEZ, 2010, P.73)

Ressalta-se que todas as formulações poliméricas são higroscópicas, absorvem umidade. Diante disso, certas formulações não podem ser aplicadas em substratos já úmidos. (KAZMIERCZAK, 2005). Isso pode acarretar uma redução de até 50% na resistência à flexão em comparação com o estado seco, porém pode-se reverter esses efeitos e como os efeitos de encurtamento e alongamento são ínfimos, não influencia nas propriedades mecânicas da resina.

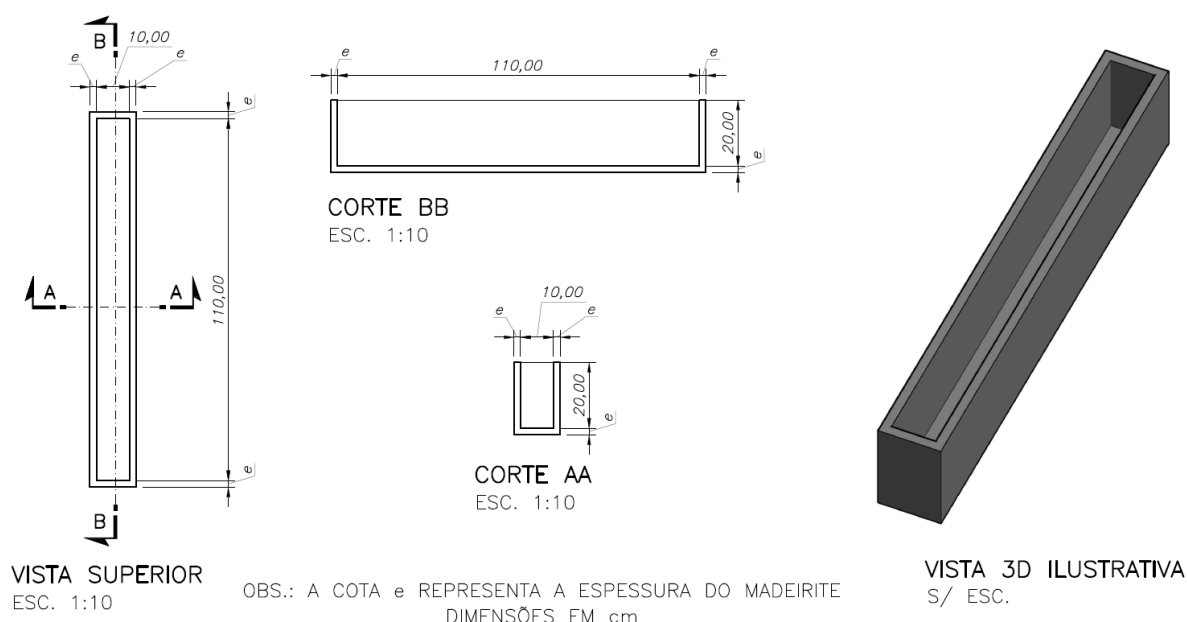
No entanto, a sensibilidade à ambientes alcalinos e ácidos, as reações álcali-sílica com constituintes do concreto, as ações do vento e poeiras ambientas e a condutividade elétrica são fatores de desvantagem das resinas e que preocupam na eficiência no resultado final (ARQUEZ, 2010).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Formas

O programa experimental consistiu, primeiramente, na fabricação de fôrmas de madeira para a moldagem dos 12 corpos de prova prismáticos utilizados no estudo. As fôrmas de madeira foram confeccionadas utilizando-se madeirite de 10 mm de espessura ( $e=10$  mm), restantes da obra de um dos colaboradores da pesquisa. As dimensões internas das fôrmas foram de 10x20x110 cm e foram confeccionadas como mostrado na figura 36.

Figura 36 - Modelo para confecção das fôrmas de madeira.



Fonte: O autor (2020).

#### 3.2 Armaduras

Após confecção das fôrmas de madeira, foram adquiridas as armações para as vigas em concreto armado. Todos os 12 corpos de prova foram armados com 4 barras de diâmetro de 8 mm para as barras longitudinais e estribos de 5 mm a cada 15 cm para as barras transversais, utilizando-se 2 cm de cobrimento para a armadura em todas as faces, garantidos por espaçadores do tipo cadeirinha. A Figura 37 ilustra as fôrmas de madeira com as armaduras já em seu interior, bem como os espaçadores garantindo o correto cobrimento.

Figura 37 - Fôrmas com armaduras posicionadas, prontas para a concretagem.



Fonte: O autor (2020).

Foram utilizados aço do tipo CA-50 para as barras longitudinais e aço CA-60 para as barras transversais (estribos). O aço CA-50 possui resistência característica de 500 MPa e bitola entre 6,3 a 40 mm e é laminado a quente. O aço CA-60 tem resistência característica de 600Mpa, é produzido com aço de baixo teor de carbono, apresentando ótima soldabilidade, maior aderência do aço ao concreto, melhor ancoragem nas estruturas e melhor combate à fissuração do concreto. Além disso, oferece boa diversidade de aplicações como em vigotas de lajes pré-fabricadas, treliçadas, armações para tubos e pré-moldados. O aço CA-60 possui bitolas de 4,2, 5,0 e 6,0mm. Ambos (CA-50 e CA-60) são comercializados em barras de 6 ou 12 metros de comprimento e são normatizados pela NBR 7480. A sigla CA significa concreto armado.

### 3.3 Concreto

O terceiro passo do programa experimental consistiu na concretagem dos 12 corpos de prova prismáticos de concreto armado, sendo 6 com concreto de resistência à compressão de 20 MPa (3 de referência e 3 reforçados) e 6 com resistência de 35 MPa (3 de referência e 3 reforçados), após 28 dias de cura. As resistências foram garantidas pela concreteira colaboradora do estudo, através da realização de ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018).

Na tabela 1 apresenta-se os traços utilizados e os parâmetros de resistência fornecidos pelo Eng. Geraldo Alves de Freitas Junior.

Tabela 1 - Traços do concreto e resistências características fornecidos pelo Eng. Geraldo

CARTA DE TRAÇOS MGMIX - GABRIEL FUMEC									
FCK 20 MPa - B1 - Sl. 10+-2									
TIPO DE CONCRETO/FCK/MPa	A/C	CIMENTO kg/m <sup>3</sup>	AREIA ARTIFICIAL CALC. kg/m <sup>3</sup>	AREIA ARTIFICIAL TCL kg/m <sup>3</sup>	BRITA 0 kg/m <sup>3</sup>	BRITA 1 kg/m <sup>3</sup>	ADITIVO kg/m <sup>3</sup>	ÁGUA kg/m <sup>3</sup>	% ARG.
20,0	0,87	223,00	51,00	932,00	0,00	898,00	1,67	195,00	57,34
FCK 35 MPa - B1 - SL.10+-2									
TIPO DE CONCRETO/FCK/MPa	A/C	CIMENTO kg/m <sup>3</sup>	AREIA ARTIFICIAL CALC. kg/m <sup>3</sup>	AREIA ARTIFICIAL TCL kg/m <sup>3</sup>	BRITA 0 kg/m <sup>3</sup>	BRITA 1 kg/m <sup>3</sup>	ADITIVO kg/m <sup>3</sup>	ÁGUA kg/m <sup>3</sup>	
30,0	0,66	296,00	38,00	874,00	0,00	913,00	2,22	194,00	56,95



Eng Civil: Geraldo Alves de Freitas Júnior  
Crea: 91997D

Fonte: O autor (2022).

A Figura 38 ilustra a fase de concretagem, que foi realizada em acordo com a norma brasileira NBR 5738 (ABNT, 2015). A Figura 39 ilustra a fase de concretagem finalizada, com travamentos nas fôrmas, de forma a evitar-se a dilatação indevida dos corpos de prova.



Figura 38 - Concretagem das vigas e adensamento utilizando haste de aço.



Fonte: O autor (2020).

Figura 39 - Fase de concretagem finalizada.



Fonte: O autor (2020).

Realizada a concretagem, os 6 corpos de prova de referência, sendo 3 de resistência igual a 20 MPa e 3 de resistência de 35 MPa, foram transportados diretamente ao laboratório de realização dos ensaios. Já os 6 corpos de prova reforçados com PRFC foram encaminhados à empresa colaboradora especializada em aplicação de PRFC em elementos de concreto armado.

### 3.4 Fibras de carbono

As fibras utilizadas nesta pesquisa foram do tipo manta unidirecional, modelo MC CarbonFiber Sheets, de acordo com as especificações técnicas do fabricante, demonstradas na Figura 40.

Figura 40 - Dados técnicos das mantas de fibra de carbono.

<b>Dados Técnicos</b>		
<b>Característica</b>	<b>Valor</b>	<b>Observações</b>
Peso próprio	300 g/m <sup>2</sup>	
Largura	500 mm	
Sessão 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

Fonte: MC CarbonFiber Sheets (2020).

A Figura 41 apresenta o rolo de manta unidirecional utilizado neste estudo. Nota-se com facilidade a disposição das fibras de carbono em apenas uma direção.

Figura 41 - Rolo de PRFC utilizado.



Fonte: O Autor (2021).

Para a correta aplicação das fibras de carbono às vigas reforçadas, foram realizados lixamento com lixa rotativa e limpeza com álcool etílico das faces inferiores da viga, como determina a ficha técnica do produto MC CarbonFiber Sheets (2020), de forma a garantir a perfeita planicidade da superfície e completa aderência das fibras.

