



Luciana Pereira Maciel

Análise Experimental de Vigas de
Concreto Armado Reforçadas à Força
Cortante com Compósitos de Fibra de
Juta, Carbono e Vidro Utilizando a Técnica
EBR

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Orientador: Prof. Dr. Aarão F. Lima Neto

Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia



Universidade Federal do Pará - UFPA
Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia - NDAE
Programa de Pós-Graduação em Eng. de Infraestrutura e Desenv. Energético -
PPGINDE

Luciana Pereira Maciel

Análise Experimental de Vigas de Concreto Armado Reforçadas à Força Cortante com Compósitos de Fibra de Juta, Carbono e Vidro Utilizando a Técnica EBR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Infraestrutura.

Tucuruí – Pará
2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

- P436a Pereira Maciel, Luciana.
Análise Experimental de Vigas de Concreto Armado
Reforçadas à Força Cortante com Compósitos de Fibra de
Juta, Carbono e Vidro Utilizando a Técnica EBR / Luciana
Pereira Maciel. — 2022.
113 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Aarão Ferreira de Lima Neto
Coorientador(a): Prof. Dr. Wassim El Banna
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí, 2022.
1. vigas de concreto armado. 2. reforço ao
cisalhamento. 3. fibras naturais. 4. fibra de juta. I. Título.

CDD 624.1834

LUCIANA PEREIRA MACIEL

Análise Experimental de Vigas de Concreto Armado Reforçadas à Força Cortante
com Compósitos de Fibra de Juta, Carbono e Vidro utilizando a Técnica EBR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Infraestrutura.

Orientador: Prof. Dr. Aarão Ferreira Lima Neto

Aprovada em ____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA:

 Documento assinado digitalmente
AARAO FERREIRA LIMA NETO
Data: 29/09/2023 11:27:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Aarão Ferreira Lima Neto – UFPA – Orientador

Documento assinado digitalmente

 **WASSIM RAJA EL BANNA**
Data: 29/09/2023 11:58:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Wassim Raja El Banna – UFPA – Co-orientador

Documento assinado digitalmente

 **MAURICIO DE PINA FERREIRA**
Data: 29/09/2023 13:19:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mauricio de Pina Ferreira – UFPA – Examinador Interno

Documento assinado digitalmente

 **ROBERTO TETSUO FUJIYAMA**
Data: 29/09/2023 18:18:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama – UFPA – Examinador Externo

Documento assinado digitalmente

 **LEANDRO MOUTA TRAUTWEIN**
Data: 25/10/2023 08:51:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Leando Mouta Trautwein – UNICAMP – Examinador Externo

*“É justo que muito custe
o que muito vale”*

Santa Tereza D’Ávila

AGRADECIMENTOS

Inicialmente gostaria de agradecer a Deus e Nossa Senhora, aos quais recorro em todos os momentos, bons e ruins. Agradeço por iluminarem meus caminhos, acalmarem meu coração e me conduzirem à conclusão deste mestrado. Agradeço, inclusive, pelos atrasos e imprevistos, pois certamente tudo aconteceu como e no tempo que precisava acontecer.

Devo agradecer ao meu professor e orientador, Aarão Ferreira de Lima Neto, por ter aceitado estar comigo neste mestrado, por todo o auxílio prestado quando eu estava em Tucuruí e, acima de tudo, por não ter deixado eu desistir quando isso foi uma opção no começo do projeto.

À parceira de quarto, laboratório e grande amiga que fiz durante este período, Carla Feitosa. Dividimos nossos medos, angústias, mas também nossas conquistas e alegrias a cada etapa alcançada. Obrigada por tornar tudo mais fácil.

Agradeço à todos os alunos de graduação que se disponibilizaram a me ajudar nas diversas fases deste estudo, em especial, ao Edil Santos que sempre foi muito solícito e não mediu esforços para que tudo desse certo, e ao Paulo Sérgio que sempre se preocupou em me dar boas soluções e estar presente quando precisei.

Também gostaria de agradecer a toda a equipe presente no Laboratório de Engenharia Civil e de Mecânica de Tucuruí, em especial, à técnica Francirene Bonfim e ao estagiário Adson, que garantiram com que eu me sentisse bem adaptada e me acompanharam nos diversos ensaios necessários nos últimos meses, e aos vigilantes seu Jackson e seu Antônio que permitiam meu acesso e permanência no laboratório, por muitas vezes até tarde. Obrigada por todo auxílio e paciência. Agradeço também ao motorista da UFPA seu Leandro, que sempre que pôde, me conduziu por muitas vezes até os laboratórios, ao campus ou até a cidade, e com muita paciência, me ajudava a procurar lojas para comprar os materiais que precisava.

Agradeço às empresas TexiGlass e FiberTex por terem acreditado no projeto e se disponibilizarem a doar materiais para a concretização da pesquisa.

Um agradecimento muito especial ao professor Manoel Mangabeira que me auxiliou em todas as fases do mestrado, e, com toda a experiência, inteligência e sinceridade, me corrigiu, me orientou e aconselhou sobre normas, cálculos e vida acadêmica, agradeço também pelas caronas e conversas. E ao professor Jedson

Abrantes que foi muito querido e solícito e, com muita paciência e alegria, disponibilizou horas do seu tempo para ensinar processos práticos de laboratório. Sem vocês, esse mestrado não seria possível.

Agradeço também aos professores Roberto Fujiyama e Wassim El Banna pelas contribuições e auxílios ao projeto. E ao colaborador seu Lindomar que executou os trabalhos braçais com muito zelo e competência.

Aos meus familiares, em especial meus avós, tios e primos, com os quais tenho muita conexão, momentos de alegria e conversas construtivas. E aos meus amigos, Bárbara, Felipe, Elice, Mayara, Iury, Carla, Caio, Luma e Carolina com os quais sempre tive apoio, sinceridade e momentos de distração que aliviavam as tensões dos estudos. Obrigada por melhorarem minha vida e por me incentivarem a continuar.

Agradeço de todo meu coração ao meu melhor amigo e amor, Regis Almeida Barros, por estar ao meu lado desde o começo dessa jornada e, principalmente, nos momentos em que me entristeci e me desesperei, por escutar minhas reclamações e sempre me oferecer ajuda. Obrigada por vibrar comigo pelas pequenas conquistas, por acreditar em mim e por tornar tudo mais leve. Agradeço também à sua família que se tornou minha e está sempre na torcida por mim.

Por fim, agradeço imensamente aos meus pais, Carlos Alberto Maciel Pereira e Maria do Socorro Maciel Pereira, por todo o apoio e compreensão durante os últimos dois anos, principalmente nas viagens para Tucuruí. Agradeço também por serem responsáveis pela minha formação durante toda a minha vida, por me incentivarem nos estudos e estarem comigo em todas as minhas decisões até aqui.

RESUMO

A aplicação de FRP (Polímero Reforçado com Fibras) com a técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) para reparo e reforço de estruturas se destaca devido à baixa densidade do material e facilidade de aplicação. Neste caso, é comum o uso de fibras sintéticas, entretanto, estas fibras são consideradas pouco acessíveis e nocivas ao meio ambiente. Isto deu impulso à estudos acerca da substituição das fibras sintéticas pelas fibras naturais. Diante disso, este trabalho consiste na análise experimental do desempenho de compósitos de fibras de juta como reforço ao cisalhamento. Para tanto, foram moldadas sete vigas de concreto armado reforçadas com FRP's utilizando a técnica EBR, dimensionadas com maior resistência à flexão em relação à força cortante e com as armaduras transversais posicionadas somente em um trecho do vão, para induzir a ruptura por cisalhamento na região sem estribos. As vigas possuem 2 metros de comprimento e seção transversal de (15x20) cm. Uma viga não foi reforçada, para ser utilizada como referência, uma viga foi reforçada com uma camada de FRP com fibra de carbono, uma viga com duas camadas de FRP de fibra de vidro, duas com FRP híbrido de camadas de fibra de vidro e juta com três e quatro camadas, e, por fim, duas com FRP de fibra de juta com duas e três camadas. Os reforços foram aplicados em faixas ao longo do comprimento do vão de cisalhamento dos elementos, perpendiculares ao eixo das vigas, em U. Observou-se que o reforço com duas camadas de fibra de juta apresentou 48% de incremento de força cortante da viga em relação à viga de referência, resultado similar ao observado na viga reforçada com uma camada de fibra de carbono. Outros comportamentos positivos foram observados nas outras vigas reforçadas, como controle de fissuração, aumento de força cortante máxima e contenção de deslocamento vertical em relação à viga de referência. Os resultados experimentais foram comparados a resultados teóricos calculados conforme as normas ABNT NBR 6118 (2004), ACI 318 (2014), Eurocode 2 (2004), ACI 440.2R (2017) e *fib* 90 (2019). Após análise, os resultados iniciais desta pesquisa demonstram viabilidade para outros estudos aprofundados sobre a utilização de fibras de juta em reforços ao cisalhamento de vigas de concreto armado.

Palavras Chave: Viga de concreto armado; Reforço ao cisalhamento; Fibras naturais; Fibra de juta.

ABSTRACT

The application of FRP (Fiber Reinforced Polymer) with the EBR (Externally Bonded Reinforcement) technique for repairing and reinforcing structures stands out due to the low density of the material and ease of application. In this case, the use of synthetic fibers is common, however, these fibers are considered inaccessible and harmful to the environment. This disadvantages raised studies on the replacement of synthetic fibers by natural fibers. Therefore, this work consists of the experimental analysis of the performance of composites of jute fibers as shear reinforcement. With that aim, seven reinforced concrete beams reinforced with FRP's were molded using the EBR technique, they were dimensioned with greater flexural strength in relation to the shear force and with transverse reinforcement positioned only in a section of the span, to induce shear failure in the region without stirrups. The beams are 2 meters long and have a cross section of (15x20) cm. One beam was not reinforced, to be used as a reference, one beam was reinforced with one layer of FRP with carbon fiber, one beam with two layers of FRP with glass fiber, two with hybrid FRP of layers of glass and jute fiber with three and four layers, and finally two beams with jute fiber FRP with two and three layers. The reinforcements were applied in strips along the length of the shear span of the elements, perpendicular to the axis of the beams, U-shaped. It was observed that the reinforcement with two layers of jute fiber presented a 48% increase in shear force of the beam in relation to the reference beam, this result was similar to that observed in the beam reinforced with one layer of carbon fiber. Other positive behaviors were observed in the other reinforced beams, such as cracking control, increase in maximum shear force and containment of vertical displacement in relation to the reference beam. The experimental results were compared to theoretical results calculated according to ABNT NBR 6118 (2004), ACI 318 (2014), Eurocode 2 (2004), ACI 440.2R (2017) and fib 90 (2019). After analysis, the initial results of this research demonstrate the viability for other in-depth studies on the use of jute fibers in shear reinforcement of reinforced concrete beams.

Keywords: Reinforced concrete beam; Shear reinforcement; Natural fibers; Jute fiber.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais.....	1
1.2 Justificativa.....	2
1.3 Objetivo Geral.....	3
1.3.1 Objetivos Específicos	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Cisalhamento em Vigas de Concreto Armado.....	4
2.2 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras (FRP)	5
2.3 Reparo e Reforço Estrutural com FRPs	7
2.4 <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)</i>	9
2.4.1 Pesquisas Sobre CFRP em Reforço à Força Cortante de Vigas de Concreto Armado	9
2.5 <i>Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)</i>.....	16
2.5.1 Pesquisas Sobre GFRP em Reforço e Reparo de Vigas de Concreto Armado	17
2.6 Fibras Naturais	20
2.6.1 Fibra de Juta	22
2.6.1.1 Aplicações.....	24
2.6.2 Limitações e Técnicas de Aperfeiçoamento	24
2.6.3 Pesquisas Sobre o Uso de JFRP em Reforço de Vigas de Concreto Armado	27
2.7 Recomendações Normativas	33

2.7.1 Guia para Projeto e Construção de Sistemas de FRP Colados Externamente para Reforço de Estruturas de Concreto (ACI 440 2R-2017)	33
2.7.2 Reforço de FRP Colado Externamente para Estruturas de Concreto Armado (fib Bulletin 90).....	37
2.7.3 Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento (ABNT NBR 6118:2014)	41
2.7.3.1 Armadura longitudinal de vigas.....	41
2.7.3.2 Verificação de resistência à força cortante	42
2.7.4 Requisitos do Código de Construção para Concreto Estrutural (ACI 318-19)	43
2.7.5 Projeto de Estruturas de Concreto – Parte 1-1: Regras Gerais e Regras para Construções (Eurocode 2 1992-1-1:2004).....	45
2.8 Considerações sobre a revisão bibliográfica	47
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	49
3.1 Característica das Vigas	49
3.2 Sistema de Ensaio.....	52
3.3 Instrumentação.....	53
3.3.1 Deslocamento vertical	53
3.3.2 Deformações de Flexão	54
3.3.3 Deformação nos FRPs	55
3.3.4 Abertura de Fissura e Descolamento das Faixas de FRP.....	57
3.4 Materiais.....	58
3.4.1 Concreto.....	58
3.4.2 Aço	59
3.4.3 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibra (FRP)	59
4 RESULTADOS.....	63

4.1 Materiais.....	63
4.1.1 Concreto.....	63
4.1.2 Aço.....	64
4.1.3 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibra (FRP).....	64
4.2 Vigas de Concreto Armado	67
4.2.1 Deformações de flexão	67
4.2.2 Modos de ruptura	67
4.2.3 Deslizamento das faixas de FRP	70
4.2.4 Abertura de fissura	71
4.2.5 Deslocamento vertical	77
4.2.6 Deformação nas fibras	78
4.2.7 Carga última e revisão normativa.....	83
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	85
5.1 Conclusões	88
5.2 Sugestão para trabalhos futuros	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Forças internas de uma viga rompida sem armadura transversal (Wight e MacGregor, 2011)	5
Figura 2.2 – Analogia da treliça (Adaptado de Fusco, 2008).....	5
Figura 2.3 – Ranhura para faixas de NSM-CFRP (mm) (Adaptado de Saadah, 2021)	8
Figura 2.4 – Posição e configuração de faixas de CFRP (cm) (Adaptado de Karzad <i>et al.</i> , 2019)	10
Figura 2.5 – Contribuição média da força cortante nas vigas reforçadas analisadas (Adaptado de Karzad <i>et al.</i> , 2019).....	11
Figura 2.6 – Configuração de vigas reforçadas com mantas de CFRP (mm) (Adaptado de Guo <i>et al.</i> , 2021).....	12
Figura 2.7 – Configurações das vigas de 1,22 m (mm) (Adaptado de Zhange <i>et al.</i> , 2005)	14
Figura 2.8 – Carregamento máximo suportado pelas vigas de controle e pelas vigas reforçadas (Adaptado de Sundarraja e Rajamohan, 2009).....	20
Figura 2.9 – Classificação das fibras naturais (Adaptado de Sadiqsha e Pradeep, 2020)	21
Figura 2.10 – Relação entre tensão de tração e deformação dos compósitos (Adaptado de Rafiquzzaman <i>et al.</i> , 2016)	26
Figura 2.11 – Relação entre tensão de flexão e deformação dos compósitos. (Adaptado de Rafiquzzaman <i>et al.</i> , 2016)	27
Figura 2.12 – Característica das vigas ensaiadas (mm) (Adaptado de Jirawattanasomkul <i>et al.</i> , 2020).....	28

Figura 2.13 – Relação entre força cortante total e deformação no meio do vão após reforço aplicado nas fases pré-danificada (Adaptado de Jirawattanasomkul <i>et al.</i> , 2020)	30
Figura 2.14 – Detalhes das vigas reforçadas (Adaptado de Alam e Riyami, 2018)...	32
Figura 2.15 – Esquemas de envolvimento típicos para reforço à força cortante utilizando FRP (Adaptado de ACI 440.2R, 2017)	35
Figura 2.16 – Ilustração das variáveis dimensionais utilizadas em cálculos de reforço ao cisalhamento para reparo, renovação ou reforço com laminados de PRF (Adaptado de ACI 440.2R, 2017).....	36
Figura 3.1 – Dimensionamento das vigas estudadas e detalhamento de armaduras (mm).....	49
Figura 3.2 – Envolvimento da viga com os FRPs de reforço, em U, com espessura t_f	51
Figura 3.3 – Dimensões e posicionamento dos FRPs nas vigas (mm)	51
Figura 3.4 – Continuação Figura 3.3 (mm).....	52
Figura 3.5 – Sistema de ensaio (mm)	52
Figura 3.6 – Posição do potenciômetro no vão das vigas (mm).....	53
Figura 3.7 – Imagem fotográfica do potenciômetro posicionado no sistema.....	54
Figura 3.8 – Posição do EER na armadura de flexão (mm)	54
Figura 3.9 – Imagem fotográfica do EER posicionado na armadura	55
Figura 3.10 – Posição do EER no concreto (mm)	55
Figura 3.11 – Imagem fotográfica do EER posicionado na superfície do concreto ...	55
Figura 3.12 – Posição dos EER nos FRPs (mm)	56
Figura 3.13 – Posição dos LVDTs e potenciômetros (mm)	57
Figura 3.14 – Continuação Figura 3.13.....	58

Figura 3.15 – Imagem fotográfica dos LVDT's posicionados	58
Figura 3.16 – Imagem fotográfica do posicionamento dos potenciômetros	58
Figura 3.17 – Vigas concretadas.....	59
Figura 3.18 – Corpos de prova.....	59
Figura 3.19 – Resina de poliéster.....	60
Figura 3.20 – Placas de FRP para corpos de prova.....	61
Figura 3.21 – Continuação Figura 3.20	62
Figura 4.1 – Relação tensão-deformação do aço de flexão	64
Figura 4.2 – Relação tensão-deformação FRPs	65
Figura 4.3 – Média dos resultados de cada material FRP.....	66
Figura 4.4 – Força-deformação específica de flexão das vigas	67
Figura 4.5 – Vigas rompidas após ensaios	68
Figura 4.6 – Detalhes do modo de ruptura das vigas.....	69
Figura 4.7 – Gráficos força-deslocamento das faixas de FRP	70
Figura 4.8 – Continuação Figura 4.7	71
Figura 4.9 – Força-abertura de fissura de cisalhamento	72
Figura 4.10 – Estágios de carregamento utilizados nas figuras	73
Figura 4.11 – Abertura de fissuras viga Ref.	73
Figura 4.12 – Abertura de fissuras viga C	74
Figura 4.13 – Abertura de fissuras viga GG	74
Figura 4.14 – Abertura de fissuras viga JGJ	75
Figura 4.15 – Abertura de fissuras viga GJGJ.....	75
Figura 4.16 – Abertura de fissuras viga JJ	76
Figura 4.17 – Abertura de fissuras viga JJJ	76
Figura 4.18 – Gráfico força-deslocamento de flexão das vigas.....	78

Figura 4.19 – Força-deformação nas faixas de FRP	79
Figura 4.20 – Contribuição dos reforços para a resistência à força cortante	80
Figura 4.21 – Continuação Figura 4.20	81
Figura 4.22 – Deformações dos FRPs	81
Figura 4.23 – Continuação Figura 4.22	82
Figura 4.24 – Comparação entre forças experimentais e previsões teóricas	86
Figura 4.25 – Comparação entre incrementos experimentais e previsões teóricas ..	87
Figura 4.26 – Comparação entre resultados de força cortante do concreto experimentais e teóricas	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resultados teóricos calculados e resultados experimentais (Adaptado de Guo <i>et al.</i> , 2021).....	13
Tabela 2.2 – Resultados experimentais para a série de vigas de 1,22 m de comprimento (Adaptado de Zhange <i>et al.</i> , 2005)	15
Tabela 2.3 – Apresentação do custo total e da necessidade de operação de perfuração (Adaptado de Nikoloutsopoulos <i>et al.</i> , 2018).....	16
Tabela 2.4 – Resumo dos resultados dos ensaios (Adaptado de Baggio <i>et al.</i> , 2014)	18
Tabela 2.5 – Propriedades mecânicas das fibras de juta, vidro e carbono (Adaptado de Alves <i>et al.</i> , 2010).....	23
Tabela 2.6 – Propriedade das fibras de kenaf, fibras de juta e fios de juta. (Adaptado de Alam e Riyami, 2018)	31
Tabela 2.7 – Resumo dos resultados experimentais obtidos (Adaptado de Alam e Riyami, 2018)	32
Tabela 2.8 – Fator de redução ambiental para vários sistemas de FRP e condições de exposição (Adaptado de ACI 440 2R, 2017)	35
Tabela 3.1 – Características das vigas	50
Tabela 3.2 – Descrição dos sistemas de reforço.....	50
Tabela 3.3 – Traço do concreto utilizado nas vigas	59
Tabela 3.4 – Propriedades da resina dos FRPs.....	60
Tabela 3.5 – Descrição dos corpos de prova de FRP	62
Tabela 4.1 – Propriedades do concreto das vigas	63
Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas dos FRPs ensaiados	66
Tabela 4.3 – Estágios de carregamento utilizados nas figuras	73

Tabela 4.4 – Resumo de resultados máximos obtidos de força-deslocamento.....	78
Tabela 4.5 – Resumo das características e propriedades das vigas	83
Tabela 4.6 – Valores de carregamento máximo calculados	86

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A falha por força cortante pode ocorrer por diversos fatores, como corrosão do estribos, espaçamento superior ao indicado, ou mudança de utilização da edificação. Para isso, existem os processos de reforço e reparo estrutural de elementos de uma edificação, os quais têm função de, respectivamente, aumentar sua capacidade resistente e recuperar a estabilidade perdida. Atualmente, técnicas como encamisamento, concreto projetado, protensão externa, aplicação de chapas e de perfis metálicos são amplamente utilizadas para este fim, porém apresentam algumas desvantagens, como o aumento de seção e massa da estrutura, tempo longo e dificuldade de aplicação, as quais, em muitas circunstâncias, podem ser superadas com o reforço com Polímeros Reforçados com Fibras (FRP). O FRP é um material formado por fibras contínuas e uma matriz de resina. As resinas poliésteres são comuns em compósitos, pois possuem baixo custo e alta facilidade de serem moldadas à temperatura ambiente.