Após lixamento e limpeza da superfície, foram realizados os cortes das fibras de carbono de acordo com o tamanho da face inferior tracionada das vigas, sendo as dimensões de cada folha iguais a 10x110 cm. Para o corte sem que haja desfiamento das fibras do PRFC, recomenda-se a utilização de fitas adesivas comuns, com as devidas marcações dos locais de corte, como ilustra a Figura 42.

Figura 42 - Realização dos cortes da manta de PRFC.



Fonte: O autor (2021).

### 3.5 Resina Epóxi

Após o corte, foi realizada colagem das mantas de PRFC na face inferior tracionada de cada viga reforçada do estudo. Para a colagem foi utilizada resina epóxi própria MC-DUR 1209, ilustrada na Figura 43, com a mistura dos componentes A e B em uma proporção de 3 para 1, de acordo com recomendações do fabricante.

Figura 43 - Resina Epóxi utilizada na colagem dos PRFCs.



Fonte: O autor (2021).

A aplicação da primeira camada de resina foi realizada com rolo comum, como demonstrado na Figura 44. Coloca-se a folha cortada em cima da primeira camada de epóxi e realiza-se pressão com ferramenta estoura bolha, ilustrada na Figura 45, para adequada fixação e remoção de bolhas de ar existentes entre a fibra e a resina, bem como para o correto espalhamento da resina em toda a superfície do PRFC.

Figura 44 - Aplicação da primeira camada de resina.



Fonte: O autor (2021).

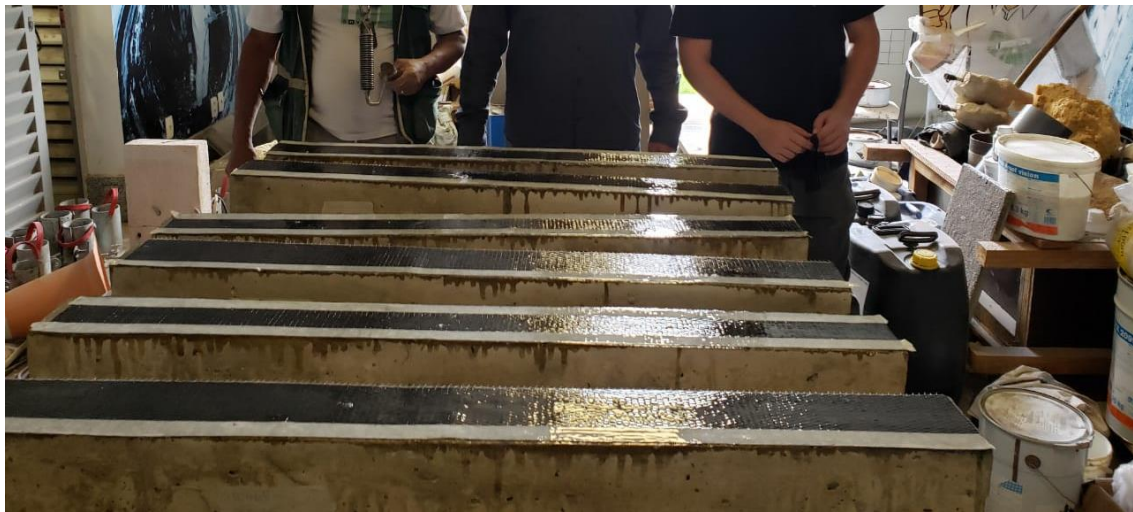
Figura 45 - Ferramenta estoura bolhas utilizada.



Fonte: O autor (2021).

Realizado o procedimento de estoura bolhas, aplicou-se uma segunda camada de resina epóxi acima da folha de PRFC, de forma a garantir que toda a manta esteja totalmente impregnada com o material, finalizando assim o processo de colagem do PRFC à face reforçada da viga. O resultado da colagem das mantas de PRFC é ilustrado na Figura 46.

Figura 46 - Vigas reforçadas com PRFC.



Fonte: O autor (2021).

A resina epóxi tem cura total de 7 dias após a aplicação, após esse período ela atinge sua resistência máxima. Entretanto, sua cura varia entre 30 minutos e 48 horas. Com isso, se observado que a camada de resina atingiu sua cura, pode-se realizar os ensaios nas vigas.

Figura 47 - Dados da resina epóxi

**Tabela 1 – Características físicas da resina epóxi conforme Cánovas (1994).**

<b>Características Físicas da Resina Epóxi</b>
Retração desprezível durante a cura
Insensibilidade a umidade: Sendo indicada para combater a corrosão em armaduras
Alta capacidade resistente: Tração 30 a 90 MPa, Compressão 120 a 210 MPa
Resistência máxima alcançada aos 7 dias de idade
Resistência elevada à exposição de ácidos e bases, com exceção do ácido nítrico
Grande variedade do tempo de cura. Entre 30 minutos e 48 horas.
Modulo de elasticidade variando entre 1500 e 30000 MPa.

Fonte: Marchetti, Esmanhotto e Ribas (2007).

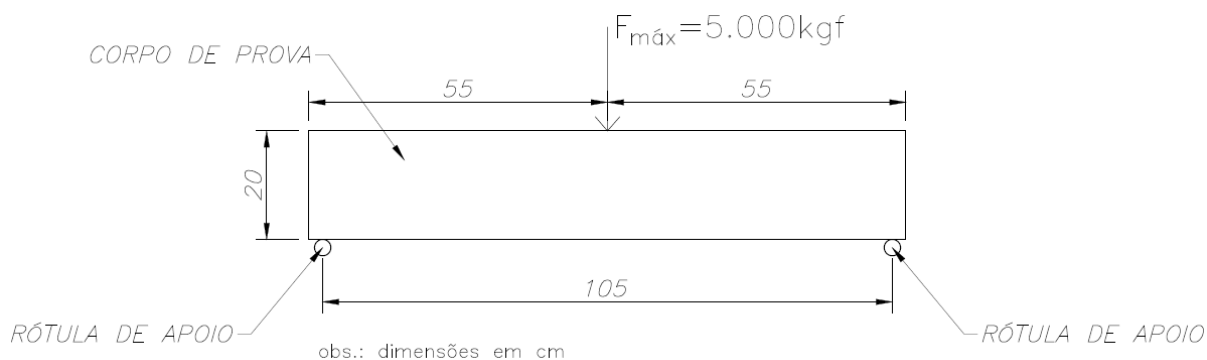
### 3.6 Ensaio de Flexão Simples

O ensaio de flexão simples é amplamente utilizado na determinação da resistência à tração de CPs prismáticos de concreto, bem como para o cálculo das energias de deformação liberadas, distribuição das tensões de cisalhamento, avaliação da eficiência de reforços estruturais, tais quais os PRFC, além de avaliações relacionadas ao estado limite de serviço (ELS) das peças, objetos de estudo deste trabalho.

O método de ensaio à flexão de 3 pontos foi o escolhido para esta pesquisa, devido à facilidade de aplicação e medição de flechas máximas no meio do vão através do próprio dispositivo de aplicação de cargas. As diretrizes da norma NBR 6118 (ABNT, 2014) foram utilizadas para realização dos testes.

No ensaio de flexão simples por 3 pontos, o corpo de prova é acomodado sobre dispositivo bi apoiado de rótulas, com aplicação de carga no meio do vão do CP, como ilustra o esquema da Figura 48, já com as medidas adotadas para a presente pesquisa.

Figura 48 - Esquema de ensaio de flexão de 3 pontos.



Fonte: O autor (2021).

A máquina de ensaio deve ser a mesma utilizada no ensaio de compressão axial, porém dotada de dispositivo específico para flexão, como ilustrado na Figura 49, que garanta a aplicação da carga perpendicularmente às faces superior e inferior do CP, sem excentricidades. O equipamento utilizado neste ensaio foi uma prensa Emic, dotada de célula de carga para ensaio de flexão com capacidade máxima de 5.000kgf.



Figura 49 - Dispositivo de ensaio à flexão simples utilizado.



Fonte: O autor (2021).

Os CPs são colocados e ensaiados um a um no equipamento, como demonstra a Figura 50.

Figura 50 - CP pronto para ser ensaiado.



Fonte: O autor (2021).

Programa-se a máquina para que a força seja aplicada continuamente e sem choques, de forma que o deslocamento vertical seja de 2,54mm por minuto, de acordo com especificações do fabricante e script utilizado para o ensaio em questão. O carregamento cessa quando houver uma queda de força que indique a ruptura do CP ou ao atingir-se a capacidade máxima da célula de carga do ensaio de flexão, com certa margem de segurança, de forma a garantir-se a integridade dos equipamentos utilizados e a segurança da equipe envolvida.

Obtém-se então, para cada um deles, o valor característico da carga de ruptura ou carga máxima aplicada, bem como trios de valores de tempo, esforço e deslocamento, para futura elaboração de curva Esforço x Deslocamento e análises pertinentes relativas ao estado limite de serviço (ELS).

Após a obtenção das curvas de Esforço x Deformação através da aquisição de dados no ensaio de flexão simples, serão calculados os fatores de eficiência do reforço dentro dos limites estudados para o ELS, através de análise comparativa dos valores de flechas obtidas e delimitadas por norma e as respectivas cargas solicitantes para obtenção dessas flechas.

Será apresentada uma análise sobre os valores delimitados na norma NBR 6118 (ABNT, 2014) para as flechas limite no ELS em vigas de concreto armado sem reforço, demonstrando-se a não conformidade desses valores para vigas de concreto armado com reforço à flexão realizado com mantas de PRFC e a necessidade de estudos específicos, de forma a delimitar-se valores pertinentes aos deslocamentos para vigas reforçadas.

Será também apresentado relatório fotográfico da fissuração de todas as vigas do estudo, com posterior análise visual e comparação da distribuição de fissuras das vigas de referência vs reforçadas, discutindo-se o resultado, de forma a comprovar a teoria evidenciada por Ding *et al.* (2013).

Ding *et al.* (2013) relata em seu estudo que a taxa de liberação de energia de deformação em vigas reforçadas com PRFCs é quase 1/10 da taxa de liberação em vigas não reforçadas, o que prova o aumento da rigidez e capacidade portante das vigas de concreto reforçadas. Os autores também notaram que fissuras em vigas reforçadas são vistas em maior número e mais perto umas das outras, porém muito mais estreitas do que em vigas sem reforço, o que traz a ideia de uma melhor distribuição de tensões provocada pelo reforço com PRFC.

## 4 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo são apresentados todos os resultados obtidos, separadamente para cada corpo de prova do programa experimental desta pesquisa, seguidos de análise comparativa entre os CPs de 20 e 35 MPa sem reforço e com aplicação do reforço proposto.

Os resultados serão exibidos em um CP por página, com a apresentação do gráfico de Esforço x Deformação, valores de esforço e flecha máxima, bem como fotos após realização do ensaio de flexão com medidas das fissuras para todos os CPs estudados.

Os CPs 01, 02 e 03 (Grupo 1) foram moldados com concreto de 20MPa, sem a adição do reforço à flexão com manta de PRFC.

Os CPs 04, 05 e 06 (Grupo 2) foram moldados com concreto de 35MPa, também sem a adição do reforço à flexão.

Os CPs 07,08 e 09 (Grupo 1R) foram moldados com concreto de 20MPa, com a adição do reforço à flexão com manta de PRFC.

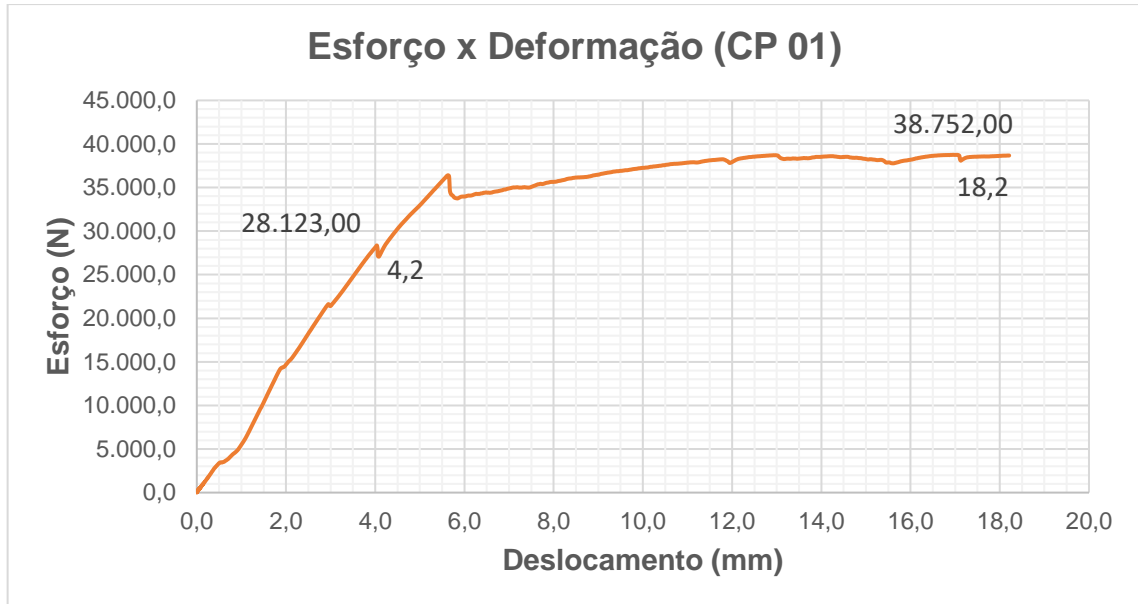
E os CPs 10, 11 e 12 (Grupo 2R) foram moldados com concreto de 35MPa, também com a adição do reforço à flexão.

Para a análise do estado limite de serviço (ELS) das vigas desta pesquisa, considerou-se deslocamentos visíveis em elementos estruturais de acordo com a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014), obtendo-se valores limites de deslocamentos de  $L/250$ , sendo L o valor do vão livre. Utilizando-se o valor de 105cm para o vão livre das vigas deste estudo, foi obtido um valor máximo de deslocamentos para o ELS de  $105/250 = 0,42\text{cm}$  ou 4,2mm, valor válido para todos os CPs.

Em relação à fissuração, a NBR 6118 (ABNT, 2014) recomenda que o elemento não possua fissuras com valores superiores a 0,3mm em sua estrutura, de forma a garantir a correta proteção das armaduras contra agentes externos de intemperismo, bem como garantir a integridade do elemento estrutural.

O gráfico da Figura 51 apresenta o diagrama de Esforço x Deformação para o CP 01.

Figura 51 - Diagrama Esforço x Deformação CP 01



Fonte: O autor (2022).

O esforço máximo obtido para o CP 01 foi de 38.752,00N e a flecha máxima de 18,21mm. A carga sob a qual a viga atinge o deslocamento limite de ELS está ilustrada no gráfico da Figura 51 acima e é de 28.123,00N.

Em relação à fissuração, a viga CP 01 apresentou valores de espessura das fissuras, sob carregamento máximo, de 1,5mm e 5,5mm respectivamente para as fissuras da esquerda e direita no meio do vão, como demonstra a Figura 52.

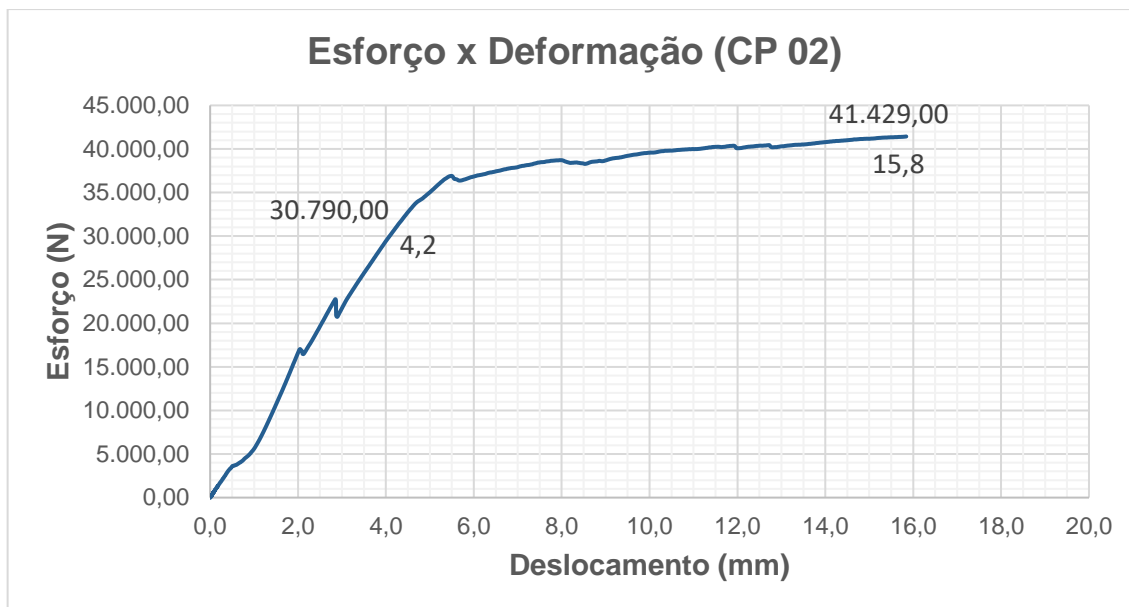
Figura 52 - Fissuração sob carregamento máximo CP 01



Fonte: O autor (2022).

O gráfico da Figura 53 apresenta o diagrama de Esforço x Deformação para o CP 02.

Figura 53 - Diagrama Esforço x Deformação CP 02



Fonte: O autor (2022).

O esforço máximo obtido para o CP 02 foi de 41.429,00N e a flecha máxima de 15,80mm. A carga sob a qual a viga atinge o deslocamento limite de ELS está ilustrada no gráfico da Figura 53 acima e é de 30.790,00N.

Em relação à fissuração, a viga CP 02 apresentou valores de espessura das fissuras, sob carregamento máximo, de 4,0mm e 4,4mm respectivamente para as fissuras da esquerda e direita no meio do vão, como demonstra a Figura 54.

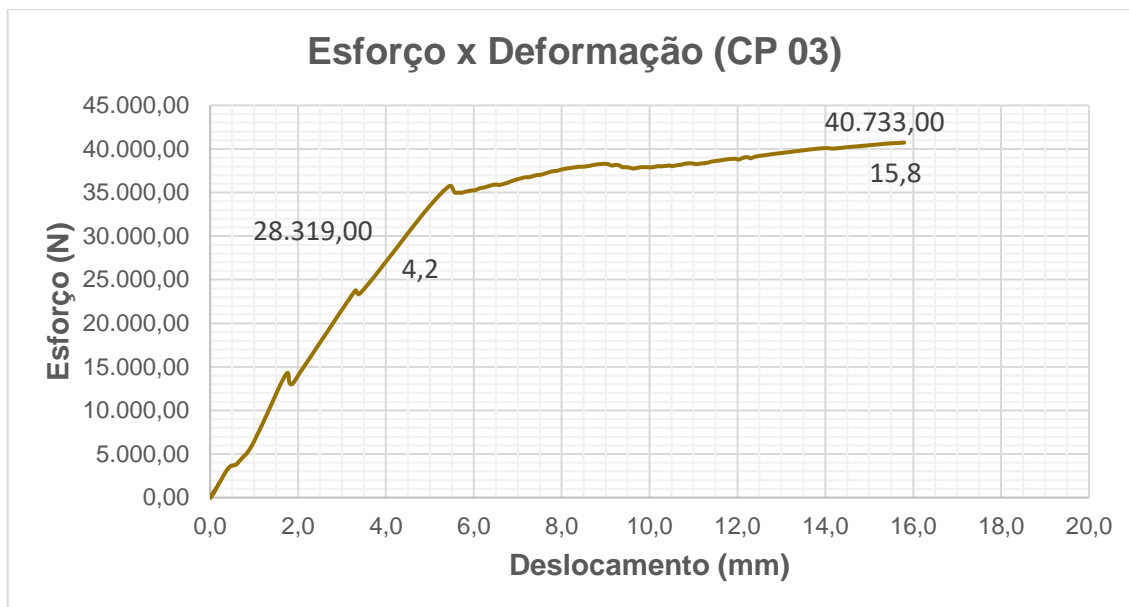
Figura 54 - Fissuração sob carregamento máximo CP 02



Fonte: O autor (2022).