Quando empregado como reforço estrutural, principalmente por meio da técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*), ou seja, externamente colado, o FRP demanda menor tempo de aplicação, possui maior durabilidade e não aumenta a seção ou o peso da peça de forma significativa. As fibras mais utilizadas neste material são as de carbono, pois acrescentam características relevantes ao reforço, como resistência mecânica e à corrosão, além de ter alto módulo de elasticidade. No entanto, com a crescente preocupação de pesquisadores com a sustentabilidade, as fibras naturais passam a ser cada vez mais estudadas a fim de substituírem total ou parcialmente as fibras sintéticas em compósitos de FRP.

As fibras naturais, além do seu baixo custo, apresentam ampla disponibilidade e baixa densidade. Dentre elas, a fibra de juta se destaca devido seu menor preço, maior disponibilidade e durabilidade em comparação às demais fibras naturais. No Brasil, a cultura da planta de juta se tornou uma das principais atividades econômicas das populações ribeirinhas da região amazônica, ou seja, além de contribuir com o biossistema, a juta gera renda. No que se refere à sua aplicação, na construção civil, esta fibra tem sido utilizada na confecção de esquadrias, no entanto, pesquisas demonstram também efetividade no uso da fibra, com tratamento, em compósitos

cimentícios, conferindo maior capacidade mecânica, maior tenacidade e ductilidade, e menor porosidade ao material. Além disso, os autores Jirawattanasomkul *et al.* (2020) concluíram em seu estudo que o reforço com quatro camadas de Polímero Reforçado com Fibra de Juta (JFRP), externamente colado, aumentou em 56% a resistência cortante de uma viga danificada e previamente reparada com epóxi, submetida a forças de flexão cíclicas de três pontos, resultado comparável à vigas reforçadas com fibras convencionais, como carbono e vidro.

1.2 Justificativa

Estudos acerca da utilização de fibras naturais como reforço em materiais de FRP têm ganhado força em recentes tendências de trabalhos de pesquisa sobre compósitos, devido seu potencial para substituir fibras sintéticas (PANNEERSELVAM *et al.*, 2020). As fibras de carbono apresentam natureza sintética e sua produção exige etapas complexas, que demandam maior consumo de energia, o que torna o produto oneroso e nocivo ao meio ambiente. A fibra de juta, por outro lado, é um recurso renovável, de fácil fabricação, baixo custo e ampla disponibilidade. Sendo a sua planta cultivada exclusivamente para a extração de fibras (IMAN e MAJI, 2014)

Segundo Liu *et al.* (2009), a planta de juta pode ser plantada em rios, depressões e solos salino-alcálinos, e nenhum pesticida e fertilizante são necessários durante seu crescimento. Também pode ser colhida duas ou três vezes ao ano, o que resulta em alto rendimento e baixo custo. Além disso, a fibra de juta tem quase a maior resistência específica dentre as fibras naturais, o que é muito relevante para a otimização de um compósito.

No que se refere ao uso de FRPs para reparo e reforço de estruturas, Chen *et al.* (2020) afirmam que a deformação efetiva permitida para estes materiais com fibras sintéticas pela maioria das normas de projeto é muito baixa em comparação com a sua deformação de ruptura, o que significa que a maior parte da capacidade de tração do FRP sintético, que possui alto custo, é desperdiçada.

Este mesmo autor constatou em sua pesquisa que, devido os compósitos de Polímero Reforçado com Fibras Naturais (NFRP) e o concreto possuem módulo de elasticidade similares, vigas de concreto armado reforçadas com NFRP falharam por ruptura de FRP, atingindo maiores valores de força última e melhor ductilidade do que

as reforçadas com CFRP. Neste estudo, as fibras naturais utilizadas foram tecidos de fibra de linho e de juta.

Deste modo, o desenvolvimento de estudos sobre a utilização de tecidos de fibra de juta em FRP's para reforço de estruturas pode interferir, de forma positiva, na economia e sustentabilidade deste processo, mantendo as principais características das técnicas de reparo e reforço com Polímeros Reforçados com Fibras sintéticas, como preservação da seção e do peso da estrutura, e facilidade e rapidez de aplicação. Além da possibilidade de conservar sua capacidade resistente, a depender da quantidade de reforço utilizada ou do processo de hibridização.

1.3 Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa é verificar a viabilidade do uso de FRP's com fibras de juta para reforço à força cortante de vigas de concreto armado.

1.3.1 Objetivos Específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos os seguintes tópicos:

- Comparar o desempenho da fibra de juta com o desempenho das fibras sintéticas de carbono e vidro como reforço à força cortante.
- Avaliar o desempenho das vigas de concreto armado reforçadas à força cortante com compósito híbrido de tecidos de fibra de juta e fibra de vidro.
- Comparar os resultados experimentais com os resultados estimados com base em recomendações normativas encontradas nas normas ABNT NBR 6118 (2004), ACI 318 (2019), Eurocode 2 (2004), ACI 440.2R (2017) e *fib* 90 (2019) e adaptações para fibras naturais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

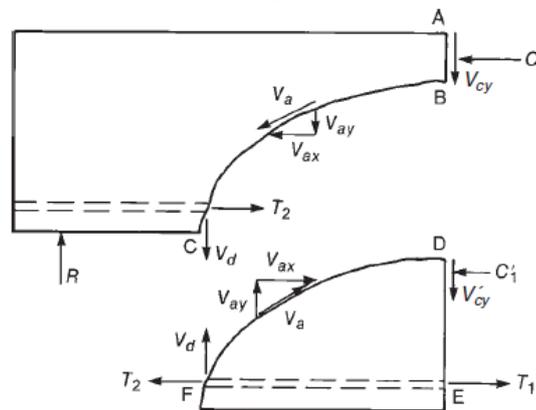
2.1 Cisalhamento em vigas de concreto armado

Uma viga resiste a carregamentos principalmente por meio de momentos internos e cisalhamento (WIGHT e MACGREGOR, 2011). Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014) as vigas submetidas a um carregamento vertical qualquer, com ou sem força normal, estão trabalhando a flexão simples ou composta não pura, onde o momento fletor é variável e a força cortante é diferente de zero. Desta forma, surgem tensões normais e tangenciais, sendo estas últimas para equilibrar o esforço cortante.

De acordo com Wight e MacGregor (2011), as falhas por cisalhamento podem variar muito de acordo com as dimensões, geometria, carregamento e propriedades dos elementos. Dentre os tipos de colapso que podem ocorrer em uma viga por força cortante tem-se: ruptura por escoamento da armadura transversal e esmagamento do concreto nas bielas de compressão (CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO, 2014). Sendo assim, segundo Samora *et al.* (2017), o cálculo da resistência ao cisalhamento de vigas, sob a orientação de muitas normas, modelos e códigos, é feito por meio da soma da parcela de resistência fornecida pelo concreto à parcela de resistência fornecida pela armadura transversal.

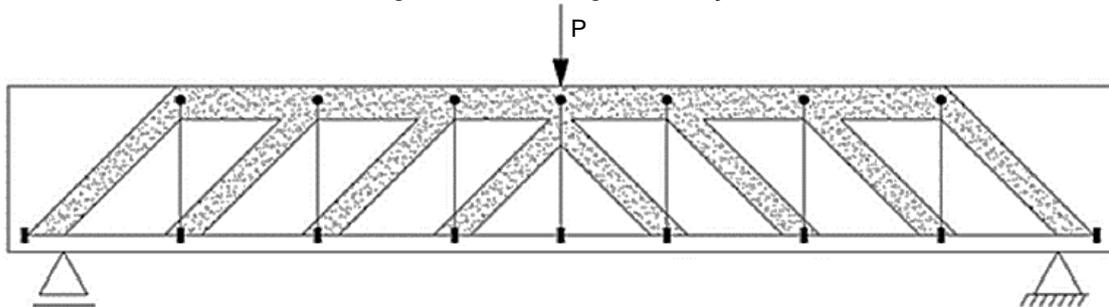
Em vigas sem armadura transversal ou com armadura ineficaz, a força cortante passa a ser resistida apenas pelo concreto por meio de mecanismos de equilíbrio. De acordo com Wight e MacGregor (2011), a força cortante é transferida ao longo do elemento estrutural através da linha A–B–C visualizada na Figura 2.1, pelo cisalhamento na zona de compressão (V_{cy}), pela componente vertical do cisalhamento transferida através da fissura pelo engrenamento dos agregados nas duas faces da fissura (V_{ay}) e pelo efeito pino da armadura longitudinal (V_d). Vigas com armadura transversal, segundo Fusco (2008), apresentam comportamento similar à treliça, onde as bielas diagonais entre as fissuras de cisalhamento e o banzo superior da viga resistem à esforços de compressão, e as armaduras transversais e longitudinais trabalham resistindo às forças de tração, esta representação pode ser visualizada na Figura 2.2.

Figura 2.1 - Forças internas de uma viga rompida sem armadura transversal.



Fonte: Wight e MacGregor (2011)

Figura 2.2 – Analogia da treliça.



Fonte: Adaptado de Fusco (2008)

2.2 Compósitos Poliméricos Reforçados Com Fibras (FRPs)

De acordo com Guo *et al.* (2021), o Compósito Polimérico Reforçado com Fibras (FRP) é um tipo de material de alto desempenho, formado pela combinação de fibras contínuas e uma matriz, que possui bons atributos, como baixa densidade, alta resistência, resistência à corrosão, boas propriedades elásticas e bom isolamento. Segundo Wang *et al.* (2019), os compósitos podem ser definidos em três categorias quanto à sua matriz: compósitos de matriz polimérica, compósitos de matriz metálica e compósitos de matriz cerâmica. Entre eles, se destacam os compósitos de matriz polimérica devido as suas características de menor densidade, capacidade de ser moldado em diferentes formas e tamanhos, resistência à corrosão e menor custo.

De acordo com Neto e Pardini (2006) os polímeros termofixos são os mais utilizados como matrizes em compósitos, devido ao baixo custo de sua matéria-prima e processamento em relação às matrizes termoplásticas. Segundo Sanchez *et al.* (2010) as resinas termofixas são comumente utilizadas devido às diversas vantagens como: baixo custo, estabilidade térmica e dimensional, resistência química e facilidade

de se moldar, no entanto a sua baixa resistência à fratura torna necessária a utilização de reforços. Segundo Goodman (1998) as resinas de poliéster são uma família de polímeros de alto peso molecular, formados da reação de ácidos orgânicos carboxílicos e glicóis, de acordo com o tipo do ácido empregado, o poliéster pode ser saturado (termoplástico) ou insaturado (termofixo). Há um grande número de diferentes resinas que podem ser matrizes em compósitos, porém as resinas poliésteres insaturadas são as mais utilizadas, devido ao seu baixo custo e por serem facilmente moldadas à temperatura ambiente. Estas resinas são utilizadas principalmente com reforço de fibra de vidro para diversas aplicações, tais como partes de aviões experimentais, painéis de construção, componentes elétricos e motores, partes automotivas e dutos, entre outras (CHEREMISINOFF, 1995).

O primeiro FRP surgiu em 1935, e evoluiu durante a Segunda Guerra Mundial, com a necessidade de materiais mais leves. Após a guerra, durante os anos 70, várias resinas e fibras sintéticas foram descobertas, o que mudou completamente o uso dos FRPs. Fibras sintéticas como fibras de vidro, carbono e aramida são atualmente o material de reforço mais comum nos compósitos poliméricos, devido ao seu comportamento mecânico exclusivo em várias aplicações (VIGNESHWARAN *et al.*, 2020). Na construção civil, mantas, tecidos e laminados de Polímero Reforçado com Fibras de Carbono, externamente colados, são utilizados para reparo e reforço de estruturas de concreto, esta técnica supera desvantagens comuns das convencionais, como dificuldade de aplicação e pouca durabilidade (KARZAD *et al.*, 2019).

Segundo Senthilkumar *et al.* (2018), as fibras utilizadas em um FRP podem ser sintéticas ou naturais. Os compósitos reforçados com fibras sintéticas têm excelentes propriedades mecânicas em comparação com os compósitos reforçados com fibras naturais. No entanto, as limitações das fibras sintéticas, devido à sua não degradabilidade, geram a poluição do meio ambiente de forma preocupante. Assim, dependendo da aplicação e dos requisitos de resistência, é aconselhável que as fibras sintéticas sejam parcial ou totalmente substituídas pelas fibras naturais.

A fim de melhorar sua durabilidade, existem estudos acerca de métodos de tratamento e revestimento das fibras naturais, por este motivo, o emprego de compósitos reforçados com fibras naturais têm crescido rapidamente. Assim, em alguns setores, estas fibras passam a poder substituir materiais à base de metal ou cerâmicas, como em indústrias automotivas, aeroespaciais, eletrônicas e de construção (BELLO *et al.*, 2019). Além disso, conforme apresenta Sanjay *et al.* (2018),

compósitos híbridos de fibras naturais podem substituir compósitos reforçados com fibras sintéticas como elementos estruturais ou semiestruturais, principalmente em aplicações de peso leve.

2.3 Reparo e Reforço estrutural com FRPs

O concreto armado pode vir a se deteriorar por muitos fatores, devido projeto inadequado, seleção de materiais de baixa qualidade, corrosão e falta de manutenção, o que acaba diminuindo a vida útil das estruturas, e, portanto, reparos são essenciais (KARZAD *et al.*, 2019). De forma geral, segundo Arcine e Menon (2021), as vigas são calculadas para serem mais resistentes à força cortante do que à flexão, a fim de evitar o modo de falha frágil. No entanto, alguns fatores podem tornar esta mesma viga menos resistente ao cisalhamento, como mudança de carregamento ou corrosão dos estribos, e, portanto, surge a necessidade de reforços nesta região. De acordo com Saadah *et al.* (2021), o reforço à flexão e à força cortante de elementos estruturais de concreto armado usando FRPs tornou-se uma solução amplamente adotada. O compósito pode ser aplicado por meio de algumas técnicas, como EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) e NSM (*Near Surface Mounted*), além da técnica ETS (*Embedded Through-Section*) proposta para vigas e reforço à força cortante.

A técnica NSM consiste na execução de ranhuras na superfície do concreto do elemento estrutural com o auxílio de uma serra elétrica, estas ranhuras devem ser preenchidas com algum tipo de resina ou argamassa, juntamente com faixas (Figura 2.3) ou barras de FRP (MOSTOFINEJAD *et al.*, 2019). Segundo Saadah (2021), os autores Lorenzis e Nanni, em sua pesquisa, demonstraram que a resistência à flexão e à força cortante em vigas de concreto armado aumentou significativamente quando reforçadas com hastes de GFRP e CFRP utilizando a técnica NSM. A resistência à flexão aumentou em cerca de 26% a 44% e a resistência à força cortante em até 106% em comparação com a viga de controle.

No caso da técnica ETS, barras de aço ou FRP são inseridas em furos perfurados que atravessam a seção transversal da viga e são coladas ao concreto ao seu redor utilizando adesivo epóxi. Neste caso, o concreto proporciona um alto confinamento às barras, o que aumenta a resistência de aderência (BREVEGLIERI *et al.*, 2015). Barros e Dalfré (2012) realizaram em seu estudo ensaios experimentais utilizando esta técnica para reforço de vigas de concreto armado à força cortante. Os

autores obtiveram resultados com aumentos de até 124% de capacidade de carga, comprovando eficácia e custo competitivo no uso da técnica ETS. Além disso, as vigas com maior porcentagem de barras ETS falharam por flexão, apesar da porcentagem alta de armadura longitudinal utilizada, o que também demonstra aumento significativo de resistência à força cortante fornecido pelo reforço aplicado.



Fonte: Adaptado de Saadah (2021).

Técnicas de reforço e reabilitações convencionais, tais como adição de membros estruturais e alargamento de seção, podem apresentar menor durabilidade e dificuldade de execução, entre outros empecilhos. Contudo, o uso de FRP externamente colado (EBR) surge como uma tecnologia de reabilitação que supera alguns desses inconvenientes (KARZAD *et al.*, 2019). A técnica é também conhecida por outras siglas encontradas na literatura, como, por exemplo EB (*Externally Bonded*), no entanto, para manter um padrão ao longo deste trabalho a sigla EBR foi adotada pois é a mais utilizada em pesquisas publicadas. De acordo com Guo *et al* (2021), no fim dos anos 90, a tecnologia de reforço com compósitos de fibras por meio da técnica EBR foi amplamente utilizada em pontes de concreto armado. Ramseyer e Kang (2012) publicaram sobre ensaios de força cortante em vigas de concreto para determinar a resistência final de diferentes métodos de reforço, dentre eles, o CFRP externamente colado, o qual demonstrou melhora significativa na rigidez das vigas.

Além disso, na norma *Fib Bulletin 14* (2001) afirma-se que vários trabalhos já foram publicados acerca do uso de mantas, tecidos e laminados de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) no reforço à flexão de vigas de concreto armado, e a técnica mais utilizada consiste na colagem do compósito na superfície do elemento estrutural, com auxílio de adesivos epoxídicos, ou seja, EBR. De acordo com Abdel-Kareem *et al.* (2019), vários pesquisadores verificaram que a resistência à força cortante de vigas de concreto pode ser aumentada significativamente utilizando-se a técnica EBR. Nas últimas duas décadas, o reforço à força cortante e flexão com

laminados de FRP externamente colados tornou-se uma técnica considerada promissora devido a extensos testes experimentais, investigações analíticas e modelos de elementos finitos não lineares realizados em campo. Esta técnica apresenta desvantagens devido a falha imprevisível e o descolamento prematuro do FRP (ADEL *et al.*, 2020), além disso, os sistemas EBR são suscetíveis a incêndios e atos de vandalismo (ABDEL-KAREEM *et al.*, 2019). Por outro lado, segundo Adel *et al.* (2020), a técnica EBR se destaca pelo seu processo considerado de fácil implementação e boa eficiência.

2.4 Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

De acordo com Liu *et al.* (2015), as fibras de carbono têm sido desenvolvidas como um dos materiais industriais mais importantes para a ciência e tecnologia modernas desde 1960. Devido às suas propriedades mecânicas como: alta resistência e módulo específicos, baixa densidade e expansão térmica, resistência ao calor e estabilidade química, as fibras de carbono passam a ser objeto de interesse de pesquisadores como materiais de reforço no desenvolvimento de compósitos de alto desempenho. Compósitos de polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP) são materiais importantes em muitos campos, como aeroespacial, confecção de equipamentos médicos e de automóveis (LI *et al.*, 2020). Em comparação com os materiais tradicionais (por exemplo, metais), as fibras de carbono apresentam maior resistência à fadiga, melhor estabilidade a longo prazo e excelente resistência à corrosão, portanto o CFRP se torna adequado para áreas de aplicação em várias e extremas condições ambientais (JIA *et al.*, 2018).