O gráfico da Figura 55 apresenta o diagrama de Esforço x Deformação para o CP 03.

Figura 55 - Diagrama Esforço x Deformação CP 03



Fonte: O autor (2022).

O esforço máximo obtido para o CP 03 foi de 40.733,00N e a flecha máxima de 15,80mm. A carga sob a qual a viga atinge o deslocamento limite de ELS está ilustrada no gráfico da Figura 55 acima e é de 28.319,00N.

Em relação à fissuração, a viga CP 03 apresentou valores de espessura das fissuras, sob carregamento máximo, de 2,0mm e 3,8mm respectivamente para as fissuras da esquerda e direita no meio do vão, como demonstra a Figura 56.

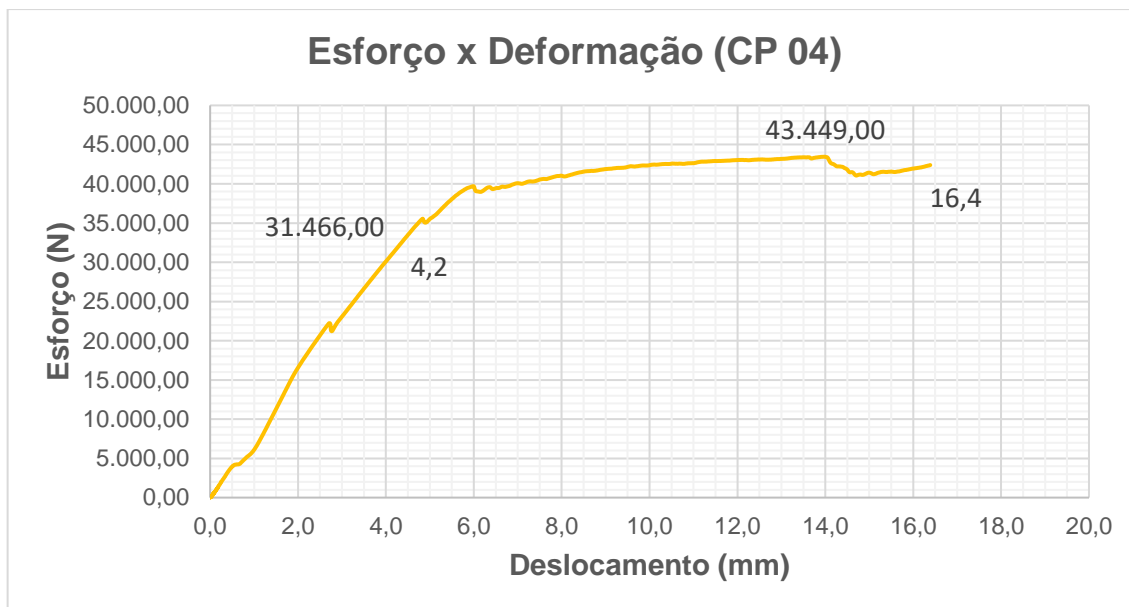
Figura 56 - Fissuração sob carregamento máximo CP 03



Fonte: O autor (2022).

O gráfico da Figura 57 apresenta o diagrama de Esforço x Deformação para o CP 04.

Figura 57 - Diagrama Esforço x Deformação CP 04



Fonte: O autor (2022).

O esforço máximo obtido para o CP 04 foi de 43.449,00N e a flecha máxima de 16,4mm. A carga sob a qual a viga atinge o deslocamento limite de ELS está ilustrada no gráfico da Figura 57 acima e é de 31.466,00N.

Em relação à fissuração, a viga CP 04 apresentou valor de espessura da fissura, sob carregamento máximo, de 4,5mm para a fissura no meio do vão, como demonstra a Figura 58.

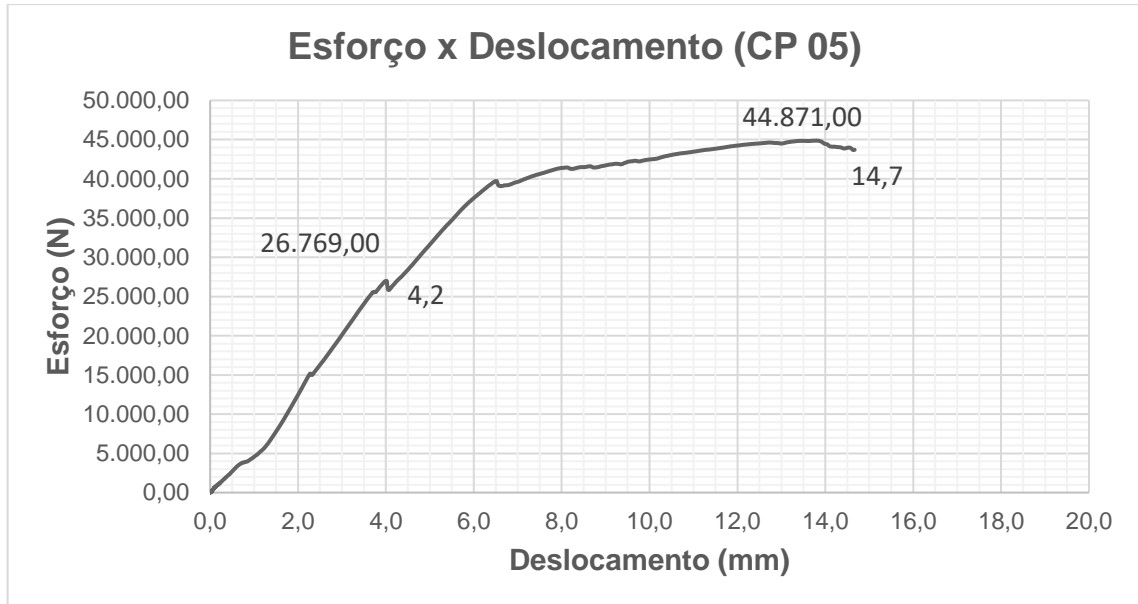
Figura 58 - Fissuração sob carregamento máximo CP 04



Fonte: O autor (2022).

O gráfico da Figura 59 apresenta o diagrama de Esforço x Deformação para o CP 05.

Figura 59 - Diagrama Esforço x Deformação CP 05



Fonte: O autor (2022).

O esforço máximo obtido para o CP 05 foi de 44.871,00N e a flecha máxima de 14,70mm. A carga sob a qual a viga atinge o deslocamento limite de ELS está ilustrada no gráfico da Figura 59 acima e é de 26.769,00N.

Em relação à fissuração, a viga CP 05 apresentou valor de espessura da fissura, sob carregamento máximo, de 4,8mm para a fissura no meio do vão, como demonstra a Figura 60.

Figura 60 - Fissuração sob carregamento máximo CP 05

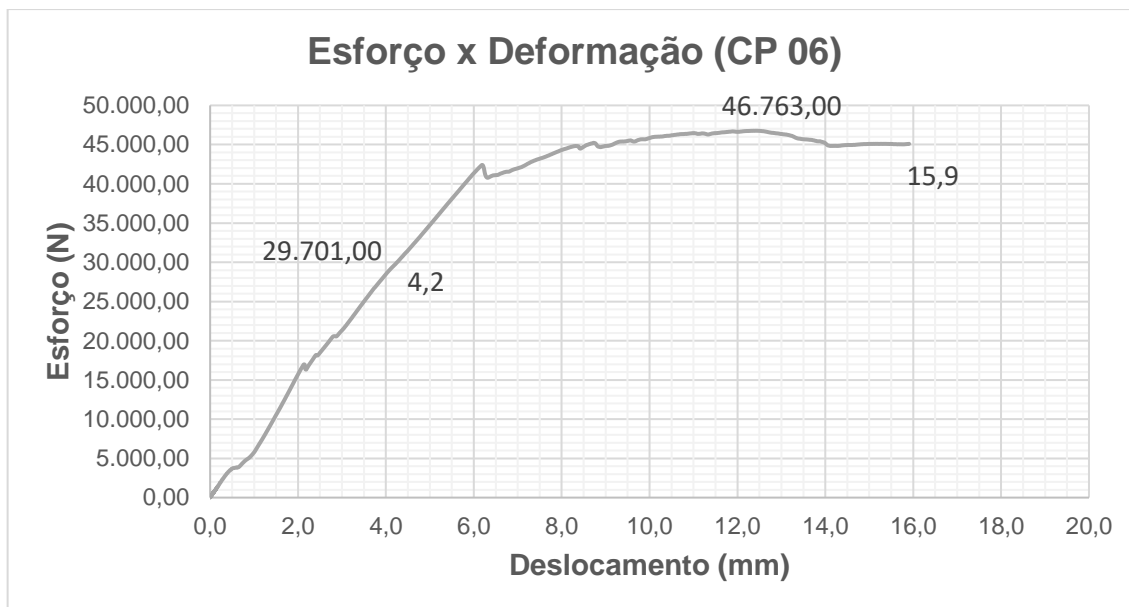


Fonte: O autor (2022).