2.4.1 Pesquisas sobre CFRP em reforço à força cortante de vigas de concreto armado

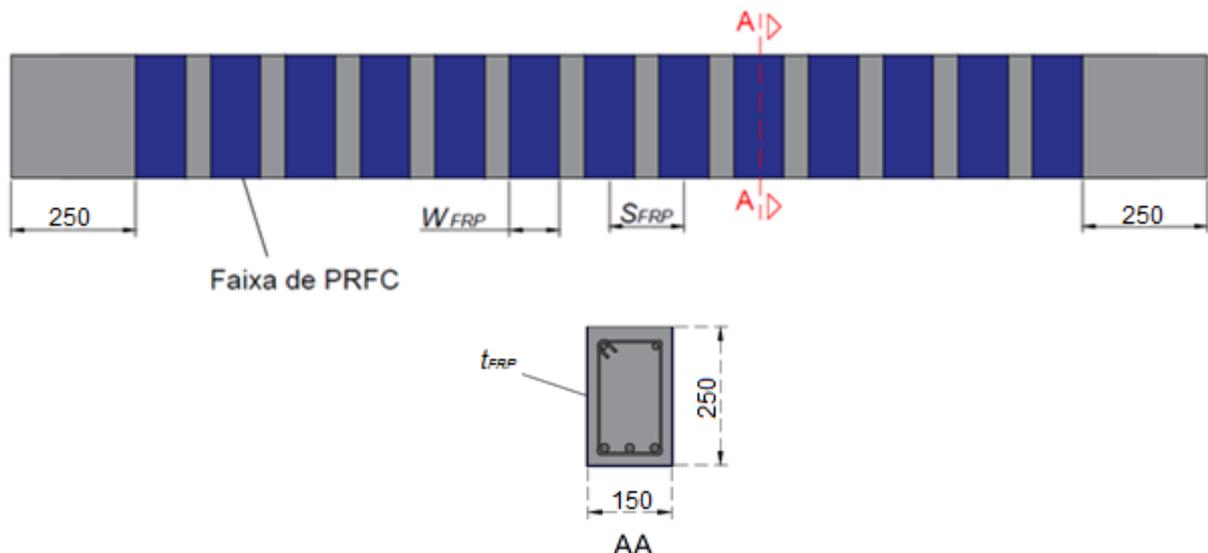
- a) Reparo e reforço de vigas de concreto armado com baixa resistência à força cortante utilizando *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP)

Este estudo foi realizado por Karzad *et al.* (2019) a fim de avaliar a utilização de CFRP para reparo e reforço à força cortante de vigas de concreto armado, por meio da técnica EBR. Nesta pesquisa, 19 vigas de 2700 mm de comprimento, e seção

transversal de 230x390 mm, foram testadas: uma ensaiada e reparada com epóxi; sete ensaiadas, reparadas e reforçadas à força cortante com CFRP; seis sem danos nem reforços, e seis sem danos e reforçadas ao cisalhamento com CFRP. As peças variavam sua taxa de estribos (podendo ser mínima, moderada ou sem estribos), número de camadas de CFRP (uma ou duas) e resistência à compressão do concreto (entre 28 e 38 MPa), e foram superdimensionadas à flexão com três barras de 32 mm, a fim de garantir a ruptura por cisalhamento.

As armaduras transversais posicionadas nas vigas com taxa mínima de estribos foram de 6 mm a cada 200 mm, enquanto que as armaduras transversais das vigas com taxa moderadas foram de 8 mm de diâmetro a cada 150 mm. O reparo das vigas danificadas foi realizado por meio da injeção de resina epóxi nas fissuras de maior espessura com bomba de pressão, e o reforço foi realizado com faixas de CFRP, com 100 mm de largura (W_{FRP}), 0,167 mm de espessura (t_{FRP}) e espaçadas a cada 150 mm (S_{FRP}), distribuídas ao longo do comprimento da viga, verticalmente alinhadas, envolvendo a peça no formato de U (Figura 2.4). A configuração do carregamento para os testes experimentais foi o de flexão em três pontos, sendo dois apoios nas extremidades da viga e uma de carga aplicada no centro do vão.

Figura 2.4 – Posição e configuração de faixas de CFRP (mm).

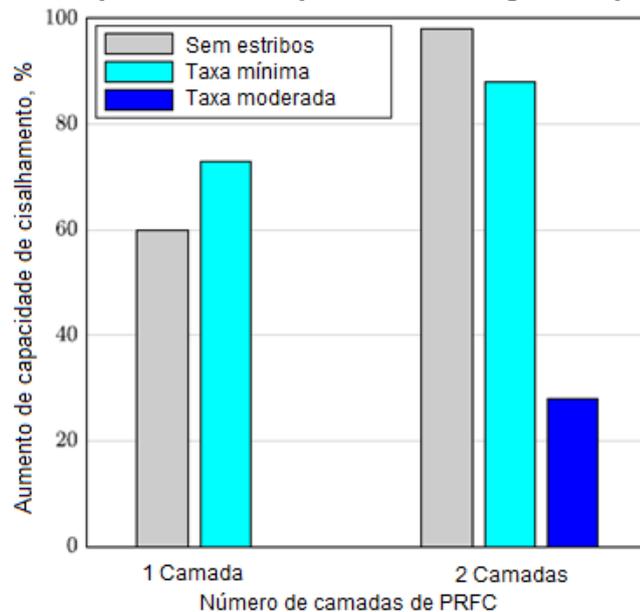


Fonte: Adaptado de Karzad *et al.* (2019).

Após o ensaios serem realizados, o autor observou que as vigas submetidas ao reforço com CFRP tiveram sua capacidade de força cortante aumentada. As peças que não possuíam estribos e foram reforçadas com duas camadas obtiveram 98% de

aumento médio da capacidade de carga. Em contrapartida, as vigas com taxa moderada de estribos e reforçadas com também duas camadas de CFRP tiveram em média o aumento de 28% (Figura 2.5). A partir destes dados, o autor conclui que há interação entre o reforço e a armadura de cisalhamento, pois a contribuição do CFRP, é afetada de acordo com a taxa de estribos existente.

Figura 2.5 – Contribuição média da força cortante nas vigas reforçadas analisadas.



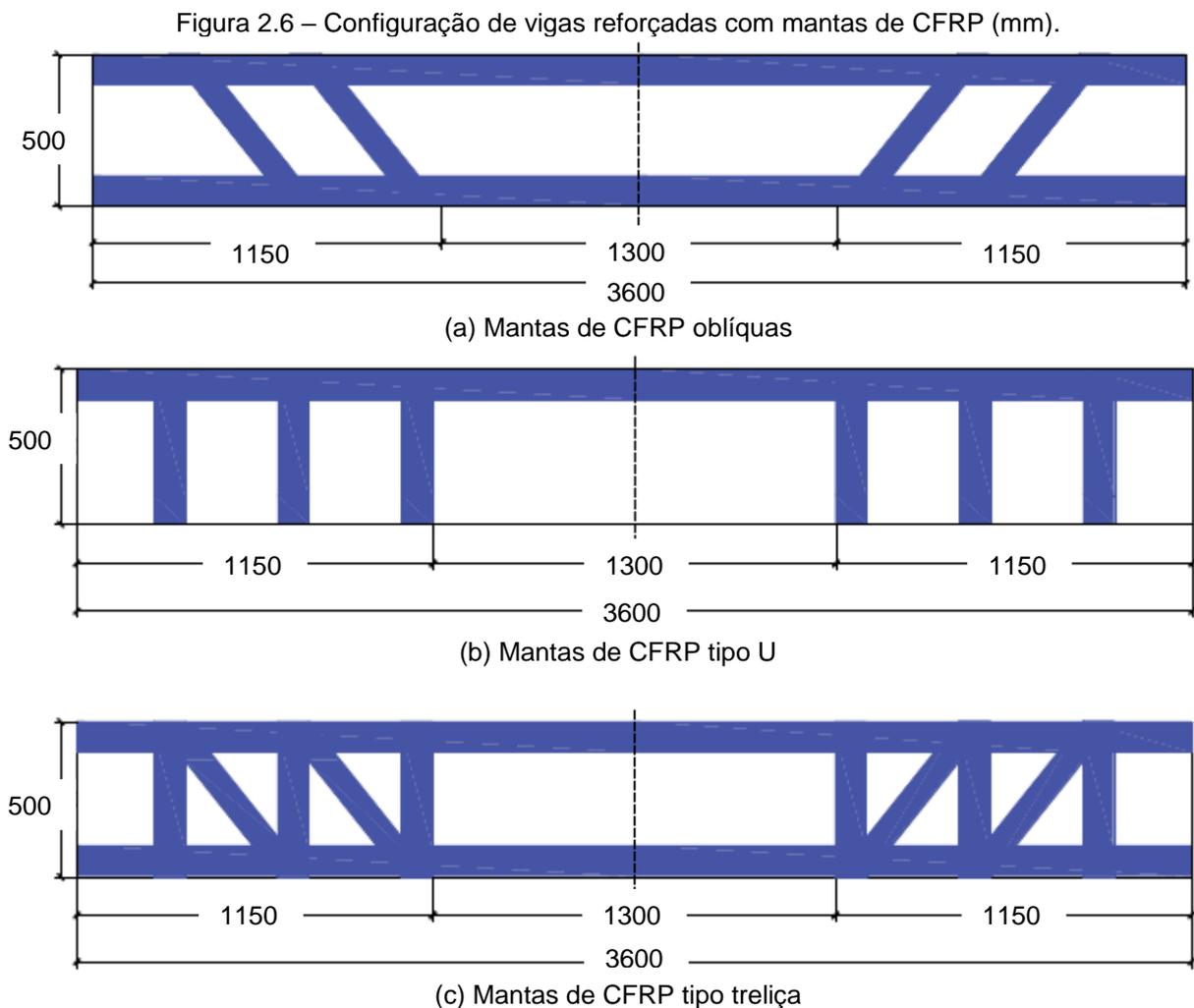
Fonte: Adaptado de Karzad *et al.* (2019).

Os dados visualizados no gráfico, segundo o autor, também podem sugerir que o reforço com CFRP afeta a contribuição dos estribos, e não o contrário, visto que as vigas alcançaram quase o mesmo nível de resistência com diferentes quantidades de armaduras transversais. É possível concluir também que a técnica de reparo com injeção de resina epóxi nas vigas danificadas foi bem sucedida, com capacidade de recuperar de forma integral sua resistência à força cortante, além disso, no geral, as vigas reforçadas com apenas uma camada de CFRP tiveram aumento em média de 65% na sua resistência.

As peças com taxa mínima de estribos que foram danificadas, reparadas e reforçadas com duas camadas de CFRP tiveram sua falha por flexão, ou seja, o reforço com o compósito aumentou de forma significativa sua capacidade de força cortante. No entanto, foi observado também que o reforço com CFRP diminui a ductilidade do elemento estrutural, o que pode ser justificado pelo alto módulo de elasticidade do material.

- b) Estudo teórico e experimental da capacidade de força cortante de vigas de concreto armado com treliça de fibra de carbono.

Este trabalho, realizado por Guo *et al.* (2021), faz estudo teórico e experimental da capacidade de força cortante de vigas de concreto armado reforçadas com fibra de carbono, utilizando a técnica EBR. Os autores realizam análise e comparação entre quatro vigas, das quais uma não tem reforço, utilizada para referência; uma com uma camada de CFRP colado diagonalmente (Figura 2.6a); uma com uma camada de CFRP colado em tipo U (Figura 2.6b), e uma com uma camada de CFRP colado como uma treliça (Figura 2.6c). Todas as vigas possuem 3600 mm de comprimento e seção transversal de 200x500 mm, duas barras de 25 mm para armadura de flexão e estribos de 8 mm posicionados a cada 200 mm. O método de ensaio utilizado foi de flexão com quatro pontos.



Fonte: Adaptado de Guo *et al.* (2021).

Após a realização de cálculos teóricos e ensaios experimentais os autores obtiveram resultados que podem ser visualizados na Tabela 2.1. O resultado experimental da viga de referência não pôde ser registrado, e portanto não foi comparado aos demais. Na tabela é possível observar aumentos consideráveis na capacidade de força cortante das vigas de acordo com os sistemas de reforços EBR CFRP aplicados, em comparação ao valor teórico da viga de referência.

Tabela 2.1 – Resultados teóricos calculados e resultados experimentais.

Método de Reforço	Resultado teórico da capacidade de força cortante (kN)	Resultado experimental da capacidade de força cortante (kN)
Referência	133,93	-
CFRP colado obliquamente	248,54	265
CFRP colado em tipo U	215,45	255
CFRP colado tipo treliça	263,95	290

Fonte: Adaptado de Guo *et al.* (2021).

De acordo com a tabela apresentada, é possível concluir que a configuração do CFRP colado em treliça apresentou a maior contribuição na capacidade de força cortante da viga, com 97%, no cálculo teórico, em relação à viga de referência, além disso, o autor observou que, no ensaio experimental, na viga com este sistema em treliça ocorreu o controle significativo de fissuras na diagonal.

Ainda de acordo com a Tabela 2.1, o aumento de resistência de força proporcionado pelo CFRP colado de forma oblíqua foi de 85%, enquanto que o CFRP disposto em U acrescentou 61% de capacidade, em comparação à viga de referência, segundo os valores teóricos.

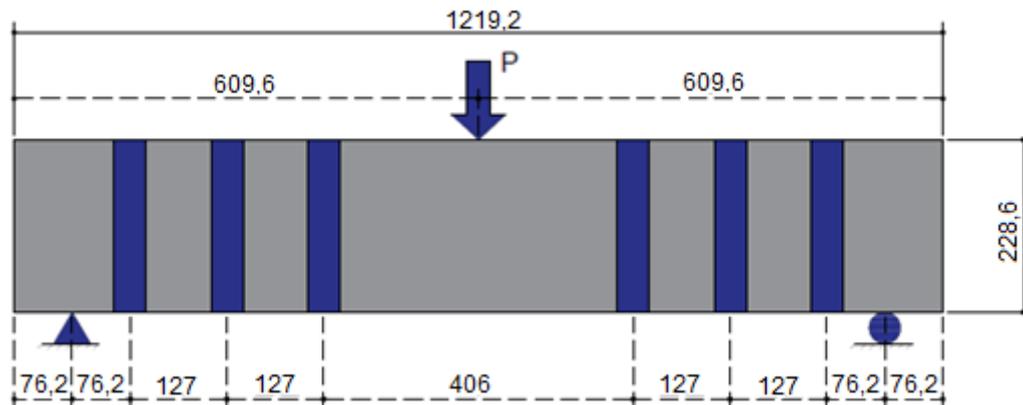
c) Resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado com laminados de *Carbon Fiber Reinforced Polymer*.

Nesta pesquisa de Zhange *et al.* (2005), 11 vigas foram testadas, dentre estas, 5 possuíam 1,22 m de comprimento, e 6 possuíam 1,83 m, todas com seção transversal de 15,24x22,86 cm, e armadura mínima de força cortante nas extremidades das peças. As vigas foram submetidas a reforço à força cortante com laminados em faixas (que variavam seu ângulo de aplicação) ou tecidos de CFRP (sob

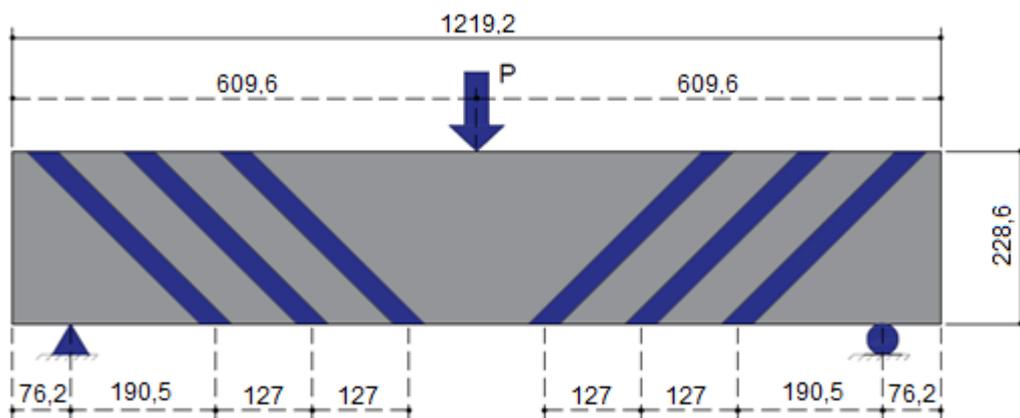
todo o comprimento e altura da viga), e posteriormente ensaiadas. A configuração do ensaio de ruptura para as vigas de 1,22 m de comprimento foi flexão em três pontos, enquanto que para as vigas de 1,83 m foi de flexão em três e quatro pontos.

As vigas reforçadas com faixas laminadas de CFRP romperam por delaminação do concreto com o epóxi, e as vigas com tecidos de CFRP romperam devido a ruptura das fibras. Portanto, as faixas acrescentaram mais resistência à força cortante para a viga. Além disso, um aumento superior foi verificado nos resultados fornecidos pelas faixas posicionadas na diagonal (Z4-45), em relação às faixas aplicadas verticalmente ao eixo da viga (Z4-90), ambas estão ilustradas nas Figuras 2.7 (a) e (b).

Figura 2.7 – Configurações das vigas de 1,22 m (mm).



a) Viga Z4-90.



b) Viga Z4-45.

Fonte: Adaptado de Zhange *et al.* (2005).

Os valores encontrados pelo autor para as vigas de 1,22 m de comprimento podem ser visualizados na Tabela 2.2, a qual apresenta as forças máximas registradas nos ensaios, o deslocamento vertical para estas forças e a força cortante resistida pelo CFRP. Com base nos resultados encontrados, os autores concluem

que, no geral, a técnica EBR com CFRP demonstra ser viável para restaurar ou aumentar a capacidade de força cortante de vigas de concreto armado. Além disso, os autores afirmam que este tipo de reforço demonstrou poder aumentar de forma significativa a vida útil, ductilidade e força cortante máxima de vigas a depender do tipo de configuração aplicado.

Tabela 2.2 – Resultados experimentais para a série de vigas de 1,22 m de comprimento.

Viga	Carga P máxima (kN)	Deflexão máxima (mm)	Força cortante máxima do CFRP (kN)	Modo de falha
ZC4 (Controle)	92,12	4,66	-	Fissura diagonal de cisalhamento
Z4-45	165,54	23,83	36,94	Delaminação de faixa
Z4-90	147,30	14,69	27,59	Delaminação de faixa
Z4-Mid	122,38	5,49	15,13	Delaminação de faixa
Z4-Fab	107,35	4,55	7,57	Ruptura da fibra

Fonte: Adaptado de Zhange *et al.* (2005).

- d) Comparação de técnicas de reforço à força cortante de vigas de concreto armado com *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRPs).

Nikoloutsopoulos *et al.* (2018) compara técnicas de reforço ao cisalhamento utilizando CFRP em vigas de concreto armado. Foram utilizadas 18 vigas com técnicas de reforço executadas com faixas, mantas contínuas e cordões de CFRP, variando o número de faixas, camadas e inclinação. A configuração do ensaio utilizado foi de flexão em quatro pontos, e as vigas foram produzidas com 70 cm de comprimento e seção transversal de 15x15 cm, apenas com armadura de flexão.

As técnicas estudadas para aderir o compósito à viga podem ser divididas em três categorias: com perfuração de ranhuras, com perfuração de ranhuras de pequena escala e sem perfuração de ranhuras. Na Tabela 2.3 apresentada encontram-se os principais valores obtidos de contribuição de reforço de cada técnica, bem como custo total e a necessidade de perfuração para aderência do CFRP ao substrato do concreto.

Tabela 2.3 – Apresentação do custo total e da necessidade de operação de perfuração.

CÓDIGO	CUSTO TOTAL (EURO)	CONTRIBUIÇÃO DO REFORÇO (kN)	OPERAÇÃO DE PERFURAÇÃO
A.3	27,63	45,68	Sim
B.4	24,75	45,68	Não
C.3	32,22	44,18	Sim
E.2.a	46,99	38,18	Não
F.1	28,44	35,18	Não
F.2	42,30	42,68	Não

Fonte: Adaptado de Nikoloutsopoulos *et al.* (2018).