O gráfico da Figura 61 apresenta o diagrama de Esforço x Deformação para o CP 06.

Figura 61 - Diagrama Esforço x Deformação CP 06

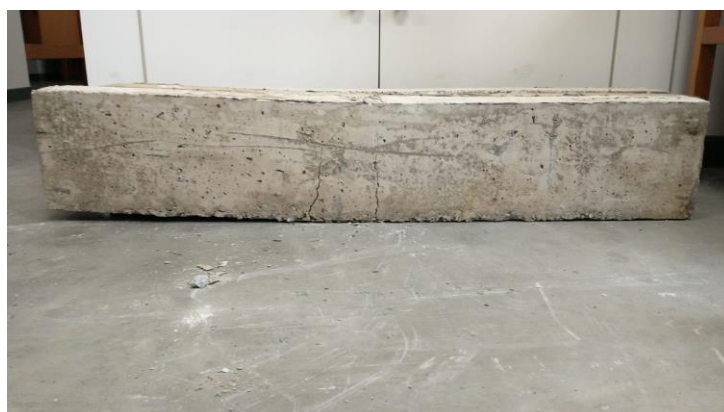


Fonte: O autor (2022).

O esforço máximo obtido para o CP 06 foi de 46.763,00N e a flecha máxima de 15,9mm. A carga sob a qual a viga atinge o deslocamento limite de ELS está ilustrada no gráfico da Figura 61 acima e é de 29.701,00N.

Em relação à fissuração, a viga CP 06 apresentou valores de espessuras da fissuras, sob carregamento máximo, de 2,5mm tanto para a fissura da esquerda quanto da direita no meio do vão, como demonstra a Figura 62.

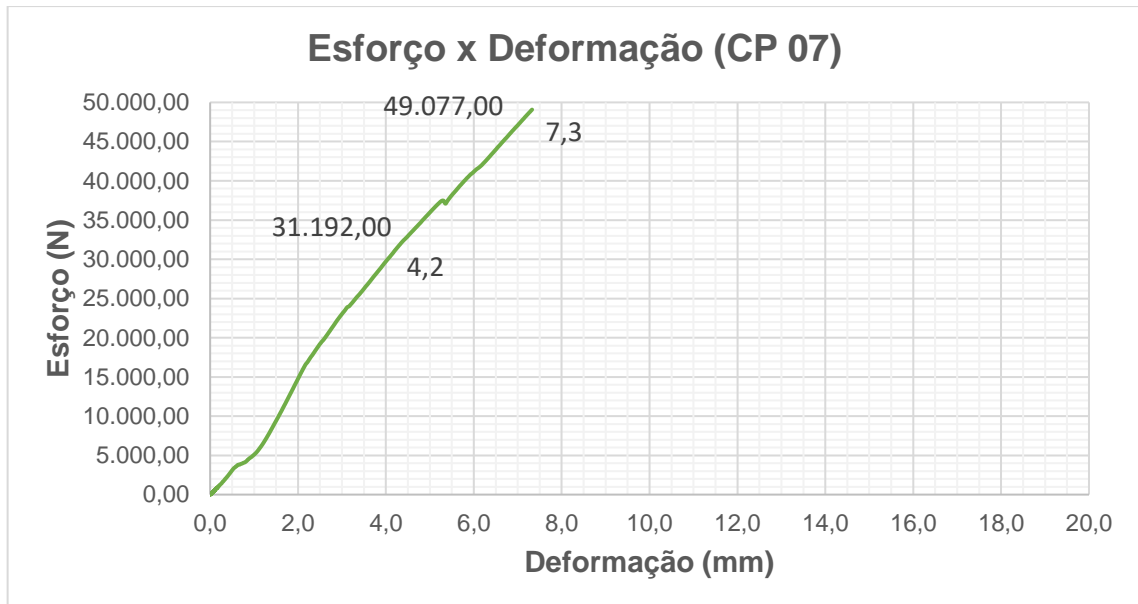
Figura 62 - Fissuração sob carregamento máximo CP 06



Fonte: O autor (2022).

O gráfico da Figura 63 apresenta o diagrama de Esforço x Deformação para o CP 07.

Figura 63 - Diagrama Esforço x Deformação CP 07



Fonte: O autor (2022).

O esforço máximo obtido para o CP 06 foi de 49.077,00N e a flecha máxima de 7,3mm. A carga sob a qual a viga atinge o deslocamento limite de ELS está ilustrada no gráfico da Figura 63 acima e é de 31.192,00N.

Em relação à fissuração, a viga CP 07 não fissurou em nenhum ponto ao longo de todo o vão, como demonstra a Figura 64.

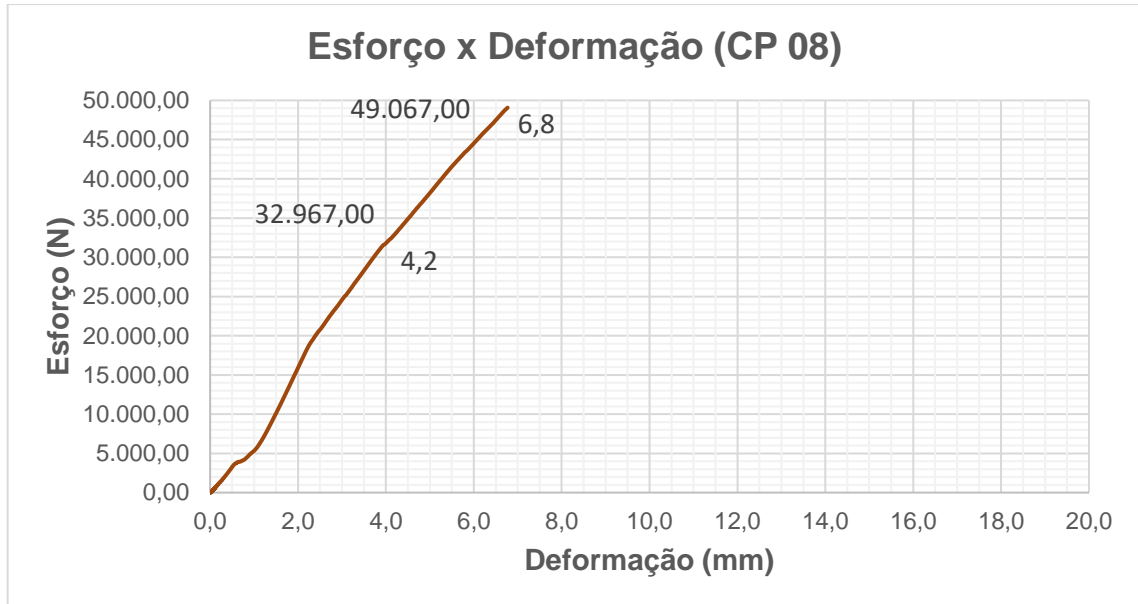
Figura 64 - Fissuração sob carregamento máximo CP 07



Fonte: O autor (2022).

O gráfico da Figura 65 apresenta o diagrama de Esforço x Deformação para o CP 08.

Figura 65 - Diagrama Esforço x Deformação CP 08



Fonte: O autor (2022).

O esforço máximo obtido para o CP 08 foi de 49.067,00N e a flecha máxima de 6,8mm. A carga sob a qual a viga atinge o deslocamento limite de ELS está ilustrada no gráfico da Figura 65 acima e é de 32.967,00N.

Em relação à fissuração, a viga CP 08 não fissurou em nenhum ponto ao longo de todo o vão, como demonstra a Figura 66.

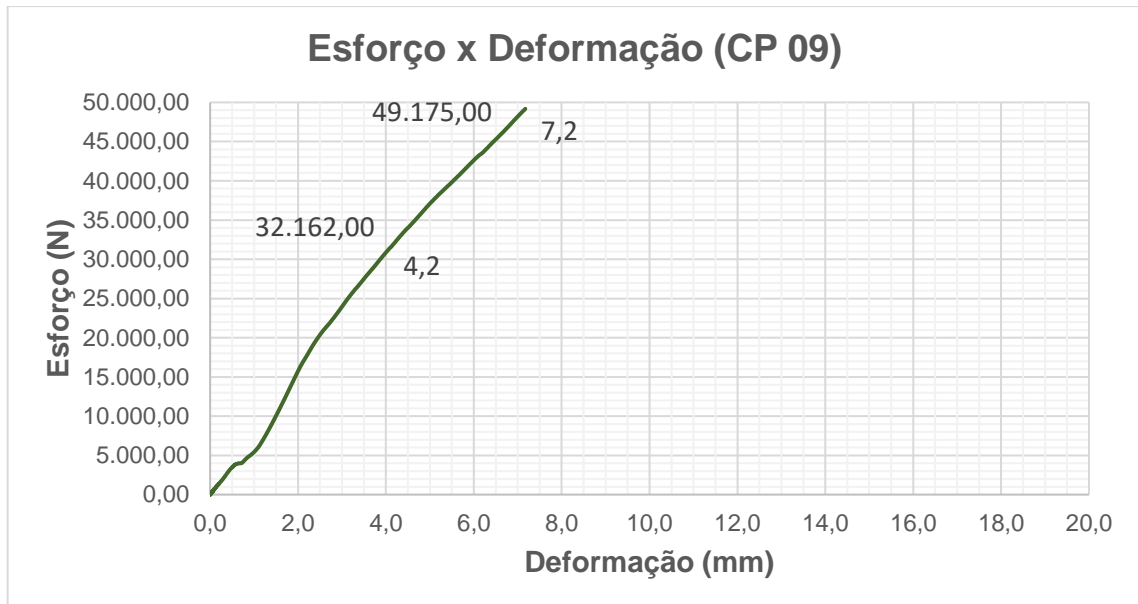
Figura 66 - Fissuração sob carregamento máximo CP 08



Fonte: O autor (2022).

O gráfico da Figura 67 apresenta o diagrama de Esforço x Deformação para o CP 09.

Figura 67 - Diagrama Esforço x Deformação CP 09



Fonte: O autor (2022).

O esforço máximo obtido para o CP 09 foi de 49.175,00N e a flecha máxima de 7,2mm. A carga sob a qual a viga atinge o deslocamento limite de ELS está ilustrada no gráfico da Figura 67 acima e é de 32.162,00N.

Em relação à fissuração, a viga CP 09 não fissurou em nenhum ponto ao longo de todo o vão, como demonstra a Figura 68.

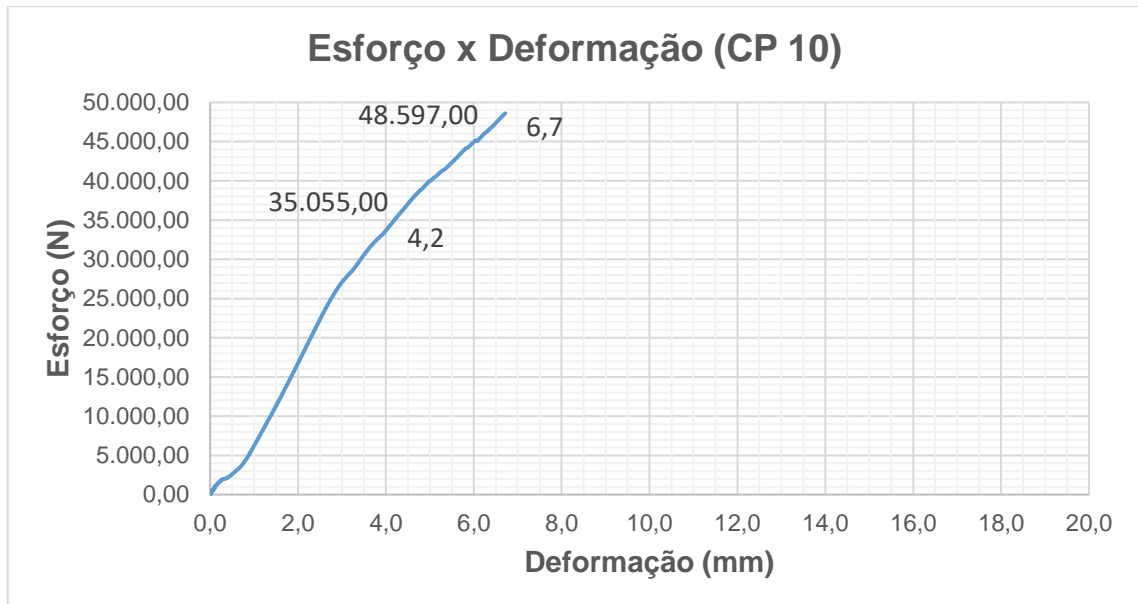
Figura 68 - Fissuração sob carregamento máximo CP 09



Fonte: O autor (2022).

O gráfico da Figura 69 apresenta o diagrama de Esforço x Deformação para o CP 10.

Figura 69 - Diagrama Esforço x Deformação CP 10



Fonte: O autor (2022).

O esforço máximo obtido para o CP 10 foi de 48.597,00N e a flecha máxima de 6,7mm. A carga sob a qual a viga atinge o deslocamento limite de ELS está ilustrada no gráfico da Figura 69 acima e é de 35.055,00N.

Em relação à fissuração, a viga CP 10 não fissurou em nenhum ponto ao longo de todo o vão, como demonstra a Figura 70.

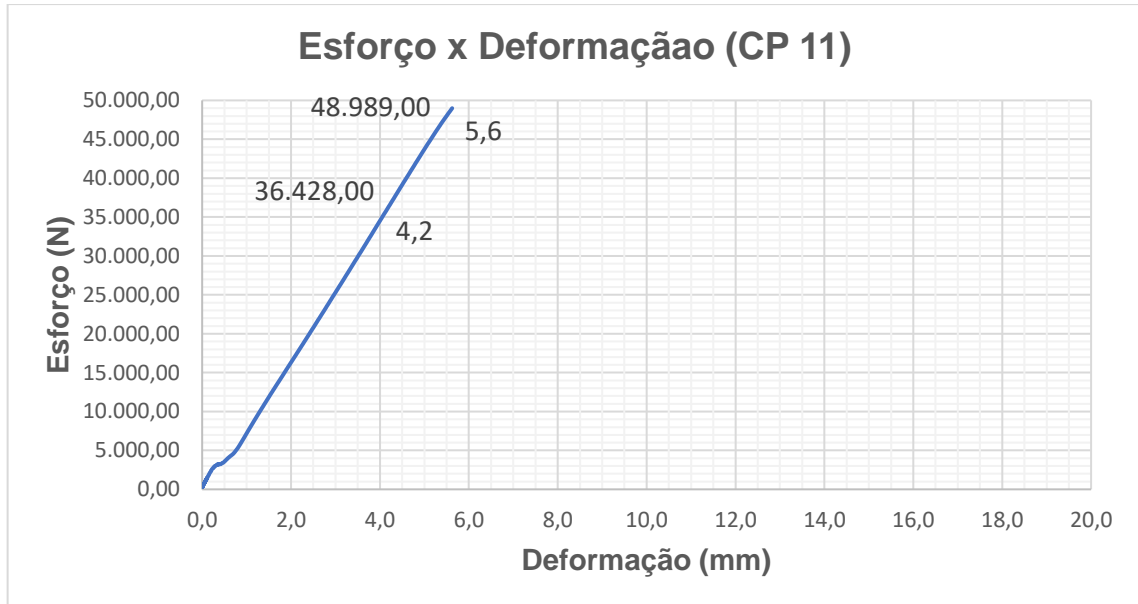
Figura 70 - Fissuração sob carregamento máximo CP 10



Fonte: O autor (2022).

O gráfico da Figura 71 apresenta o diagrama de Esforço x Deformação para o CP 11.

Figura 71 - Diagrama Esforço x Deformação CP 11



Fonte: O autor (2022).

O esforço máximo obtido para o CP 11 foi de 48.989,00N e a flecha máxima de 5,6mm. A carga sob a qual a viga atinge o deslocamento limite de ELS está ilustrada no gráfico da Figura 71 acima e é de 36.428,00N.

Em relação à fissuração, a viga CP 11 não fissurou em nenhum ponto ao longo de todo o vão, como demonstra a Figura 72.

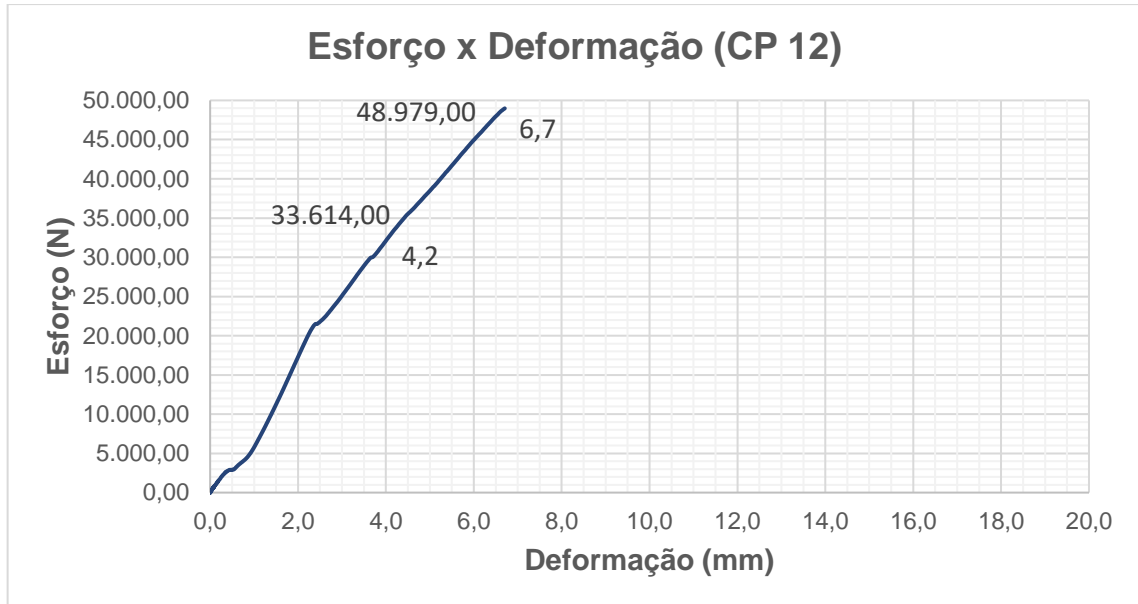
Figura 72 - Fissuração sob carregamento máximo CP 11



Fonte: O autor (2022).

O gráfico da Figura 73 apresenta o diagrama de Esforço x Deformação para o CP 12.

Figura 73 - Diagrama Esforço x Deformação CP 12



Fonte: O autor (2022).