Observou-se uma efetividade mais significativa de contribuição de reforço à força cortante e custo nas técnicas A.3 e B.4, das quais, A.3 consistia na aplicação de uma única camada CFRP de forma contínua ao longo dos vãos de cisalhamento da viga aderido por meio de ranhuras, envolvendo completamente sua seção transversal, e B.4 representa a aplicação de duas camadas de CFRP em U ao longo dos vãos de cisalhamento da viga.

Os autores concluíram que as técnicas que não utilizam perfuração para aderência e que podem ser consideradas otimizadas são B.4, E.2.a, F.1 e F.2, das quais E.2.a utiliza aplicação de dois cordões de fibra de carbono em três posições nos vãos de cisalhamento da viga em duas faces da sua seção transversal em posição perpendicular ao seu eixo (90°), e F.1 e F.2 são também a aplicação de cordões de fibra de carbono nos vãos de cisalhamento em duas faces da viga, no entanto são posicionados em um ângulo de 45° em relação ao seu eixo, e se diferem pois F.1 utiliza apenas um cordão em cada posição, enquanto que F.2 possui dois.

Dentre os quatro resultados mais eficientes sem utilização de perfuração para aderência, B.4 e F.2 se destacam devido o valor de contribuição conferido pelo reforço, no entanto, de acordo com a Tabela 3.4, B.4 permanece mais eficiente e vantajoso do ponto de vista econômico, por conferir o maior valor de contribuição à força cortante com custo inferior em relação às demais técnicas estudadas.

2.5 Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)

De acordo com Aravind *et al.* (2017), propriedades, como capacidade de moldagem em qualquer formato, compatibilidade com qualquer tipo de resinas sintéticas, baixo custo e fácil disponibilidade, têm motivado muitos pesquisadores e

engenheiros estruturais a utilizar os compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro (GFRP) no campo da reabilitação de estruturas existentes. Percebe-se que o uso da combinação de GFRP com adesivo epóxi aumenta a resistência das estruturas em reabilitação.

Segundo Sudarsana (2018), materiais compósitos de fibra de vidro e epóxi foram testados em laboratório por pesquisadores, como confinamento de concreto e reforço de vigas à força cortante, e foi concluído que esses materiais melhoraram as capacidades das vigas. Além disso, Sundarraja e Rajamohan (2009) afirmam que muitas pesquisas demonstraram que o uso de GFRP externamente colado pode aumentar a capacidade de força cortante de vigas de concreto armado.

Uma pesquisa, realizada por Sudarsana (2018), analisou o comportamento de flexão das vigas reforçadas com GFRP em duas fases. A primeira fase fez o estudo do número de camadas de compósito aplicadas e a segunda fase do tipo de ancoragem utilizado. Dentre as conclusões enumeradas na pesquisa, o autor destaca aumento de resistência à flexão de 10,8% e 13,4%, em relação à viga de referência, em vigas reforçadas com uma e duas camadas de GFRP, respectivamente. Também foi observado o aumento na capacidade de flexão entre 18,3% e 31,4% de vigas da segunda fase, as quais apresentavam duas camadas de manta de GFRP e diferentes tipos de ancoragem nas extremidades.

2.5.1 Pesquisas sobre GFRP em reforço e reparo de vigas de concreto armado

- a) Reforço de vigas de concreto armado com baixa resistência à força cortante com vários sistemas FRP.

Neste estudo, Baggio *et al.* (2014) investigam a eficácia do uso de CFRP, GFRP e de Matriz Cimentícia Reforçada com Fibra (FRCM) para aumentar a capacidade de força cortante de vigas de concreto armado com baixa taxa de armadura transversal.

Nove peças foram ensaiadas no estudo, sendo uma viga de controle (sem reforço) e oito vigas reforçadas com FRP à força cortante, das quais duas vigas foram reforçadas com CFRP com e sem âncoras de FRP, duas vigas foram reforçadas com grelhas de FRCM com e sem âncoras, e quatro vigas foram total ou parcialmente envoltas em U com GFRP, com ou sem ancoragem, podendo esta ancoragem ser de CFRP ou GFRP.

Todas as vigas apresentavam 2,44 m de comprimento, com seção transversal 15x35 cm, além de ser igualmente subdimensionadas à força cortante com armaduras de 6 mm a cada 180 mm. A configuração do ensaio de ruptura das vigas consistiu na aplicação de dois pontos de força.

Após ensaios até a falha realizados no estudo, a Tabela 2.4 apresenta os resultados obtidos para os reforços com GFRP, os quais compreendem a carga máxima, deflexão para esta carga máxima e percentual de aumento em relação à viga de referência e modo de falha.

Tabela 2.4 – Resumo dos resultados dos ensaios.

Viga	Força máxima (kN)	Deflexão (mm)	Aumento (%)	Modo de falha
Viga 1 – Referência	223	8,80	-	Força cortante
Viga 6 – GFRP – s/ ancoragem	334	13,7	50,1	Força cortante – descolamento
Viga 7 – PD-GFRP – s/ ancoragem	305	12,0	36,8	Força cortante – descolamento
Viga 8 – PD-GFRP – c/ anc. (de CFRP)	310	14,2	39,2	Compressão por força cortante
Viga 9 – PD-GFRP – c/ anc. (de GFRP)	339	13,7	52,2	Compressão por força cortante

Fonte: Adaptado de Baggio et al. (2014)

Os autores concluíram que o reforço com GFRP envolvendo a altura total da viga e sem âncoras (Viga 6) resultou em um aumento de 50% na capacidade de força cortante, em relação à viga de controle, com descolamento ocorrendo antes da falha por força cortante.

As vigas reforçadas com GFRP envolvendo sua altura parcial com e sem âncoras apresentaram um aumento de 52% e 36% na capacidade de cisalhamento, respectivamente, com relação à viga de controle, e a presença das âncoras foi eficaz em impedir a descolagem dos compósitos. Além disso, as vigas reforçadas com GFRP com ancoragem de GFRP tiveram melhor desempenho em comparação às que tiveram ancoragem de CFRP. Os reforços de GFRP, com ou sem ancoragem, apresentaram melhor contribuição de resistência em relação aos reforços com FRCCM, no entanto ainda inferiores aos resultados fornecidos pelos reforços utilizando CFRP.

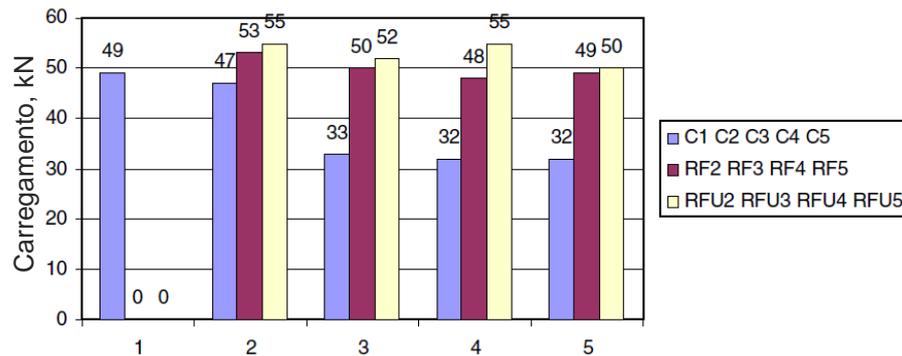
- b) Reforço de vigas de concreto armado à força cortante com faixas inclinadas de GFRP – Um estudo experimental.

Este estudo, realizado por Sundarraja e Rajamohan (2009), tem o objetivo de fornecer dados acerca da utilização de tecidos de GFRP como reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado. Para isto, dois casos foram analisados, sendo o primeiro de reforços em faixas de FRP inclinadas aplicadas nas duas laterais das vigas, e o segundo de reforços em faixas de FRP inclinadas aplicadas em U, em ambas situações é utilizada a técnica EBR. Neste caso, cinco vigas (C1, C2, C3, C4 e C5) de referência foram moldadas com 1000 mm de comprimento e seção transversal de 100x150mm. Uma dessas vigas foi normalmente armada à força cortante, enquanto o restante foi subdimensionada neste aspecto de formas diferentes. Outras oito vigas foram moldadas de forma espelhada às vigas subdimensionadas, das quais quatro foram reforçadas com as faixas inclinadas de FRP nas laterais (RF2, RF3, RF4 e RF5), e quatro com as faixas inclinadas em U (RFU2, RFU3, RFU4 e RFU5), a fim de alcançar a mesma resistência à força cortante da viga normalmente armada. O dimensionamento das faixas de FRP necessário para a sua contribuição de resistência ser suficiente, foi calculado de acordo com o que é prescrito no ACI.

A superfície do concreto das vigas foi lixada e limpa, foi aplicada uma camada de resina epóxi, o tecido bidirecional de vidro e outra camada da resina, logo após, uma pressão distribuída e contínua foi aplicada sobre as faixas para garantir a aderência entre o concreto, o epóxi e o tecido. Após 24 horas curando em temperatura ambiente, as vigas foram ensaiadas. Os ensaios foram realizados por meio de um sistema de carregamento de dois pontos.

Todas as vigas de referência falharam por cisalhamento, as vigas reforçadas, por outro lado, falharam por flexão, sendo que, algumas por flexão combinada com o esmagamento do concreto. Apenas a viga RFU4 falhou por flexão combinada com a ruptura do FRP, devido a total ausência de estribos neste modelo. A capacidade de força máxima das vigas reforçadas foi similar à viga de controle C1 (Figura 2.8), o que demonstra efetividade dos reforços em aumentar a resistência à força cortante de vigas subdimensionadas.

Figura 2.8 – Carregamento máximo suportado pelas vigas de controle e pelas vigas reforçadas.



Fonte: Adaptado de Sundarraja e Rajamohan (2009).

De acordo com o gráfico apresentado, é possível observar que as vigas reforçadas com faixas inclinadas de FRP em U tiveram desempenho ligeiramente superior ao das vigas com o FRP aplicado somente nas laterais, no entanto, no geral, todas as vigas reforçadas obtiveram resultados similares. Os autores destacam que a resistência última das vigas com índice 3, 4 e 5, reforçadas, aumentou em 50%, em relação às suas respectivas vigas de referência. Além disso, a fissuras nas vigas reforçadas passam a aparecer com carregamentos mais altos do que estas, ou seja, houve a inibição do aparecimento destas fissuras por maior tempo. Foi observado também que as vigas com reforços de FRP externamente colado apresentaram maior ductilidade, com rupturas menos bruscas. Por fim, os autores declaram efetividade no uso de tecidos de GFRP externamente colados na superfície das vigas de concreto armado para reforço à força cortante.

2.6 Fibras Naturais

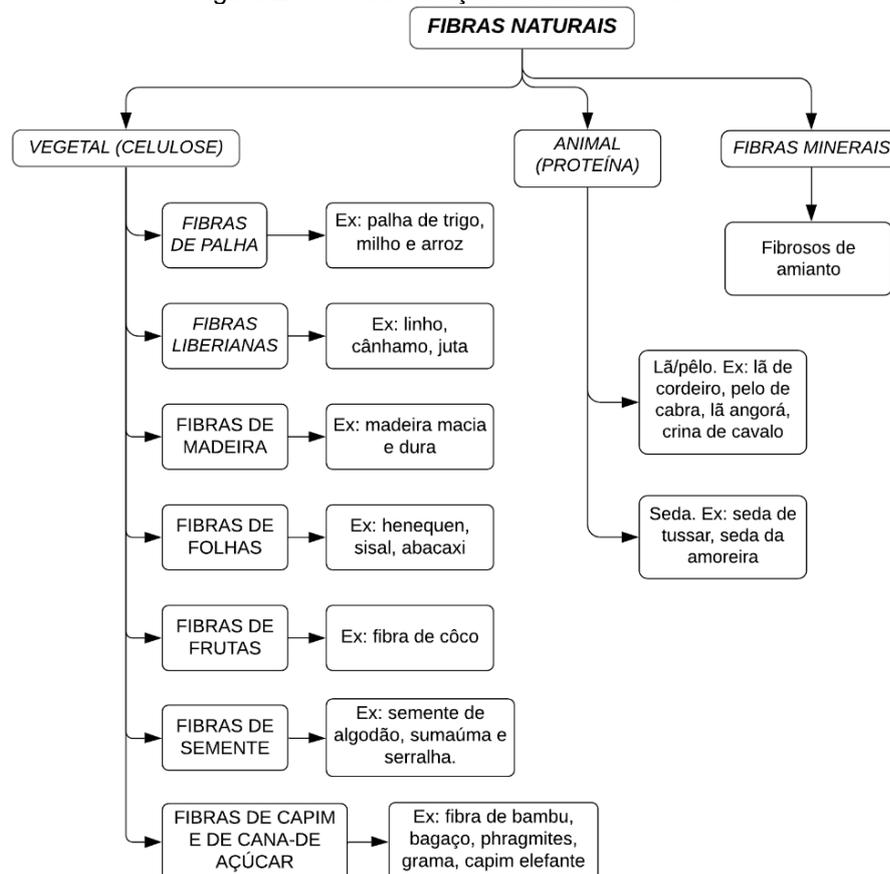
Segundo Edie (1993), fibras sintéticas, como fibras de vidro, carbono e aramida, são os materiais mais comuns usados como reforço de compósitos poliméricos, devido seu comportamento mecânico exclusivo em várias aplicações. Porém, embora as fibras sintéticas sejam atraentes em suas características mecânicas, elas não são biodegradáveis e seu uso pode causar problemas ecológicos (HARISH *et al.*, 2009).

O impacto ambiental associado à produção, descarte e reciclagem de compósitos poliméricos à base de fibra sintética deu origem ao desenvolvimento de compósitos ecológicos para várias aplicações (SENTHILKUMAR *et al.*, 2018). Conseqüentemente, o emprego das fibras naturais tem crescido rapidamente dentro

da tecnologia moderna, devido seu baixo custo, biodegradabilidade, natureza ecológica e suas propriedades mecânicas (KANDAN, S. RAJAKUMAR, 2020). De acordo com Kandan e Rajakumar (2020), outras vantagens das fibras naturais também se destacam como o baixo consumo de energia para sua produção, aspecto não abrasivo, peso leve (baixa densidade), bom isolamento térmico e propriedades acústicas.

Segundo Sadiqsha e Pradeep (2020), as fibras naturais podem ser de natureza vegetal, animal ou mineral (Figura 2.9), são de fácil fabricação e possuem disponibilidade contínua (recurso renovável). Dentre essas, as fibras vegetais são as preferidas, pois, enquanto as fibras animais são compostas principalmente de proteínas e as fibras minerais estão associadas à casos de saúde, a celulose é o elemento significativo das fibras vegetais. Além disso, as fibras vegetais possuem maior resistência e rigidez em comparação com as fibras animais (ISLAM, AHMED, 2018). Muitas destas fibras podem conferir também bons resultados de resistência à tração e de dureza, como por exemplo as fibras de banana, palma e bambu (SADIQSHA e PRADEEP, 2020).

Figura 2.9 – Classificação das fibras naturais



Fonte: Adaptado de Sadiqsha e Pradeep (2020).

Acerca dos campos de aplicação, Sadiqsha e Pradeep (2020) apontam que as fibras naturais podem ser utilizadas em indústrias automotivas, aeroespaciais, marítimas, de artigos esportivos e eletrônicos, e, de acordo com Kandan e Rajakumar (2020), também se aplicam na construção civil, na confecção de painéis de paredes, teto, portas e telhado.

2.6.1 Fibra de Juta

Dentre as fibras naturais, a fibra de juta apresenta o preço mais baixo e maior durabilidade (ISLAM, AHMED, 2018). Segundo Song *et al.* (2021), a planta de juta atinge uma altura de cerca de 2,5 metros e tem um diâmetro de caule de base de 25 mm. E, de acordo com Ashraf *et al.* (2019), pode ser facilmente cultivada em uma atmosfera úmida e com temperaturas quentes, além de ser capaz de sobreviver a enchentes.

A geometria e a composição das fibras de juta variam entre as plantas pois dependem de suas condições de crescimento. A composição pode inclusive variar de fibra para fibra em uma única planta. A estrutura, o comprimento e a composição química da fibra de juta dependem de fatores como: ambiente de crescimento, condições climáticas, maturidade da planta, extração e métodos de modificação usados (ASHRAF *et al.*, 2019). A alta concentração de celulose e baixo ângulo de microfibrila são ideais para a resistência de uma fibra natural em compósitos poliméricos. Posto isto, a juta possui cerca de 65 a 70% de celulose, 13,6 a 20,4% de hemicelulose e 8% de microfibrilas, além de ser a fibra mais barata, útil e acessível comercialmente em comparação às outras fibras naturais (SONG *et al.*, 2021).

Esta fibra apresenta várias características convenientes, como alta resistência à tração, boa resistência ao fogo, sustentabilidade e possibilidade de reutilização (HOSSAIN; ABDULLA, 2015). E, de acordo com Li (2007), acredita-se que suas propriedades mecânicas sejam comparáveis às de fibra de vidro, no que se refere à resistência e módulo específicos. Na Tabela 2.5 é possível visualizar uma comparação entre propriedades mecânicas das fibras de juta, vidro e carbono.

Conforme citam Hossain e Abdulla (2015), depois do algodão, a fibra de juta é a fibra têxtil mais produzida no mundo, considerada a fibra do futuro. Bangladesh lidera a produção da fibra bruta, enquanto a Índia está à frente na produção de artigos utilizando-a como matéria-prima. A juta é cultivada exclusivamente para a extração de

fibras, sendo a Ásia responsável pela produção de 95% de juta no mundo (IMAN; MAJI, 2014).

Tabela 2.5 – Propriedades mecânicas das fibras de juta, vidro e carbono.

Fibra	Densidade (g/cm³)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Resistência à Tração (MPa)
Juta	1,45	10.000-32.000	450-550
Vidro (E-glass)	2,60	73.000	1.800-2.700
Carbono	1,80	260.000	3.500-5.000

Fonte: Adaptado de Alves C. *et al.* (2010)

Os estados do Pará e Amazonas concentram as safras nacionais da fibra de juta, e o cultivo desta planta gera desenvolvimento a milhares de famílias dessas regiões (VERSATILIDADE..., 2020). Segundo Leão *et al.* (2000), a cultura da planta de juta foi introduzida no Brasil por japoneses, e posteriormente se tornou uma das principais atividades econômicas das populações ribeirinhas da região amazônica. Além disso, conforme Lima (2009):

A cultura da juta, já por quase meio século, é importante para a economia da região amazônica, em função de sua capacidade de fixação da população no campo e da utilização de forma produtiva das áreas de várzea na extensão do Rio Amazonas, mais especificamente nos municípios localizados à margem do rio nos estados do Amazonas e Pará. (LIMA, 2009)

Junqueira (2022), diretor de uma empresa têxtil no Pará, considerada a maior fabricante de produtos de juta fora da Ásia, afirma que o ciclo de plantio da juta, no geral, é livre de defensivos, fertilizantes e outros produtos químicos, colabora com a preservação do biossistema, além de gerar renda. Segundo este diretor, tradicionalmente a produção de sementes de juta se dá no nordeste paraense, e dali são distribuídas até o alto Solimões, no Amazonas, pois “nessa extensa área há uma grande carência por atividades de geração de emprego e renda. Além disso, há também a dificuldade da falta de recursos próprios dos produtores.” (JUNQUEIRA, 2022, p. 15).

Quanto à compatibilidade desta fibra com matrizes poliméricas, uma pesquisa acerca de compósitos de poliéster e fibras de kenaf e juta, realizado por Albaqami *et al.* (2022), demonstrou que os FRPs com 20% de fibra de juta e 80% da matriz se destacou em seus resultados experimentais de resistência à tração e à flexão, em relação ao compósitos com fibra de kenaf e compósitos híbridos com kenaf e juta.

Neste estudo, no entanto, foi realizado o pré tratamento das fibras, com 5% de NaOH, para aumentar a capacidade de aderência entre o poliéster e o tecido de fibras, a qual é naturalmente prejudicada devido a característica hidrofílica das fibras naturais em frente à natureza hidrofóbica da resina. Nesta pesquisa, os autores concluem ainda que o compósito com fibra de juta apresentou maior estabilidade térmica com menor perda de massa, após análise experimental termogravimétrica.

2.6.1.1 Aplicações

A fibra de juta é amplamente utilizada na fabricação de diferentes tipos de tecidos para embalagens tradicionais, tapetes, sacos, lonas, cordas e fios (HOSSAIN; ABDULLA, 2015). Atualmente, como afirma Ashraf *et al.* (2019), a fibra de juta tem sido aplicada em muitos setores, incluindo automóveis e até mesmo em algumas aplicações de suporte de carga. No setor automotivo, bio-compósitos e biopolímeros de juta são usados para produzir diferentes componentes como painéis de porta, forros e porta-copos.

Ashraf *et al.* (2019) acrescenta que no setor da construção, a fibra de juta é comumente utilizada para a fabricação de janelas, portas, tapetes, divisórias entre salas e para tetos. Além de estar sendo também usada na confecção de cadeiras, mesas e diversos artigos de cozinha.

Ademais, os autores Song *et al.* (2021) concluíram em seu estudo que o uso de fibra de juta em compósitos cimentícios, em quantidade otimizada, pode melhorar sua capacidade mecânica, diminuir sua porosidade, além de aumentar sua tenacidade e ductilidade.

2.6.2 Limitações e técnicas de aperfeiçoamento

Uma das principais dificuldades em se tratando de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais é a adesão entre as fibras e as matrizes (DA SILVA *et al.*, 2012). A fibra de juta, por exemplo, é hidrofílica por natureza e vulnerável à absorção de água do ambiente externo. Esta natureza hidrofílica da fibra e a natureza hidrofóbica das matrizes de resina é uma das principais razões para a má adesão. Essa diferença torna a transferência de tensão entre a matriz e a fibra insuficiente, o

que provoca outros problemas, como a quebra do compósito e redução de suas propriedades (FIORE *et al.*, 2015)

Senthilkumar *et al.* (2018) apontam ainda outras limitações no uso de fibras naturais, como resistência mecânica inferior em relação às fibras sintéticas e baixa temperatura de fusão. A fim de melhorar as propriedades mecânicas deste tipo de fibra, várias técnicas são encontradas na literatura, tais como: pré-tratamento da fibra, introdução de aditivos na matriz e hibridização.

O tratamento da fibra busca modificar a sua superfície para garantir melhor adesão com a matriz (SENTHILKUMAR *et al.*, 2018). As técnicas de modificação se dividem em dois grupos: química e física. As técnicas de modificação química da superfície envolvem tratamento com acetilação, tratamento alcalino, tratamento enzimático, entre outros. Enquanto as técnicas de modificação física envolvem radiações ultravioleta, irradiação gama, irradiação por feixe de elétrons, plasma e tratamento corona (ASHRAF *et al.*, 2019).

Em um artigo publicado por Pires *et al.* (2012) foram confeccionados compósitos de fibras de juta, com tratamento alcalino, e matriz de resina epóxi. O tratamento da fibra foi realizado com solução de hidróxido de sódio, 5% em massa, à temperatura ambiente por 6 horas. Posteriormente, as fibras foram lavadas até o pH neutro e secas em estufa a 60 °C até obtenção de massa constante. O efeito do tratamento foi avaliado através de ensaios de tração, compressão e flexão dos compósitos. Segundo os autores, as micrografias da superfície das fibras mostraram que o tratamento aumentou a rugosidade da sua superfície, devido à retirada de hemicelulose e lignina, levando a um aumento de adesão entre fibra e matriz. Além disso, não houve diferença significativa entre os valores de tensão na ruptura, módulo de elasticidade e deformação das fibras de juta tratadas e não tratadas, por outro lado, o compósito com fibra tratada apresentou aumento de 18% na resistência à tração em relação à resina epóxi, e 216% no módulo de elasticidade devido à maior rigidez e menor deformação das fibras em relação à matriz. Este fato comprova que há influência positiva do tratamento alcalino na transferência de tensão da matriz para as fibras, causando maior resistência à tração.

A técnica de introdução de aditivos ou *fillers* na matriz tem também como principal objetivo o aprimoramento das propriedades mecânicas do compósito. São materiais misturados à resina em pequena porcentagem, e que proporcionam a ela um acabamento suave e controle de viscosidade (SENTHILKUMAR *et al.*, 2018).

Segundo Rosso *et al.* (2006), em seu estudo, a adição de sílica a uma matriz de resina epóxi forneceu melhor rigidez e tenacidade ao polímero, o que aumentou o módulo de elasticidade e a tenacidade à fratura dos compósitos.

Por fim, a hibridização, técnica utilizada nesta pesquisa, consiste na confecção de compósitos formados por dois ou mais constituintes diferentes, como aditivos e diferentes tipos de fibras na matriz (SENTHILKUMAR *et al.*, 2018). Um estudo, realizado por Rafiquzzaman *et al.* (2016) acerca das propriedades mecânicas de compósitos poliméricos reforçados com fibras de juta e de vidro, faz análise experimental e numérica das diferenças encontradas nas propriedades dos compósitos aumentando ou diminuindo o percentual de fibras naturais substituindo a fibra sintética. Para a análise experimental, foram confeccionados 10 corpos de prova de FRP com 20 mm de largura, 120 mm de comprimento e 4 mm de espessura, utilizando resina epóxi, fibras de vidro e tecido de fibras de juta tratadas com MEPOXE (*Methyl Ethyl Ketone Peroxide*). Dentre as peças, cinco eram formadas por 40% de fibras, e o restante por 30% de fibras, alternando a quantidade de cada tipo de fibra para cada corpo de prova. Os autores avaliaram as resistências à tração, à flexão e ao impacto destes elementos, e o melhor desempenho foi observado nos compósitos híbridos com 10% de fibras de juta e 30% fibras de vidro, seguido dos compósitos híbridos com 30% de fibras, onde 10% eram fibras de juta e 20% de vidro. No entanto, o aumento da quantidade de fibra de juta acima deste percentual ocasionou diminuição de propriedades em relação ao compósito de fibra de vidro. As Figuras 2.10 e 2.11 apresentam comparativos entre resultados experimentais.

Figura 2.10 – Relação entre tensão de tração e deformação dos compósitos.

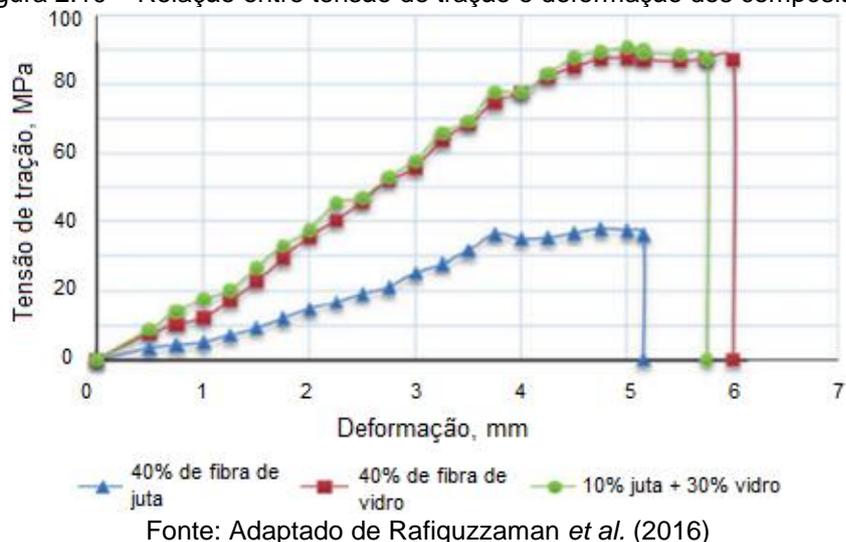
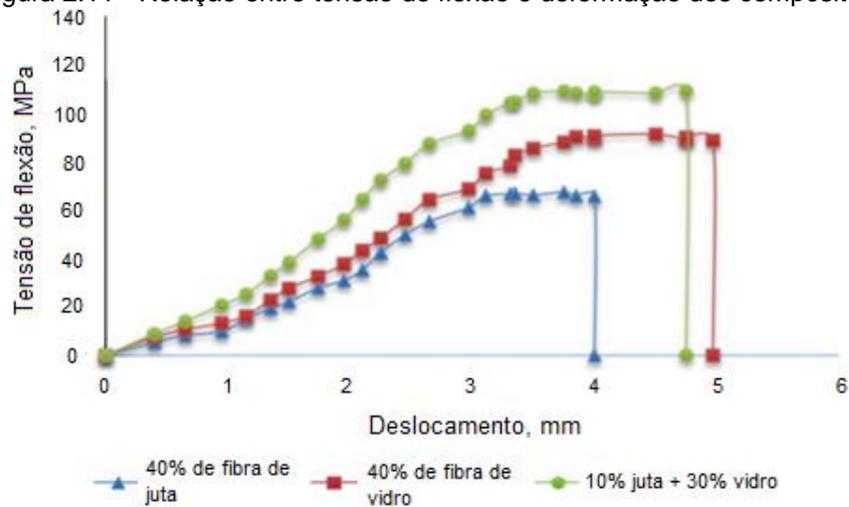


Figura 2.11 - Relação entre tensão de flexão e deformação dos compósitos.



Fonte: Adaptado de Rafiquzzaman *et al.* (2016)

No que se refere à análise numérica, um corpo de prova de FRP com 40% de fibras, sendo 10% de juta e 30% de vidro, foi esquematizado utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF) com a mesma geometria utilizada para a análise experimental. Os autores criaram o modelo numérico em camadas que representam cada material, considerando comportamento isotrópico.

Os gráficos apontados pelos autores demonstram dados sobre as propriedades mecânicas obtidas em ensaios de tração e flexão dos compósitos com juta (40%), vidro (40%) e o compósito híbrido (10% juta + 30% vidro), onde é possível observar que o FRP híbrido alcançou valores superiores inclusive aos de fibra de vidro. Portanto, a substituição de 25% desta fibra sintética pela fibra de juta é viável e mantém as principais características de resistência do compósito, além disso, pode ser utilizada em aplicações de baixa carga, gerando economia de 30% nos custos do material.

2.6.3 Pesquisas Sobre o uso de JFRP em Reforço de Vigas de Concreto Armado

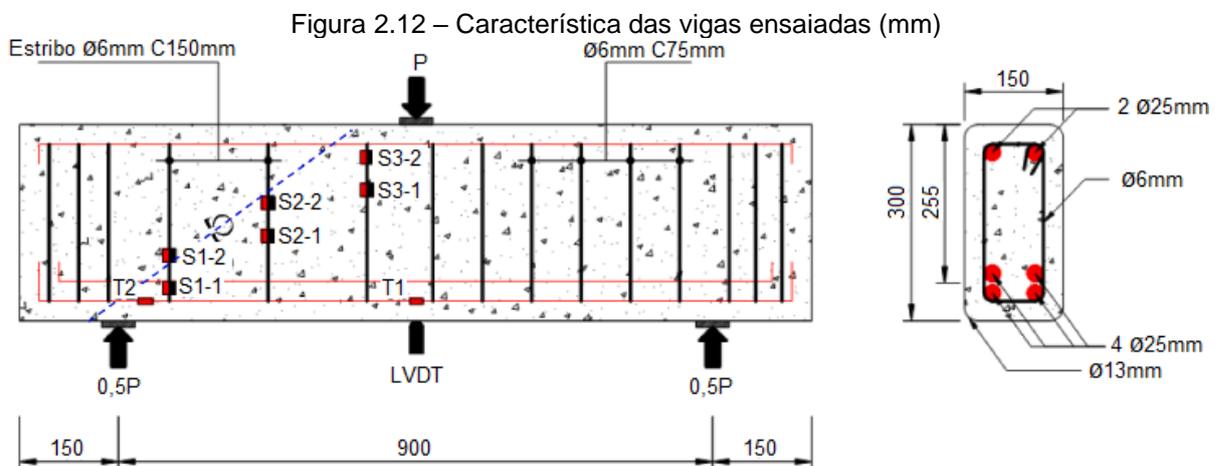
a) Comportamento estrutural de vigas de concreto armado pré-danificadas reforçadas com Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Naturais

Neste trabalho, Jirawattanasomkul *et al.* (2020) investigam o desempenho à força cortante de vigas de concreto armado pré-danificadas e reforçadas com Polímero Reforçado com Fibra de Juta (JFRP) externamente colado. Para isso, seis

vigas foram submetidas a forças de flexão cíclicas de três pontos, pré-danificadas para simular estruturas danificadas devido a terremotos.

As vigas foram produzidas com 1200 mm de comprimento, vão de 900 mm, seção transversal de 150x300 mm e altura útil de 255 mm. O dimensionamento à flexão das peças foi superior ao necessário, com 4 barras de 25 mm de diâmetro e as armaduras transversais de metade do vão foram subdimensionadas e espaçadas a cada 150 mm, maior do que previsto na ACI 318 (2008) para este caso, enquanto que a outra parte obteve dimensionamento suficiente com estribos espaçados a cada 75 mm, a fim de garantir a falha por força cortante na região pretendida. Esta configuração pode ser visualizada na Figura 2.12. O concreto utilizado nos elementos apresentou resistência média à compressão de 38,7 MPa e o JFRP aplicado possui 0,18 mm de espessura e módulo de elasticidade inicial de 14.485 MPa. Este compósito foi moldado com matriz de resina epóxi de baixo módulo de elasticidade para obter compatibilidade com a baixa rigidez da fibra natural.

Dentre as seis vigas utilizadas, uma peça foi de controle, a qual teve reforço e foi ensaiada até a sua falha, obtendo o maior dano, e o restante das vigas foram submetidas a aplicação de força até os níveis de danos desejados, descarregadas, reparadas ou não com resina epóxi, reforçadas com o JFRP e novamente submetidas ao ensaio até sua falha. Os níveis de pré-danos foram definidos como D1 e D2, onde D1 era o nível no qual a carga de cisalhamento foi aplicada até após o escoamento da armadura transversal das vigas, e D2 o nível no qual a carga foi aplicada até após o pico alcançado pela viga controle ou a falha do elemento por força cortante.



Fonte: Adaptado de Jirawattanasomkul *et al.* (2020)

Três vigas foram submetidas ao nível de dano D1, das quais duas foram reforçadas com duas camadas do compósito, sendo uma previamente reparada com o epóxi (D1-EB2-R) e a outra não (D1-EB2-NR), e uma foi reforçada com quatro camadas do compósito, previamente reparada (D1-EB4-R). As três vigas remanescentes foram submetidas ao nível de dano do grupo D2, das quais uma foi a viga de controle, sem reparos ou reforços (D2-NS), e duas foram reforçadas com quatro camadas de JFRP, sendo uma previamente reparada (D2-EB4-R) e a outra não (D2-EB4-NR). Estes reparos foram feitos por meio da injeção de resina epóxi nas fissuras presentes nas vigas, e o reforço com JFRP foi aplicado em U ao longo de todo o comprimento do vão das vigas, por meio do método *Wet layup*.

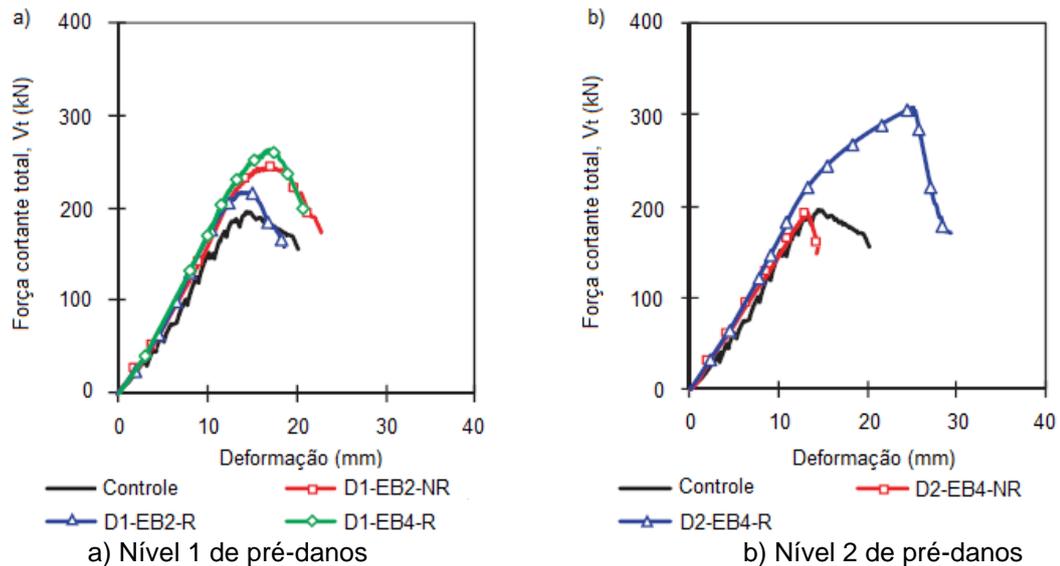
Todas as vigas foram submetidas ao ensaio de carga de flexão em três pontos cíclica, e o monitoramento de deformações e deslocamentos sofridos pelas peças foi realizado a partir de *Strain Gauges* instalados nas armaduras longitudinais e transversais, bem como nos JFRPs, além disso, um dispositivo LVDT foi posicionado ao centro do vão, como observado na Figura 2.12. Após os ensaios realizados, foi possível observar que todas as vigas falharam por força cortante com a ruptura do JFRP ao longo das fissuras de cisalhamento, exceto as peças que foram reparadas com a resina epóxi e posteriormente reforçadas com quatro camadas do compósito, estas tiveram suas falhas atribuídas ao destacamento do revestimento do concreto, o que significa que a aderência entre o JFRP e o concreto foi efetiva e estas peças suportaram tensões excessivas.

A Figura 2.13 apresenta resultados obtidos pelos autores acerca da relação tensão-deformação de cada corpo de prova, estes dados foram comparados entre si. A partir do gráfico da figura é possível concluir que todas as vigas ensaiadas, de forma geral, apresentaram desempenho à força cortante igual ou superior à viga de controle, ou seja, o reforço com o JFRP pôde recuperar de forma integral a resistência dos elementos mesmo após processo de danificação e reparo, sem prejuízo de sua ductilidade.

Os autores efetuaram o cálculo da razão entre a resistência à força cortante das vigas reforçadas e a resistência à força cortante da viga de controle e puderam concluir que, no geral, este valor ultrapassou 1,0. O menor resultado obtido foi de 0,99, na viga D2-EB4-NR, o que sugere que a injeção da resina epóxi é necessária para o reparo antes da aplicação do reforço. O maior resultado obtido foi de 1,56, pela viga

D2-EB4-R, o que significa que a viga apresentou resistência à força cortante 56% maior do que a viga de controle, após processo de reparo e reforço com JFRP.

Figura 2.13 – Relação entre força cortante total e deformação no meio do vão após reforço aplicado nas fases pré-danificada.



Fonte: Adaptado de Jirawattanasomkul *et al.* (2020)

Segundo análise dos autores, o acréscimo de resistência à força cortante obtido nesta pesquisa se compara aos obtidos por meio de aplicações de FRPs de fibra convencionais, como carbono e vidro, em vigas sem danos e reparos, o que indica efetividade no uso de JFRPs. Além disso, no gráfico a) da Figura 2.13 é possível perceber que a viga D1-EB2-NR apresentou melhor resistência à força cortante quando comparada à viga D1-EB2-R, que se trata de uma viga com as mesmas características quanto ao nível de pré-danos e número de camadas de reforço, porém recebeu reparo com injeção de epóxi. Neste caso, os autores concluem que este fato ocorreu devido as fissuras de cisalhamento contidas na viga serem muito pequenas, o que tornou o reparo possivelmente inconsistente.

c) Reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado usando laminados de Polímeros Reforçados com Fibras Naturais (NFRP).

Nesta pesquisa, os autores Alam e Riyami (2018) fazem a comparação entre o desempenho dos NFRPs de fibra de kenaf, de fibra de juta e de fios de juta aplicados como reforço à força cortante em vigas de concreto armado, utilizando a técnica EBR

(*Externally Bonded Reinforcement*). Para tanto, oito vigas foram produzidas com idênticas características: 2300 mm de comprimento, 150 mm de largura, 300 mm de altura, duas barras de 16 mm na região de flexão e armaduras transversais de 6 mm espaçadas a cada 150 mm.