O esforço máximo obtido para o CP 12 foi de 48.979,00N e a flecha máxima de 6,7mm. A carga sob a qual a viga atinge o deslocamento limite de ELS está ilustrada no gráfico da Figura 73 acima e é de 33.614,00N.

Em relação à fissuração, a viga CP 12 não fissurou em nenhum ponto ao longo de todo o vão, como demonstra a Figura 746.

Figura 74 - Fissuração sob carregamento máximo CP 12



Fonte: O autor (2022).

A Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados obtidos para todos os CPs, sendo o carregamento máximo atingido, a flecha máxima, a flecha limite para o estado limite de serviço de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), o esforço solicitante relativo à flecha do ELS e os valores de abertura de fissuras.

Tabela 2 - Resumo dos Resultados de Todos os CPs

CORPO DE PROVA	ESFORÇO MÁXIMO (N)	FLECHA MÁXIMA (mm)	FLECHA LIMITE (mm)	ESFORÇO RELATIVO À FLECHA LIMITE (N)	ESPESSURA DE FISSURAS (mm)
CP 01	38.752,00	18,2	4,2	28.123,00	1,5mm e 5,5mm
CP 02	41.429,00	15,8	4,2	30.790,00	4,0mm e 4,4mm
CP 03	40.733,00	15,8	4,2	28.319,00	2,0mm e 3,8mm
CP 04	43.449,00	16,4	4,2	31.466,00	4,5mm
CP 05	44.871,00	14,7	4,2	26.769,00	4,8mm
CP 06	46.763,00	15,9	4,2	29.701,00	2,5mm e 2,5mm
CP 07	49.077,00	7,3	4,2	31.192,00	-
CP 08	49.067,00	6,8	4,2	32.967,00	-
CP 09	49.175,00	7,2	4,2	32.162,00	-
CP 10	48.597,00	6,7	4,2	35.055,00	-
CP 11	48.989,00	5,6	4,2	36.428,00	-
CP 12	48.979,00	6,7	4,2	33.614,00	-

Fonte: O autor (2022).



## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo analisa e discute todos os resultados obtidos, de forma comparativa, em relação ao estado limite último de serviço (ELS) para os 12 CPs do escopo desta pesquisa, trazendo evidências sobre a real eficiência, ganho de propriedades e benefícios da utilização do reforço estrutural com PRFC nas vigas de concreto armado.

Nota-se que todas as vigas sem reforço do programa experimental (CP 01 a CP 06) chegaram ao regime plástico, com ruptura do concreto, porém sem a ruptura do aço das armaduras de reforço, como previsto anteriormente.

As vigas com reforço (CP 07 a CP 12) trabalharam em regime elástico, com tendência ascendente e ausência de deformações permanentes, ruptura do concreto e fissuração, sendo esse o primeiro indicativo do ganho de resistência dos CPs reforçados.

A Tabela 3 apresenta o resumo das médias de resultados obtidos para cada grupo de CPs, de forma a realizar-se um estudo comparativo entre os CPs de 20 e 35MPa, sem e com reforço.

Tabela 3 - Média dos Resultados de Todos os CPs

GRUPO	ESFORÇO MÁXIMO MÉDIO (N)	FLECHA MÁXIMA MÉDIA (mm)	FLECHA LIMITE MÉDIA (mm)	ESFORÇO RELATIVO À FLECHA LIMITE MÉDIO (N)	ESPESSURA MÉDIA DAS FISSURAS (mm)
Grupo 1	40.304,67	16,6	4,2	29.077,33	3,5
Grupo 2	45.027,67	15,7	4,2	29.312,00	3,6
Grupo 1R	49.106,33	7,1	4,2	32.107,00	-
Grupo 2R	48.855,00	6,3	4,2	35.032,33	-

Fonte: O autor (2022).

Nota-se um pequeno aumento do esforço solicitante máximo entre os CPs sem reforço de 20 e 35MPa, da ordem de 11,7%. No entanto, no que diz respeito ao esforço solicitante relativo à flecha limite, não vemos quase nenhuma diferença entre os CPs sem reforço, o que traz a ideia de que um aumento na resistência

característica do concreto ( $f_{ck}$ ), não possui o mesmo efeito positivo quando trata-se da flexão, do que teria em relação à compressão, onde essa relação é linear.

Analisando-se os valores de carga máxima dos CPs reforçados, nota-se um aumento da ordem de 21,8% entre os CPs dos grupos 1 e 1R, e da ordem de 8,5% entre os CPs dos grupo 2 e 2R. Pode-se dizer que os aumentos de carga máxima dos CPs em estudo seriam muito mais expressivos, caso esses fossem levados à ruína, principalmente devido à tendência ascendente dos gráficos dos CPs reforçados.

Já em relação à carga que provoca os deslocamentos limites do ELS, tem-se uma ampliação de 10,4% entre os CPs dos grupos 1 e 1R, e de 19,5% entre os CPs dos grupos 2 e 2R.

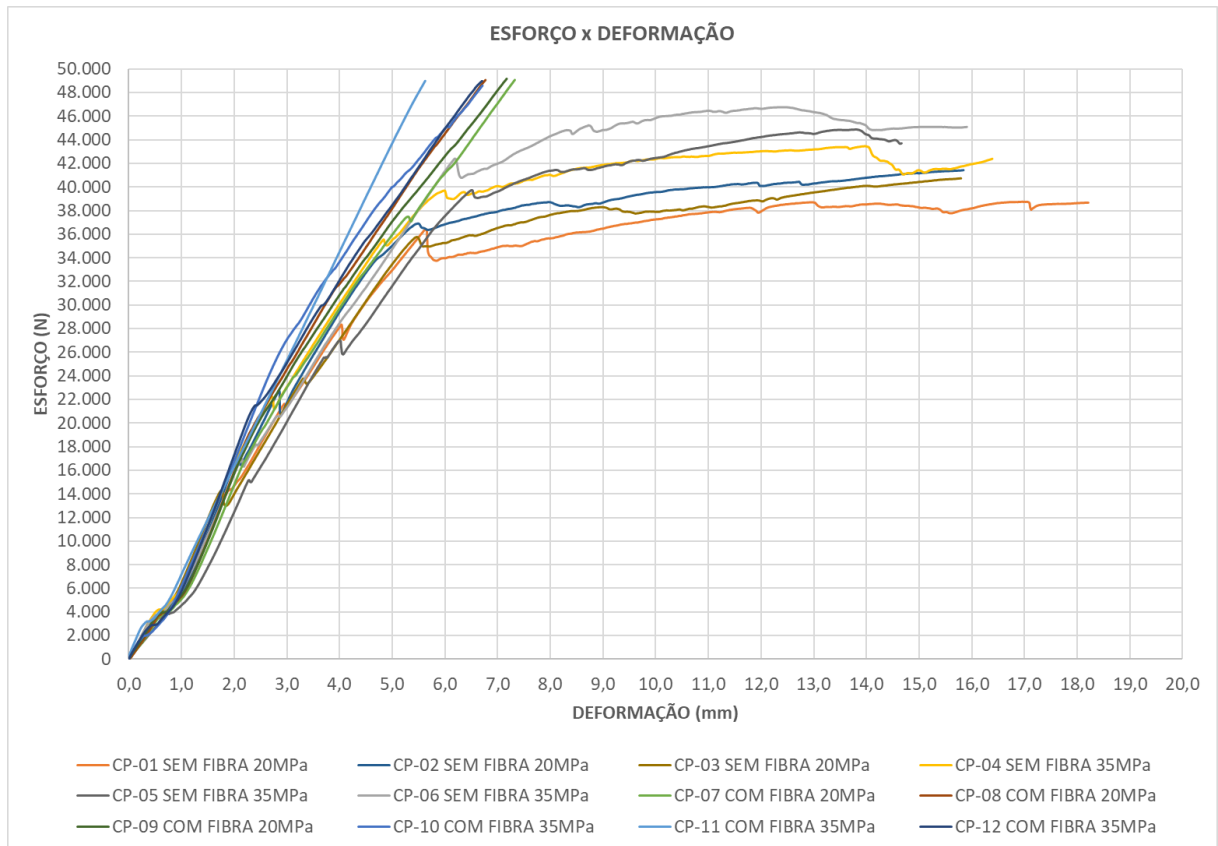
Os ganhos mais expressivos dos corpos de prova reforçados com PRFC, foram relativos às flechas e à abertura de fissuras. Nota-se que mesmo com o aumento de carga da ordem de 21,8% para os CPs com concreto de 20MPa e de 8,5% para os CPs com concreto de 35MPa, observou-se uma redução das flechas máximas em 57,2% e 59,9%, respectivamente.

Observa-se também a ausência de abertura de fissuras em todos os corpos de prova reforçados, dentro dos limites de carga aplicados no ensaios dessa pesquisa, enquanto todos os CPs sem reforço apresentaram fissuras bem maiores que os limites normativos, além de terem superado os limites de ruptura do concreto.

Essa análise permite concluir que os limites de ELS para elementos de concreto armado reforçados com PRFC, devem ser maiores do que aqueles para elementos de concreto armado sem reforço, principalmente devido ao fato de observar-se um tendência crescente em regime elástico, para todos os CPs do presente estudo.

O gráfico da Figura 75 apresenta o diagrama de Esforço x Deformação para todos os CPs em conjunto, de forma a facilitar a interpretação discutida no parágrafo anterior e avaliar as tendências positivas da utilização do reforço.