Seis tipos de FRPs laminados foram fabricados neste estudo com a técnica *hand layup* com auxílio de moldes de aço. Estes laminados eram formados por uma matriz de resina epóxi e cerca de 45% de um tipo de fibra, podendo ser fibra de kenaf, fibra de juta ou fios de juta, submetidas a tratamento químico com hidróxido de sódio (NaOH) ou não. As propriedades destes materiais são visualizadas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Propriedade das fibras de kenaf, fibras de juta e fios de juta.

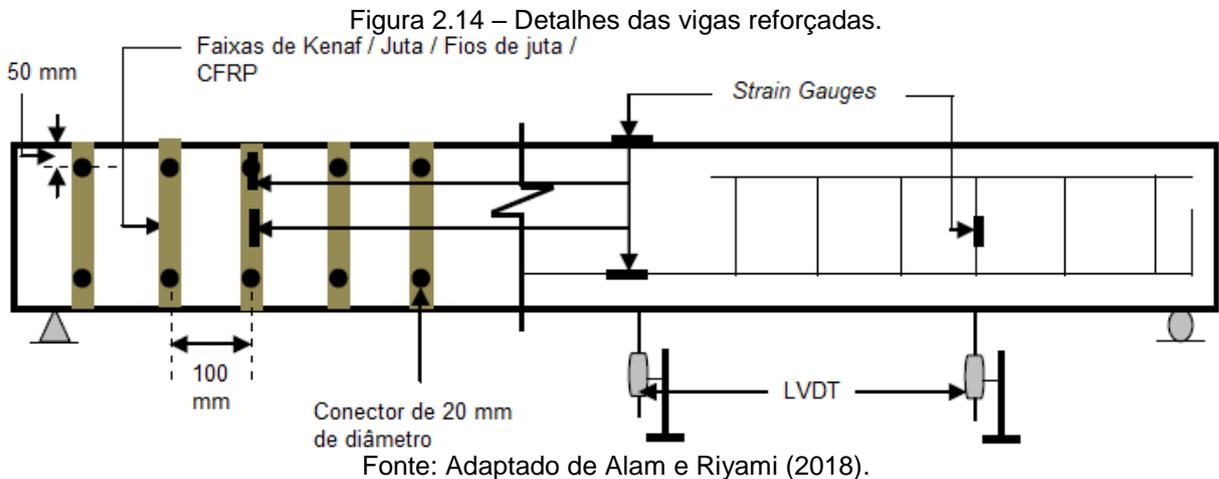
Fibra	NaOH	Módulo de elasticidade (MPa)	Resistência à tração (MPa)
Fibras de Kenaf	Tratadas	14910	136,00
	Não tratadas	13190	131,00
Fibras de Juta	Tratadas	14790	137,00
	Não tratadas	14540	136,00
Fios de Juta	Tratadas	10370	113,00
	Não tratadas	10710	110,00

Fonte: Adaptado de Alam e Riyami (2018)

As oito vigas ensaiadas foram identificadas de acordo com o reforço à força cortante aplicado, sendo as vigas UK, UJ e UJR as peças cujo reforço aplicado era formado, respectivamente, pelas fibras de kenaf, fibras de juta e fios de juta que não foram tratados, e as vigas TK, TJ e TJR, as peças cujo reforço aplicado era formado, respectivamente, pelas fibras de kenaf, fibras de juta e fios de juta quimicamente tratados. As vigas de controle foram definidas como CB e CFRP, sendo CB a peça sem nenhum tipo de reforço e CFRP a viga reforçada com laminados de fibra de carbono.

A fim de evitar falha por descolamento dos laminados, antes da aplicação dos reforços nas peças estruturais, conectores embutidos foram instalados nas vigas por meio de perfurações de 20 mm de diâmetro e inserção de barras de aço de 16 mm no orifício preenchido com adesivo epóxi com 25 mm de profundidade. Após este processo foram aplicados os reforços de NFRP e CFRP em faixas de 6x35x300mm de forma perpendicular ao eixo das vigas, envolvendo as peças em U, posicionadas somente nos vãos de cisalhamento (Figura 2.14). Dispositivos *Strain Gauges* e LVDTs

foram instalados para o monitoramento de deformações e deslocamentos, e, por fim os elementos foram ensaiados sob a aplicação de dois pontos de força.



A Tabela 2.7 apresenta, de forma geral, os resultados obtidos após o ensaio dos elementos estruturais, onde é possível observar que, com exceção da viga TK, todas as vigas reforçadas alcançaram maiores valores de resistência de força em comparação à viga CFRP, o que ocorreu devido ao descolamento do laminado antes que este alcançasse sua resistência última.

Tabela 2.7 – Resumo dos resultados experimentais obtidos.

Viga	Carga de ruptura (kN)	Acréscimo de carga em relação à viga de controle (%)	Carga de fissuração por força cortante (kN)	Modo de falha
CB	156	-	55	Cisalhamento
UK	211	35	71	Flexão
UJ	213	36	62	Flexão
UJR	209	34	67	Cisalhamento
TK	171	10	65	Flexão
TJ	192	23	64	Flexão
TJR	204	31	89	Flexão
CFRP	182	17	75	Cisalhamento

Fonte: Adaptado de Alam e Riyami (2018).

O CFRP oferece resistência à tração superior aos compósitos de fibras naturais, no entanto, seu elevado módulo de elasticidade proporciona baixa deformação ao

material e comparação ao concreto, por este motivo ocorreu o seu descolamento ao invés de sua ruptura por tração, e, conseqüentemente, a viga rompeu de forma frágil e catastrófica.

Ainda de acordo com a Tabela 2.7 apresentada, os laminados de NFRPs forneceram aumentos de resistência significativos às vigas de concreto armado, alcançando em média 35% de acréscimo. É possível observar também que as peças reforçadas com os compósitos de fibras de kenaf, fibras de juta e fios de juta não tratados quimicamente obtiveram melhor desempenho em relação às demais. Além disso, as peças reforçadas com as fibras de kenaf e de juta apresentaram os melhores resultados, com modo de falha por flexão, sem descolamento das faixas, e com comportamento dúctil.

2.7 Recomendações Normativas

2.7.1 Guia para o projeto e construção de sistemas FRP colados externamente para reforço de estruturas de concreto (ACI 440.2R-2017)

A norma americana ACI 440.2R (2017) fornece orientações sobre seleção, projeto, instalação, controle de qualidade e manutenção de sistemas de FRP para sistemas de reforços externamente colados de estruturas de concreto.

Este documento traz algumas formas comuns do sistema FRP adequadas para o reforço de elementos estruturais, dentre elas o sistema de FRP “Wet layup”, o qual consiste em mantas ou tecidos de fibra unidirecional ou multidirecional impregnados com uma resina, este processo é todo executado *in loco*.

Segundo a norma, antes de decidir sobre fazer uso do sistema de FRP como reforço ou reparo, um profissional autorizado deve verificar se este recurso é adequado e viável. Para tanto, é necessário realizar uma análise de condições da estrutura existente, a fim de estabelecer sua capacidade de carga, identificar suas deficiências e causas, e determinar as condições do substrato do concreto. Ademais, os documentos e projetos referentes à construção também devem ser avaliados.

O capítulo 6 desta norma traz diretrizes gerais sobre alguns fatores importantes para a instalação de sistemas de FRP, tais como:

- a) Temperatura e umidade: O comportamento do sistema pode ser afetado de acordo com a situação destes fatores no momento da instalação;

- b) Equipamentos: Alguns sistemas podem exigir equipamentos únicos e específicos para a sua aplicação;
- c) Superfície e substrato do concreto: O comportamento da estrutura reforçada ou reparada depende da solidez do substrato do concreto e da preparação adequada da sua superfície.

Qualquer problema relacionado ao substrato do concreto, incluindo corrosão de armadura e fissuras a partir de 0,3 mm, deve ser reparado adequadamente antes da aplicação do FRP. Além disso, é importante atentar para que esta seja compatível com os materiais de reparo empregados.

No que se refere ao preparo da superfície do concreto, este deve ser executado de acordo com o tipo de aplicação efetuada. Para casos de reforço à força cortante ou flexão, a forma de aplicação necessária é a chamada ligação crítica, onde se faz uso de adesivo. O preparo da superfície inclui limpeza, arredondamento dos cantos da peça, desobstrução de vazios, dentre outros cuidados que auxiliam na aderência entre o FRP e o concreto.

Para a seleção do sistema de FRP adequado, a norma ACI 440.2R (2017) determina algumas considerações ambientais a serem feitas previamente, tais como alcalinidade, expansão térmica e condutividade térmica. A norma afirma também que, ao definir o material, deve-se considerar os valores de propriedades informados pelo fabricante multiplicados por um fator de redução (C_E), de acordo com as Equações 2.1a e 2.1b, a seguir.

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (2.1a)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (2.1b)$$

Onde:

f_{fu} é a resistência à tração última;

ε_{fu} é a deformação de ruptura; e

C_E o fator de redução que se refere à exposição ambiental sofrida pelo material a longo prazo (Tabela 2.8).

O módulo de elasticidade não é afetado pela exposição ambiental, portanto deve permanecer o mesmo fornecido pelo fabricante ou obtido em ensaios experimentais.

No Capítulo 11, a norma discorre sobre o reforço à força cortante com sistemas de FRP, trazendo orientações acerca das formas de envolver o membro estrutural e dos cálculos de resistência à força cortante da peça e da contribuição atribuída pelo reforço.

O reforço à força cortante com FRP em vigas prismáticas e retangulares, e pilares, pode ser aplicado de três formas: completamente envolvida, três lados (envolvida em U) e dois lados (Figura 2.15). Além disso, o sistema de FRP pode ser aplicado de forma contínua ou em faixas ao longo do elemento estrutural.

Tabela 2.8 – Fator de redução ambiental para vários sistemas de FRP e condições de exposição.

Condições de exposição	Tipo de fibra	Fator de redução ambiental (C_E)
Exposição interior	Carbono	0,95
	Vidro	0,75
	Aramida	0,85
Exposição exterior (pontes, píeres e garagens de estacionamento abertas)	Carbono	0,85
	Vidro	0,65
	Aramida	0,75
Ambiente agressivo (usinas de produtos químicos e de tratamento de águas residuais)	Carbono	0,85
	Vidro	0,50
	Aramida	0,70

Fonte: Adaptado de ACI 440 2R (2017)

Figura 2.15 – Esquemas de envolvimento típicos para reforço à força cortante utilizando FRP.



Fonte: Adaptado de ACI 440.2R (2017)

No que se refere aos cálculos, sabe-se que a resistência à força cortante de projeto de uma estrutura (ϕV_n) deve ser superior à que ela pode suportar (V_u) (Equação 2.2a). A norma afirma que, para obter o valor de resistência à força cortante nominal (V_n) de um elemento reforçado com FRP, deve-se somar a contribuição do sistema de FRP à força cortante (V_f), multiplicada por um fator de redução (ψ_f), à contribuição da armadura (V_s) e do concreto (V_c), como demonstra a Equação 2.2b, a seguir.

$$\phi V_n \geq V_u \quad (2.2a)$$

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + \psi V_f) \quad (2.2b)$$

Onde, de acordo com a norma, é atribuído o valor de $\psi_f = 0,85$ para o método que envolve apenas três lados da viga com o reforço, e $\psi_f = 0,95$ para viga completamente envolvida. O valor de V_f é dado pela Equação 2.3.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\text{sen} \alpha + \text{cos} \alpha) d_{fv}}{s_f} \quad (2.3)$$

Onde:

$A_{fv} = 2nt_f w_f$, é a área de reforço, sendo n o número de camadas aplicado, e t_f e w_f a espessura e largura das faixas, respectivamente;

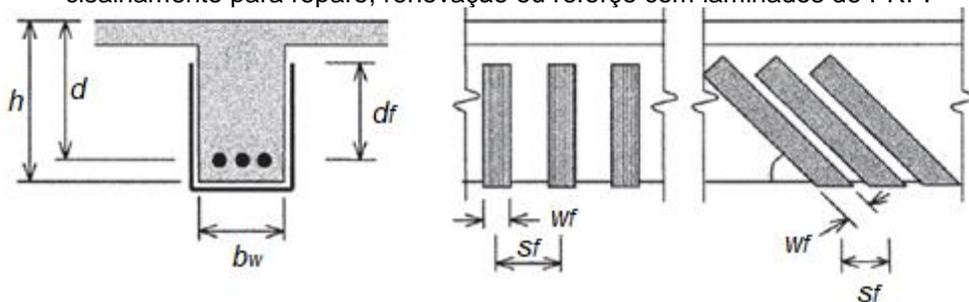
$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$ é a resistência efetiva do FRP, sendo E_f e ε_{fe} o módulo e elasticidade e deformação efetiva do FRP, respectivamente;

α é o ângulo de inclinação em que as faixas estão aplicadas;

d_{fv} é a altura do reforço (Figura 2.16); e

s_f é o espaçamento entre as faixas (Figura 2.16)

Figura 2.16 – Ilustração das variáveis dimensionais utilizadas em cálculos de reforço ao cisalhamento para reparo, renovação ou reforço com laminados de PRF.



Fonte: Adaptado de ACI 440.2R (2017).

No que diz respeito à deformação efetiva dos FRPs, para sistemas aplicados envolvendo todos os lados da viga, calcula-se de acordo com a Equação 2.4a. Enquanto que para sistemas de FRP aplicados em três lados da viga, esta é calculada segundo a Equação 2.4b. Observa-se nesta segunda equação um coeficiente de redução de ligação aplicado ao cisalhamento (κ_v), o qual é calculado de acordo com equações encontradas na norma.

$$\varepsilon_{fv} = 0,004 \leq 0,75\varepsilon_{fu} \quad (2.4a)$$

$$\varepsilon_{fv} = \kappa_v \varepsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (2.4b)$$

Para sistemas de FRP aplicados em faixas para reforço ao cisalhamento, o espaçamento entre elas deve obedecer o mesmo espaçamento encontrado para cálculo de estribos, o qual é determinado entre as linhas centrais das faixas.

Por fim, a resistência ao cisalhamento total da viga é calculada a partir da soma das contribuições fornecidas pelo sistema de FRP e pelos estribos, a qual deve obedecer o critério estabelecido na Equação 2.5. Esta equação determina que resistência cortante total da viga não deve ultrapassar a resistência ao esmagamento das bielas de compressão do concreto.

$$V_s + V_f \leq 0,66\sqrt{f'_c}b_w d \quad (2.5)$$

Onde:

V_s é a resistência cortante fornecida pela armadura transversal;

V_f é a resistência cortante fornecida pelo reforço;

b_w é a largura da base da seção transversal da viga; e

d é a altura útil.

2.7.2 Reforço de FRP colado externamente para estruturas de concreto armado (*fib* Bulletin 90)

Esta norma europeia traz orientações sobre o uso de Polímero Reforçado com Fibras externamente colado (FRP-EBR) como reforço de estruturas de concreto armado. Bem como sobre os principais componentes deste compósito e seus requisitos.

Para garantir o caminho da carga entre o substrato do concreto e o FRP utiliza-se o auxílio de um material adesivo. Segundo a norma, o material mais comumente utilizado neste processo é o adesivo epóxi, que resulta da mistura entre a resina de epóxi e um endurecedor, e a depender dos requisitos da aplicação, outros aditivos também podem ser misturados ao material.

O FRP é formado principalmente por uma matriz de resina e fibras. A matriz tem função de proteger as fibras, mantê-las juntas e distribuir a carga recebida. As resinas mais comumente utilizadas são as termofixas, epóxi, poliéster e viniléster. A escolha desta resina para reforço de estruturas deve considerar características como a temperatura de cura e fusão, viscosidade e reatividade com as fibras utilizadas.

As fibras são o componente que suporta as tensões dentro do sistema de FRP. As mais comumente empregadas neste processo são as fibras sintéticas de carbono, de vidro e de aramida. As quais variam suas propriedades físicas e mecânicas de acordo com o tipo da fibra, orientação e técnica de fabricação.

De acordo com esta norma, é possível estimar propriedades mecânicas básicas de um sistema de FRP quando as propriedades e a fração de volume da matriz e das fibras são conhecidas. Para o caso de fibras unidirecionais, utiliza-se a Equação 2.6a e b, a seguir.

$$E_f = E_{fib} \cdot V_{fib} + E_m \cdot V_m \quad (2.6a)$$

$$f_f \approx f_{fib} \cdot V_{fib} + f_m \cdot V_m \quad (2.6b)$$

Onde E_f , E_{fib} e E_m são o módulo de elasticidade do FRP, da fibra e da matriz, respectivamente. V_{fib} e V_m são as frações de volume da fibra e da matriz, calculadas de acordo com orientações descritas na norma, as quais, quando somadas devem totalizar 1. E , f_f , f_{fib} e f_m são a resistência de tração do FRP, da fibra e da matriz, respectivamente.

Para sistemas de FRP confeccionados *in-situ*, o segundo termo das equações 2.6a e 2.6b deve ser desconsiderado, e o valor de V_{fib} deve ser 1. O resultado deve ser multiplicado por um fator de segurança r , fornecido pelo fornecedor do sistema.

Os sistemas FRP podem ser curados *in-situ* ou pré-curados. A técnica básica de reforço com FRP, amplamente utilizada, é a aplicação de um dos dois tipos com meios de colagem de material adesivo curado a frio. Além desta técnica, existem outras, chamadas especiais, dentre elas a de FRP pré-tensionado e formas pré-fabricadas.

Para fazer o projeto de aplicação do reforço com FRP em uma peça estrutural, deve-se primeiramente verificar seu estado limite de serviço (ELS) e estado limite último (ELU). Em reforços ao cisalhamento de vigas, a contribuição à resistência

fornecida pelo FRP ($V_{Rd,f}$) deve ser calculada de acordo com a Equação 2.7, descrita pela norma.

$$V_{Rd,f} = \frac{A_{fw}}{s_f} \cdot h_f \cdot f_{fwd} \cdot (\cot\theta + \cot\alpha) \cdot \text{sen}\alpha \quad (2.7)$$

Onde:

A_{fw} é área de reforço medida de forma perpendicular às fibras, definida por $2b_f \cdot t_f$, sendo b_f e t_f a largura e espessura efetiva das faixas, respectivamente;

h_f é a altura do FRP, definido por $h - 0,1 \cdot d$, sendo d a profundidade efetiva da seção transversal;

s_f é o espaçamento entre as faixas, medido de eixo a eixo;

f_{fwd} é a tensão efetiva do FRP;

θ é o ângulo da fissura diagonal em relação ao eixo da viga (adotado 45°);

e α é o eixo entre a orientação da fibra e o eixo da estrutura.

A norma *fib* 90 descreve que $s_f = b_f / \text{sen}\alpha$ quando a aplicação do reforço à força cortante for total ao longo do comprimento da viga. Ademais, a espessura efetiva do reforço deve ser $t_f = n \cdot t_0$, quando o número de camadas, n , for 1, 2, ou 3, e $t_f = n^{0,85} \cdot t_0$ para $n \geq 4$, sendo t_0 a espessura de uma camada individual, portanto a redução de efetividade do reforço é considerada quando muitas camadas são aplicadas.

Na presente pesquisa, os reforços foram aplicados em U, considerando a facilidade da aplicação da técnica em casos reais de reforços. A tensão efetiva do FRP (f_{fwd}), quando aplicado em U, deve ser definida como o menor valor entre a tensão do reforço de fibra se fosse aplicado em toda a seção transversal da viga, $f_{fwd,c}$ (Equação 2.8), e a tensão de aderência, f_{fbwd} , sendo este último definido conforme o comprimento de ancoragem efetivo das faixas de FRP, l_e (Equação 2.9).

$$f_{fwd,c} = k_r \cdot a_t \cdot f_{fd} \quad (2.8)$$

Onde:

k_r é um fator de redução que considera a não distribuição uniforme de tensão no FRP considerando a interseção da fissura de cisalhamento e a tensão nas fibras nos cantos da viga;

a_t é um fator que considera carregamento a longo prazo; e

f_{fd} é a força de ruptura de projeto da faixa de FRP.

$$l_e = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f \cdot s_{0k}}{\tau_{b1k}}} \quad (2.9)$$

Onde:

E_f é o módulo de elasticidade do compósito;

t_f é a espessura efetiva do reforço;

s_{0k} é o deslizamento máximo característico do FRP; e

τ_{b1k} é a resistência à força cortante característica do FRP.

Quando $l_e \leq s_f / (\cot\theta + \cot\alpha) \cdot \text{sen}\alpha \leq h_f / \text{sen}\alpha$, ou seja, quando todas as faixas de reforço cruzadas pela fissura de cisalhamento possuem comprimento de ancoragem superior à l_e , o valor de f_{fbwd} é encontrado a partir de Equação (2.10).

$$f_{fbwd} = \frac{f_{fbk}}{\gamma_{fb}} \quad (2.10)$$

Quando $s_f / (\cot\theta + \cot\alpha) \cdot \text{sen}\alpha \leq l_e \leq h_f / \text{sen}\alpha$, ou seja, quando algumas faixas do reforços cruzadas pela fissura de cisalhamento possuem comprimento de ancoragem superior à l_e e outras possuem comprimento inferior, então f_{fbwd} deve ser definido a partir da Equação 2.11.

$$f_{fbwd} = \left[1 - \left(1 - \frac{2 \cdot m \cdot s_f}{3 \cdot l_e} \right) \cdot \frac{m}{n} \right] \cdot \frac{f_{fbk}}{\gamma_{fb}} \quad (2.11)$$

Quando $s_f / (\cot\theta + \cot\alpha) \cdot \text{sen}\alpha \leq h_f / \text{sen}\alpha \leq l_e$, ou seja, quando todas as faixas de reforço cruzadas pela fissura de cisalhamento possuem comprimento de ancoragem menor que l_e , então f_{fbwd} é definido de acordo com a Equação 2.12.

$$f_{fbwd} = \frac{2}{3} \cdot \frac{(ns_f)/[(\cot\theta + \cot\alpha)\text{sen}\alpha]}{l_e} \cdot \frac{f_{fbk}}{\gamma_{fb}} \quad (2.12)$$

Onde:

n é o número de faixas cruzadas pela fissura de cisalhamento;

m é o número de faixas com comprimento de ancoragem inferior à l_e ;

f_{fbk} é resistência de ancoragem máxima característica, definido na norma; e

γ_{fb} é um fator de segurança do material para a aderência.

O capítulo 10 desta norma aborda sobre a execução prática da aplicação de reforço com FRP, orientando sobre a preparação da superfície do substrato do concreto e do FRP, aplicação, aderência, controle de qualidade e finalização.

2.7.3 Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento (ABNT NBR 6118:2014)

Esta norma brasileira estabelece requisitos para projetos de estruturas de concreto simples, armado e protendido. Neste documento, os elementos de concreto armado são definidos como aqueles que possuem comportamento estrutural dependente da aderência entre o concreto e a armadura, e que não sofrem alongamentos iniciais antes de estabelecida esta aderência.

Segundo a NBR 6118 (2014), a classe de concreto adequada para elementos estruturais de concreto armado deve ser igual ou superior à C20. E, no que se refere ao dimensionamento das vigas de concreto armado a serem executadas nesta pesquisa, a norma determina o critérios descritos a seguir.

2.7.3.1 Armadura longitudinal de vigas

a) Armadura de tração:

Para elementos estruturais armados, a quantidade mínima de armadura de flexão é definida a partir do dimensionamento da seção a um momento fletor mínimo (Equação 2.13), desde que respeitada a taxa mínima absoluta de 0,15%.

$$M_{d,min} = 0,8 \cdot W_0 \cdot f_{ctk,sup} \quad (2.13)$$

Sendo W_0 o módulo de resistência da seção transversal bruta de concreto, relativo à fibra mais tracionada, e $f_{ctk,sup}$ a resistência característica superior do concreto à tração.

b) Armaduras de tração e compressão

A norma determina que a taxa máxima de armadura na seção transversal da viga não deve ser superior a 4% da área do concreto (Equação 2.14).

$$A_s + A_s' \leq 0,04A_c \quad (2.14)$$

Onde A_s e A_s' são as áreas de seção transversal das armaduras de tração e compressão, respectivamente, e A_c a área de seção do concreto.

2.7.3.2 Verificação de resistência à força cortante

Para verificar se a resistência à força cortante do elemento estrutural, em uma determinada seção transversal, é satisfatória, esta norma estabelece duas equações a serem atendidas, simultaneamente (Equação 2.15a e b).

$$V_{sd} \leq V_{Rd2} \quad (2.15a)$$

$$V_{sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (2.15b)$$

Onde:

V_{sd} é a força cortante solicitante de cálculo;

V_{Rd2} é a força cortante resistente referente às diagonais comprimidas de concreto;

V_{Rd3} é a força cortante resistente, referente às diagonais tracionadas, formada por V_c , que se refere à parcela de força cortante resistida por mecanismos complementares ao da treliça, somado a V_{sw} , que é a parcela resistida pela

armadura transversal. Nesta pesquisa esta parcela é desconsiderada devido à ausência de estribos na região estudada dos elementos ensaiados.

De acordo com o modelo de cálculo I de resistência, para verificação do estado limite último de um elemento sujeito à força cortante, os valores de V_{Rd2} e V_{Rd3} devem ser determinados conforme as Equações 2.16 e 2.17.

$$V_{Rd2} = 0,27\alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \quad (2.16)$$

$$V_{Rd3} = V_c + V_{Sw} \quad (2.17)$$

Onde:

$$\alpha_{v2} = 1 - f_{ck}/250;$$

b_w é a menor largura da seção ao longo da altura útil;

d é a altura útil;

$V_c = V_{c0}$ em flexão simples e em flexo-tração com a linha neutra cortando a seção, sendo $V_{c0} = 0,6f_{ctd}b_wd$, e $f_{ctd} = f_{ctk,inf}/\gamma_c$;

V_{Sw} deve ser desconsiderado neste projeto, como mencionado anteriormente.

O modelo de cálculo I considera o ângulo entre a fissura e o eixo longitudinal da viga, θ , fixado em 45° . O modelo de cálculo II, por outro lado, permite a definição deste ângulo entre 30° e 45° , e determina que o valor de V_{Rd2} seja calculado de acordo com a Equação 2.18. Neste modelo, o valor de V_{Rd3} também é definido pela Equação 2.17, e para o contexto desta pesquisa, deve ser calculado da mesma forma descrita pelo modelo de cálculo I.

$$V_{Rd2} = 0,54\alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \cdot \text{sen}^2\theta(\text{cotg}\alpha + \text{cotg}\theta) \quad (2.18)$$

2.7.4 Requisitos do Código de Construção para Concreto Estrutural (ACI 318-19)

Esta norma americana apresenta orientações acerca de projetos de concreto utilizado com propósitos estruturais. Neste documento, a resistência ao cisalhamento unidirecional nominal em uma seção (V_{sd}) é definida de acordo com a Equação 2.19.

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.19)$$

Onde:

V_c é a parcela de resistência de cisalhamento fornecida pelo concreto; e

V_s é a parcela fornecida pela armadura transversal.

Para elementos de concreto armado não protendidos, se a taxa de armadura de cisalhamento (A_v) for maior ou igual à mínima ($A_{v,min}$) definida pela norma, o valor de V_c deve ser calculado de acordo com as Equações 2.20 (a) ou (b). Quando $A_v < A_{v,min}$, o valor de V_c é então definido pela Equação 2.20 (c).

$$V_c = \left[0,17\lambda\sqrt{f'_c} + \frac{N_u}{6A_g} \right] b_w \cdot d \quad (2.20a)$$

$$V_c = \left[0,66\lambda(\rho_w)^{1/3}\sqrt{f'_c} + \frac{N_u}{6A_g} \right] b_w \cdot d \quad (2.20b)$$

$$V_c = \left[0,66\lambda_s\lambda(\rho_w)^{1/3}\sqrt{f'_c} + \frac{N_u}{6A_g} \right] b_w \cdot d \quad (2.20c)$$

Onde:

λ é um fator de modificação baseado na massa do concreto utilizado;

f'_c é a resistência à compressão do concreto;

N_u é a força axial normal à seção transversal do elemento;

A_g é a área bruta de concreto na seção transversal;

b_w é a largura da base da viga;

d é a altura útil;

ρ_w é a razão entre A_s e $b_w \cdot d$; e

λ_s é um fator de modificação da resistência à tração do elemento, baseado na altura dele.

A contribuição da armadura transversal, V_s , de estribos com eixo perpendicular ao eixo da viga deve ser calculada conforme a Equação 2.21.

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad (2.21)$$

Onde:

A_v é a taxa de armadura transversal;

f_{yt} é a tensão de escoamento do aço, em MPa;

d é a altura útil da viga; e

s é o espaçamento entre os estribos, de eixo a eixo.

2.7.5 Projeto de Estruturas de Concreto – Parte 1-1: Regras Gerais e Regras para Construções (Eurocode 2 1992-1-1:2004)

Esta norma apresenta orientações sobre projetos estruturais, e determina que a armadura de cisalhamento deve estar posicionada com ângulo entre 45° e 90° em relação ao eixo longitudinal da do elemento estrutural. Além disso, a norma determina que a taxa de armadura transversal em uma viga deve obedecer a Equação 2.22.

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s \times b_w \times \text{sen} \alpha} \quad (2.22)$$

Onde:

ρ_w é a taxa de armadura transversal, a qual não deve ser inferior a $\rho_{w,min} = (0,008 \times \sqrt{f_{ck}}) / f_{yk}$;

A_{sw} é a área de armadura de cisalhamento com comprimento s ;

s é o espaçamento dos estribos medido ao longo do eixo longitudinal do elemento estrutural, o qual não deve ultrapassar $s_{l,max} = 0,75d \times (1 + \text{cot} \alpha)$

b_w é a largura da base da viga; e

α é o ângulo entre o estribo e o eixo longitudinal da viga.

Para verificar a resistência à força cortante (V_{Rd}) de uma viga com armaduras transversais na vertical, a norma indica que V_{Rd} é definida pelo menor valor entre $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,max}$, os quais representam, respectivamente, a resistência de escoamento do aço e a resistência máxima de cisalhamento da viga limitada ao esmagamento do

concreto das bielas de compressão. Estes valores são calculados a partir das Equações 2.23 e 2.24.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z \cdot f_{ywd} \cdot \cot\theta \quad (2.23)$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} / (\cot\theta + \tan\theta) \quad (2.24)$$

Onde:

A_{sw} é a área da seção transversal de armadura de cisalhamento;

s é o espaçamento entre os estribos;

z é o braço de alavanca interno, considerado $0,9d$;

f_{ywd} é a resistência de escoamento da armadura de cisalhamento;

θ é o ângulo entre a biela de compressão e o eixo longitudinal da viga;

α_{cw} é um coeficiente que leva em consideração a tensão na região de compressão da viga;

b_w é a menor largura entre as regiões de tração e compressão da viga;

v_1 é um fator de redução de resistência para concreto rompido por cisalhamento; e

f_{cd} é a força de compressão média do concreto na direção do eixo longitudinal da viga.

Para elementos sem reforço à força cortante, a verificação é dada por $V_{Rd,c}$ visualizado na Equação 2.25.

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100\rho_I \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] b_w \cdot d \quad (2.25)$$

Onde:

$$C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_c;$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0;$$

$$\rho_I = A_{sl} / b_w d \leq 0,02;$$

f_{ck} é a resistência à compressão do concreto em MPa;

k_1 é considerado 0,15;

$$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c \leq 0,2f_{cd};$$

b_w é a menor largura da seção transversal; e

d é a altura útil do elemento.

2.8 Considerações sobre a revisão bibliográfica

Observa-se, a partir das informações expostas, que o uso de FRPs para reparos e reforços ao cisalhamento de vigas de concreto armado possui alta eficiência, principalmente com o uso de fibras de carbono, a qual se demonstra adequada para recuperação e aumento de resistência em até 98% em vigas de concreto armado sem estribos. Materiais FRP's com fibra de vidro também apresentam resultados significativos de aumento de resistência cortante em vigas de concreto armado com taxa de armadura transversal inferiores à taxa mínima. Além disso, os estudos sobre reparos e reforços estruturais à força cortante utilizando FRP's com fibras sintéticas de vidro e de carbono estão em estágio avançado, com diversas variações acerca da inclinação das faixas, número de camadas e situação das vigas, podendo estar danificada ou não, com reparos prévios ou não, e com diferentes taxas de armadura transversal. Dito isto, o conhecimento sobre o comportamentos das fibras sintéticas em técnicas de reparo e reforço estão ainda muito a frente em relação às fibras naturais. No entanto, estudos iniciais existentes acerca do uso de FRP's com fibras de juta também apresentam resultados satisfatórios em reparos e reforços estruturais à força cortante, apontando acréscimos de até 56% na resistência de vigas de concreto armado pré-danificadas e reparadas com faixas de duas camadas do compósito, resultados considerados comparáveis aos obtidos com fibras convencionais. Isto, portanto, viabiliza a continuidade de pesquisas e desenvolvimento do compósito com fibras de juta em processos de reparos e reforços estruturais.

No que se refere à técnica de aplicação do FRP para reparos e reforços ao cisalhamento de vigas de concreto armado, a técnica EBR, a qual consiste no compósito colado externamente, se destaca devido a facilidade e rapidez de aplicação, além de sua boa eficiência. Existem diversas pesquisas publicadas acerca da utilização de FRP's colados externamente que demonstram aumentos significativos de resistência cortante em vigas de concreto armado. As normas desenvolvidas para dimensionamento de reparos e reforços com FRP's colados

externamente são direcionadas para compósitos com fibras sintéticas, considerando o comportamento elástico linear destes materiais e, portanto, não são adequadas para quaisquer fibras naturais, necessitando de adaptações em diversos casos.

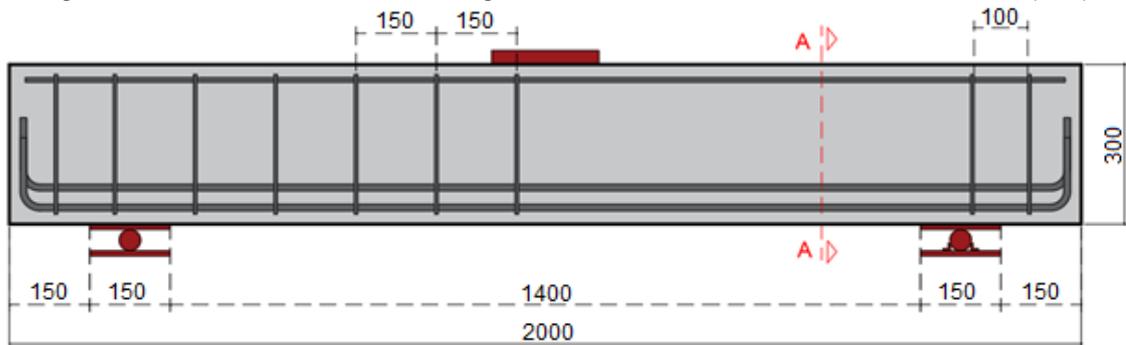
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A pesquisa analisou experimentalmente o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com compósitos de diferentes tipos de fibra. Para tanto, sete vigas de concreto armado foram confeccionadas, reforçadas com a técnica EBR e submetidas ao ensaio de flexão até sua ruptura.

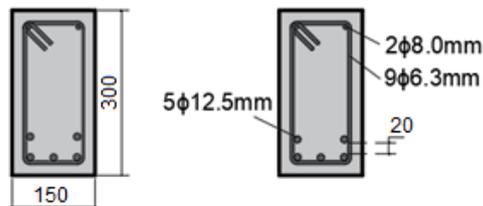
3.1 Característica das vigas

As vigas apresentam 2000 mm de comprimento, 1550 mm de vão entre o eixo dos apoios e seção transversal retangular de (150x300) mm, foram dimensionadas para resistir mais à flexão em comparação à força cortante. Para a armadura de flexão foram utilizadas 5 barras de aço com diâmetro de 12,5mm, na região tracionada e 2 barras com diâmetro de 8,0 mm, na região comprimida, e na armadura transversal foram utilizados estribos de 6,3 mm de diâmetro, posicionados apenas em um trecho da viga, a cada 15 cm, a fim de garantir a falha por cisalhamento no lado sem armadura transversal (Figuras 3.1).

Figura 3.1 – Dimensionamento das vigas estudadas e detalhamento de armaduras (mm).



a) Seção longitudinal.



b) Seção transversal (AA).

Fonte: Autora (2022).

As setes vigas possuem características similares quanto a geometria, material e taxa de armadura (Tabela 3.1). No entanto, possuem diferentes configurações no que se refere ao reforço com FRP.

Os FRPs foram aplicados de forma perpendicular ao eixo da viga, envolvendo três lados desta, em *U*, esta configuração foi adotada devido a facilidade de aplicação em situações reais, onde lajes são apoiadas na superfície das vigas e inviabilizam o envolvimento total da seção transversal destas. As faixas de reforço aplicadas possuem as dimensões dadas por L_f (largura), t_f (espessura total), d_f (altura) e s_f (espaçamento), tal como apresentado na Tabela 3.2 e nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4, para cada tipo de fibra. Estes parâmetros foram encontrados a partir de cálculos normativos, e definidos de forma que a área de reforço de cada sistema FRP forneça o aumento de 20% a 30% da resistência à força cortante em relação à viga de referência, sem reforços. A ordem de aplicação dos tecidos e mantas segue a ordem apontada na Tabela 3.2, ou seja, o “FRP 1ª camada” se refere à camada de reforço em contato com a superfície do concreto.

Tabela 3.1 – Características das vigas.

Comprimento L_{total} (mm)	$L_{vão}$ (mm)	b_w (mm)	h (mm)	d (mm)	f_c (MPa)	Armadura flexão	Estribos
2000	1550	150	300	250	30	5 ϕ 12.5mm	9 ϕ 6.3mm

$$A_s = 613,59 \text{ mm}^2$$

$$A'_s = 100,53 \text{ mm}^2$$

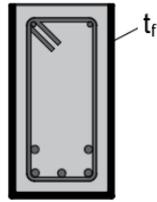
Fonte: Autora (2022).

Tabela 3.2 – Descrição dos sistemas de reforço.

Viga	FRP 1ª camada	FRP 2ª camada	FRP 3ª camada	FRP 4ª camada	L_f (mm)	t_f (mm)	s_f (mm)	h_f (mm)
Ref.	-	-	-	-	-	-	-	-
C	Carbono	-	-	-	60	0,6	180	300
GG	Vidro	Vidro	-	-	125	0,9		
JGJ	Juta	Vidro	Juta	-	130	2,4		
GJGJ	Vidro	Juta	Vidro	Juta	90	2,9		
JJ	Juta	Juta	-	-	160	2,4		
JJJ	Juta	Juta	Juta	-	120	2,9		

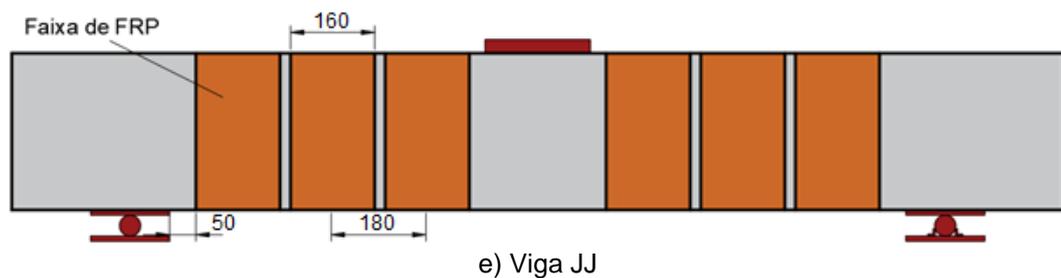
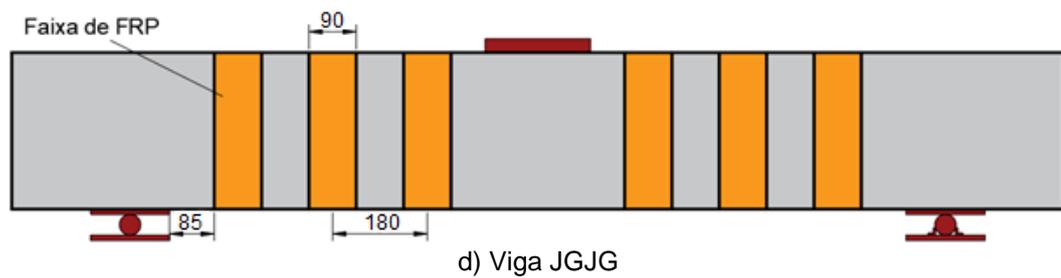
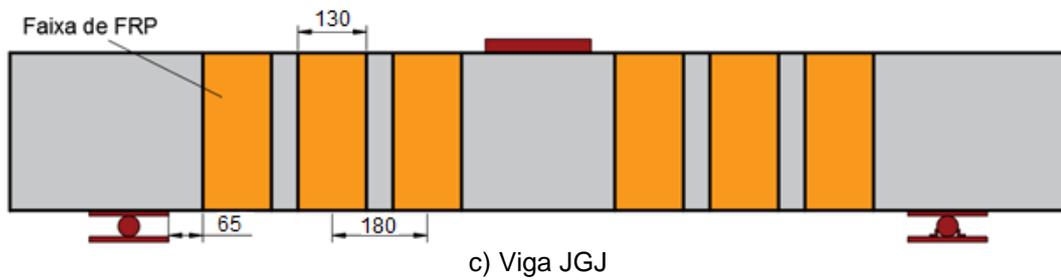
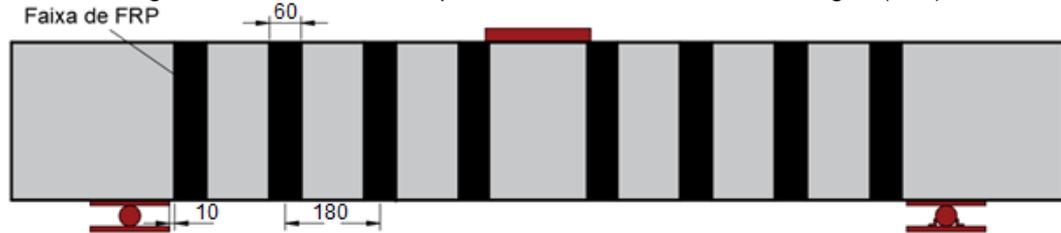
Fonte: Autora (2022).