Figura 75 - Diagrama Esforço x Deformação de Todos os CPs



Fonte: O autor (2022).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, conclui-se que o concreto com adição do reforço à flexão com manta de PRFC além de elevar a capacidade de admissão de cargas da estrutura, reduz a flecha máxima oriunda de esforços de flexão e retarda o aparecimento de fissuras. As fissuras, quando aparecem, são mais distribuídas e possuem aberturas bem menores que em concretos sem essa tecnologia, como observa-se nos ensaios com os corpos de prova.

Todas essas características permitem o aumento da vida útil da estrutura, maior conforto ao usuário, maior plasticidade da estrutura e aumento do intervalo de manutenção. Além disso, o reforço com esse tipo de material faz com que a seção transversal não sofra aumento significativo em suas dimensões, fazendo com que a estrutura não fique robusta, não interferindo na estética, mantendo-se a geometria original da peça.

Ressalta-se também que o tempo de execução desse tipo de reforço é menor que os de reforços tradicionais, devido à agilidade do processo de aplicação, o que possibilita a aplicação em estruturas que possuem intenso tráfego de veículos e/ou pessoas, como o caso do viaduto Santa Tereza no município de Belo Horizonte. Este fato evidencia ainda a aplicação da técnica em casos de desastres naturais provocados por terremotos, onde geralmente ocorrem rompimento de inúmeros edifícios, pontes, passarelas, entre outras estruturas de concreto armado, necessitando-se de rápidas intervenções.

Assim, fica demonstrada a importância do tema e a necessidade de aumentar o número de pesquisas e o aprimoramento dessa tecnologia no Brasil e no mundo.

## 7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12142**. Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655**. Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

ANAPRE. **CF 003/2012**: Fibras de Aço para Concreto em Pisos Industriais Especificações. Anapre, 2012. 4 p.

AOKI, Eng<sup>o</sup> Jorge. **Fibras para Concreto**. 2010. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/fibras-para-concreto/>. Acesso em: 25 fev. 2023.

ARQUEZ, Ana Paula. **APLICAÇÃO DE LAMINADO DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARNOBO (PRFC) INSERIDO EM SUBSTRATO DE MICROCONCRETO COM FIBRAS DE AÇO PARA REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO**. 2010. 242 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

BASTOS, Paulo Sérgio. **FLEXÃO NORMAL SIMPLES: vigas**. 2020. 77 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil - Estruturas de Concreto I, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2020.

BEBER, A. J. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**. 2003. Tese (Doutorado em Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

BRONZE, R. A. **Estudo Comparativo: Uso do Sistema de Fibras de Carbono e Sistema Convencional Para Reforço de Estruturas de Concreto**. Rio de Janeiro, RJ, 2016.

BONIFÁCIO, Jéssica Spricigo da Rocha; GODINHO, Daiane dos Santos da Silva. **ESTUDO DO EFEITO DAS FIBRAS DE VIDRO E POLIPROPILENO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO**. 2014. 19 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense UNESC, Santa Catarina, 2014.

BUNDER, Jeferson. **O Concreto: sua origem, sua história..** 2016. 20 f. TCC (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

CARNEIRO, Luiz Antônio Vieira; TEIXEIRA, Ana Maria Abreu Jorge. **Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na Engenharia de Construção**. 2008. Disponível em: Acesso em: 12 nov. 2018.

CLÍMACO, João Carlos Teatini de Souza. **Estruturas de concreto armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação**. 2. ed. Brasília: Unb, 2008. 392 p.

DING, J.; HUANG, X.; ZHU, G.; CHEN, S.; WANG, G. **Mechanical Performance Evaluation of Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Materials**. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2013, Article ID 572151, 9 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/572151>

FERRARI, Vladimir José. **REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM MANTA DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO (PRFC) ADERIDO A SUBSTRATO DE TRANSIÇÃO CONSITUÍDO POR COMPÓSITO CIMENTÍCIO DE ALTO DESEMPENHO**. 2007. 328 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FERREIRA, A. C. R. P; CUNHA, J. **Análise da Distribuição do Reforço com Fibras de Carbono em Vigas de Concreto Armado**. *Ciência e Engenharia*. Uberlândia. Julho – Dez. 2013.

FIGUEIRA, S. P. S., Reforço de Pilares por confinamento com mantas de fibra de carbono Avaliação de modelos de Comportamento. 2016. Dissertação (Mestrado)- Universidade da Madeira, Funchal.

FIORELLI, Juliano. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira.** Dissertação de Mestrado, 2002. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, 2002.

GALLARDO, Silvia Maria Ascenção Guedes. **Reforço à flexão em vigas de concreto utilizando polímeros reforçados com fibras de carbono /** Silvia Maria Ascenção Guedes Gallardo. Campinas, SP: [ s.n.], 2002.

GAMA, Kelly Nara de Carvalho; COSTA, Thaís Stephanie; SILVA JUNIOR, Ladir Antonio da. Análise comparativa entre fibras de carbono, vidro e aramida para reforço estrutural em elementos de concreto armado. In: 4º CONGRESSO INTERDISCIPLINAR DE PESQUISA, INICIAÇÃO CIENTÍFICA E EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA CENTRO UNIVERSITÁRIO METODISTA IZABELA HENDRIX, 4., 2019, Belo Horizonte. **Ciência, Tecnologia e Educação: o papel da Universidade no desenvolvimento socioeconômico.** Belo Horizonte: Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix, 2019. p. 718-738.

GARCEZ, M. R. **Alternativas Para Melhoria do Desempenho de Estruturas de Concreto Armado Reforçadas Pela Colagem de Polímeros Reforçados com Fibras.** Dissertação de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

GASPARINI, L. **Avaliação da Influência do Aditivo Plastificante Multifuncional Redutor de água na Resistência Mecânica do Concreto Dosado Pelo Método ABCP.** Lajeado, 2017.

GRIBNIAK, V.; TAMULENAS, V.; NG, P.; ARNAUTOV, A. K.; GUDONIS, E.; MISIUNAITE, I. **Mechanical Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams Bonded with External Carbon Fiber Sheets.** Materials 2017, 10, 666; doi:10.3390/ma10060666.

HANNA, S. B.; YEHA A. A.; ISMAIL M. N.; KHALAF A. I. **Preparation and Characterization of Carbon Fibers from Polyacrylonitrile Precursors**. Journal of Applied Polymer Science, v. 123, 2074-2083 (2012); doi:10.1002/app.34704.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Ibracon, 2010. Cap. 29. p. 906-943.

MACHADO, Ari de Paula. **Fibras de Carbono. Manual Prático de Dimensionamento**. Belo Horizonte. Basf, 2006.

MACHADO, Ari de Paula. **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. Viapol, 2006.

MACHADO, Ari de Paula. **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. São Paulo. Editora PINI, 2002.

MARCHETTI, Antonio Carlos; ESMANHOTTO, Bruna Maria; RIBAS, Vinicius do Nascimento. **Reforço estrutural em vigas de concreto armado com a aplicação de chapas metálicas coladas com resina epóxi**. 17 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Unicid.

MC-BAUCHEMIE BRASIL. **MC CarbonFiber Sheet**. Manta de fibra de carbono para reforço estrutural. Brasil, 2020.

MENON, Nara Villanova. **ESTUDO EXPERIMENTAL DE SISTEMAS DE REFORÇO AO CISALHAMENTO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO-SE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO (PRFC)**. 2008. 332 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Estruturas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura. Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON. 2014.

MENEGHEL, Ricardo. **Concreto Armado: o que é, composição e uso. O que é, Composição e Uso**. 2022. Disponível em: <https://carluc.com.br/materiais-de-construcao/concreto-armado/>. Acesso em: 24 fev. 2023.

NOSSA, Tamires de Souza. **ESTUDO COMPARATIVO DAS TENSÕES NA INTERFACE DE COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI REFORÇADOS COM FIBRAS**



**DE CARBONO, ARAMIDA E VIDRO.** 2011. 98 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2011.

PADRO, Igor. **NBR 6118: o que muda com a nova revisão?. O que muda com a nova revisão?.** 2022. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/nbr-6118-o-que-muda-com-nova-revis%C3%A3o-igor-prado-msc/>. Acesso em: 12 out. 2022.

REGANATI, Bruno. **A História do Concreto.** 2020. Disponível em: <https://www.concretousinado.com.br/noticias/historia-concreto/>. Acesso em: 20 fev. 2023.

ROCHA, G. G. N. **Caracterização Microestrutural do Metacaulim de Alta Reatividade.** Belo Horizonte, 2005.

SILVA, Rita de Cássia da Costa; CARDOSO, Sara Grasielle Pereira; BARBOSA, Isa Lorena Silva. Estudo do concreto reforçado com fibras de vidro. **Revista Científica de Engenharia Civil**, Anápolis, v. 1, n. 1, p. 246-256, 2018.

SILVA, Vinicius Vieira da; MELLO, André Felipe Aparecido de. **ESTUDO DE MÉTODOS DE REFORÇO DE PILARES: ENCAMISAMENTO COM CONCRETO ARMADO E CONFINAMENTO COM MANTAS DE FIBRAS DE CARBONO.** Dourados: Universidade Federal da Grande Dourados.

TEXIGLASS. **Fibra de reforços:** fibra de aramida. Fibra de aramida. 2022. Disponível em: <https://texiglass.com.br/fibras-de-reforco/>. Acesso em: 25 fev. 2023.

XIE, J.; HU, R. **Experimental study on rehabilitation of corrosion-damaged reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymer.** Construction and Building Materials, 2012, 38, 708.

ZHANG, P.; LEI, D.; REN, Q.; HE, J.; SHEN, H.; YANG Z. **Experimental and numerical investigation of debonding process of the FRP plate-concrete interface.** Construction and Building Materials 235 (2020) 117457; doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117457.