Figura 3.2 – Envolvimento da viga com os FRPs de reforço, em U, com espessura t_f .

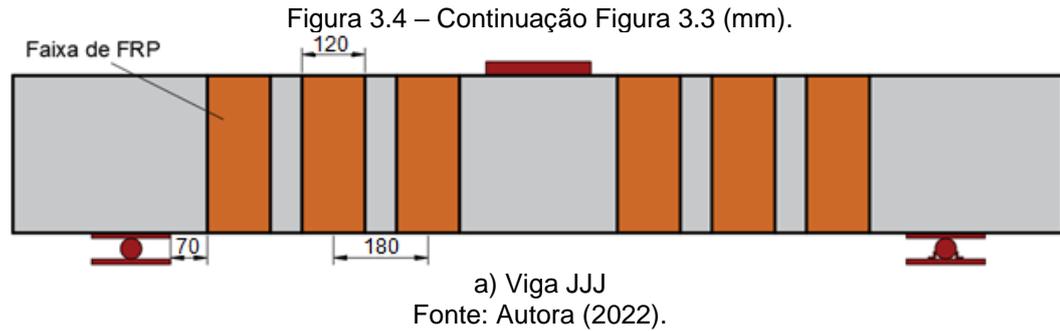


Fonte: Autora (2022).

Figura 3.3 – Dimensões e posicionamento dos FRPs nas vigas (mm).



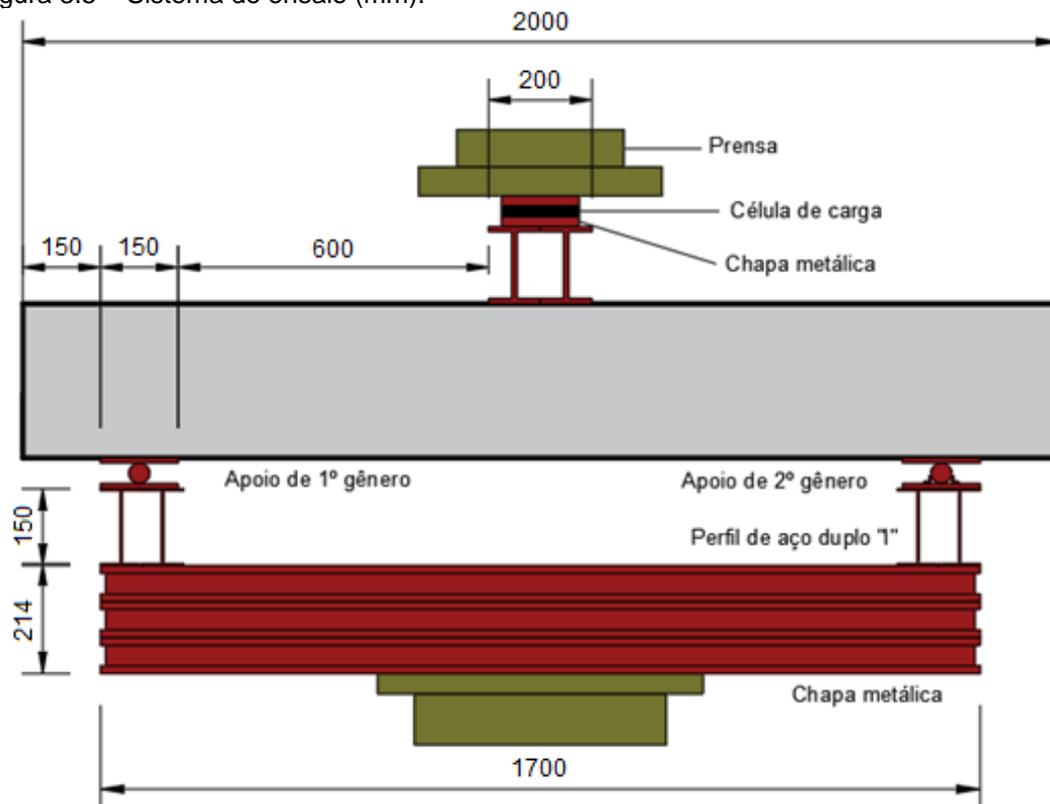
Fonte: Autora (2022)



3.2 Sistema de ensaio

O método de ensaio realizado foi de flexão de três pontos. Para isto, foi aplicado um carregamento crescente e controlado por uma máquina elétrica de testes hidráulicos de controle de velocidade manual com capacidade de 3000 kN, a qual controla a velocidade a partir das cargas, e foi utilizada uma célula de carga com capacidade também de 3000 kN. A força foi aplicada sobre uma área de (150x200) mm, e, portanto, os vãos de cisalhamento foram de 600 mm, conforme a Figura 3.5.

Figura 3.5 – Sistema de ensaio (mm).



Fonte: Autora (2022).

3.3 Instrumentação

A fim de acompanhar e registrar eventuais deformações e deslocamentos sofridos pela viga, dispositivos de medição são instalados no aço, no concreto e nos compósitos, isto é, EERs (Extensômetros Elétricos de Resistência), potenciômetros e LVDT's (*Linear Variable Differential Transformer*). Os dados fornecidos por estes dispositivos foram registrados por meio de um módulo de sistema de aquisição de dados ADS da empresa LINKSYS.

3.3.1 Deslocamento vertical

Um potenciômetro, que pode ser observado nas Figura 3.6 e 3.7, foi apoiado em uma chapa em "L" parafusada na superfície de cada espécime, e fixado com fita adesiva (Figura 3.7) em uma barra metálica fixa externa ao sistema com o objetivo de medir o deslocamento vertical no meio do vão das vigas durante o ensaio, ou seja, a extensão da flecha em relação à força aplicada.

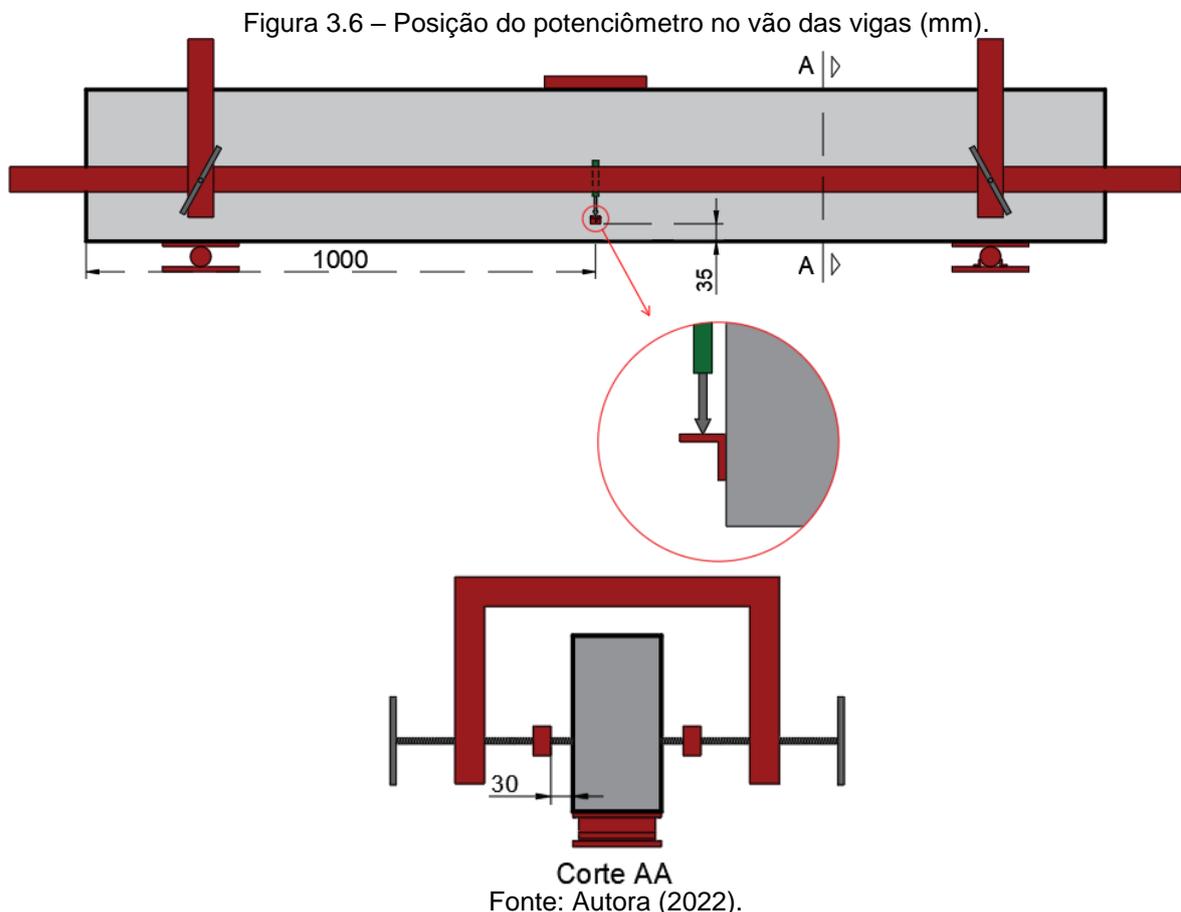


Figura 3.7 – Imagem fotográfica do potenciômetro posicionado no sistema.

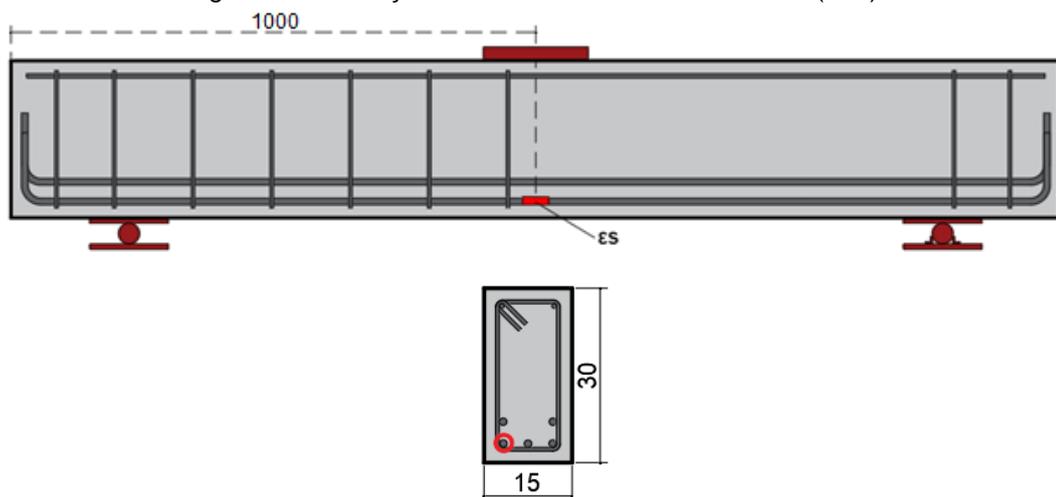


Fonte: Autora (2022)

3.3.2 Deformações de flexão

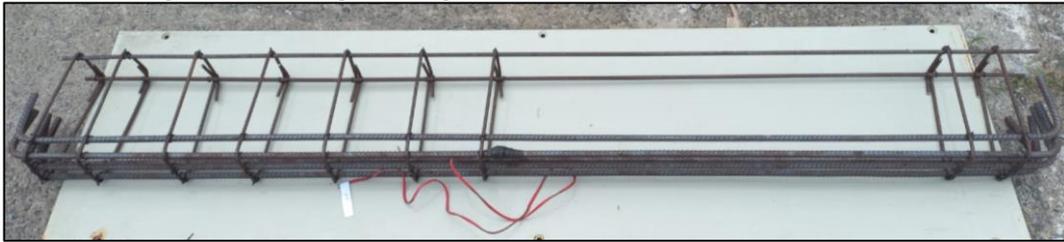
Para acompanhar a deformação de flexão ocorrida nas vigas, ou seja, a tração da armadura longitudinal e a compressão do concreto, foram utilizados os extensômetros. As Figuras 3.8 e 3.9 apresentam a instrumentação do aço, em que um EER foi colado no centro da barra aço de flexão (ϵ_s) indicada na figura, na região tracionada de cada viga, antes da concretagem. As Figuras 3.10 e 3.11 mostram a posição dos dispositivos no concreto (ϵ_c), na região comprimida das vigas.

Figura 3.8 – Posição do EER na armadura de flexão (mm).



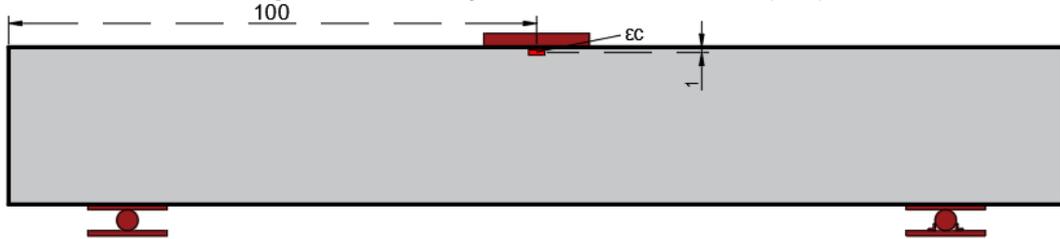
Fonte: Autora (2021).

Figura 3.9 – Imagem fotográfica do EER posicionado na armadura.



Fonte: Autora (2022)

Figura 3.10 – Posição do EER no concreto (mm)



Fonte: Autora (2022).

Figura 3.11 – Imagem fotográfica do EER posicionado na superfície do concreto.

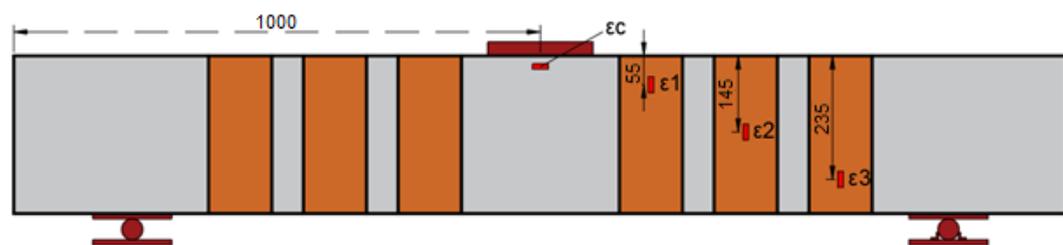
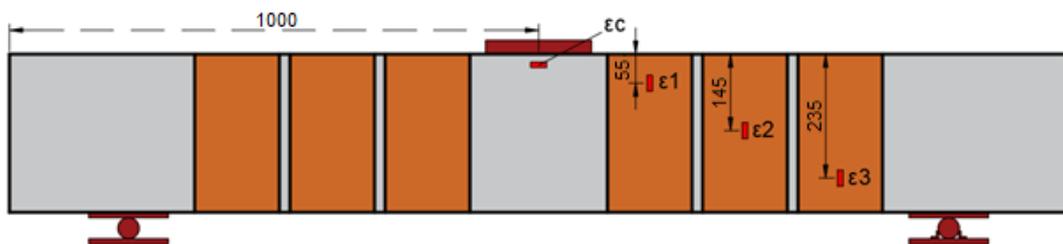
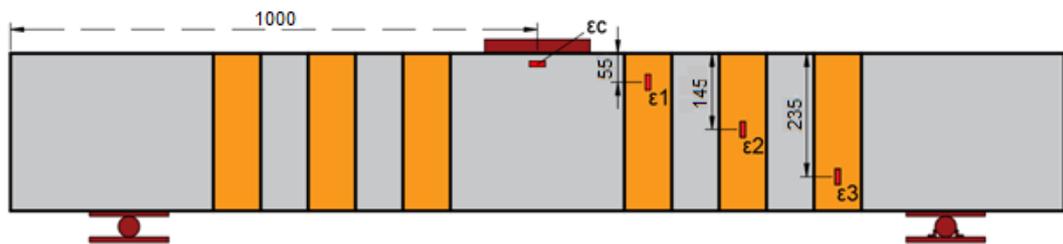
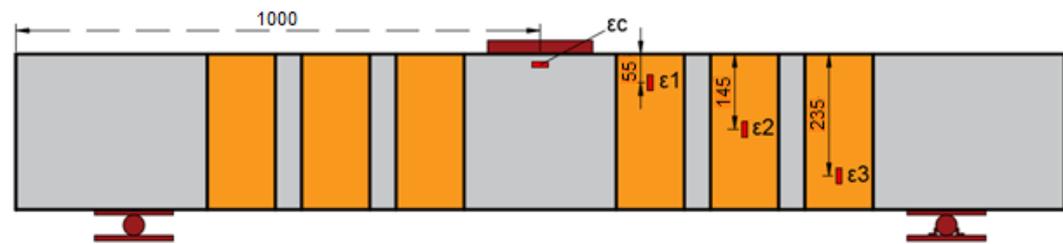
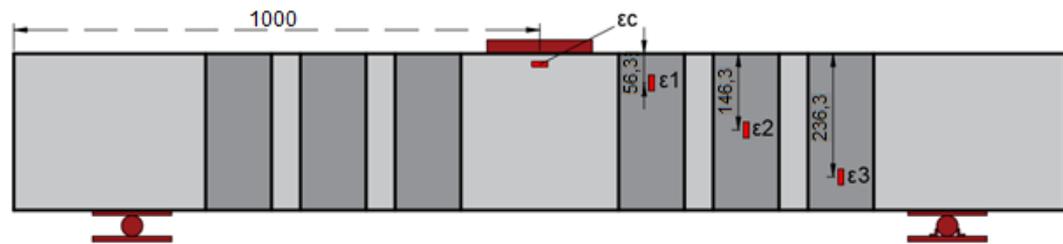
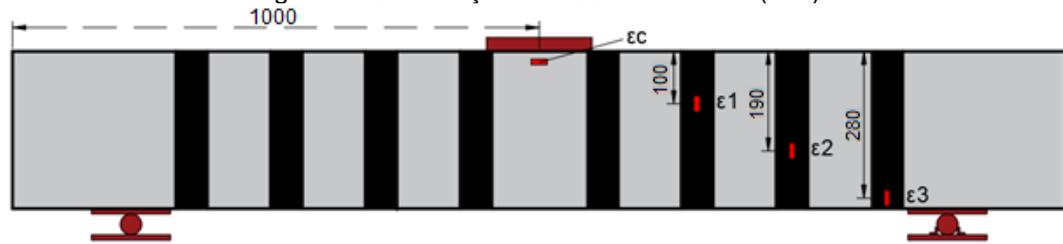


Fonte: Autora (2022)

3.3.3 Deformação nos FRPs

Nos compósitos os dispositivos EER foram colados no eixo vertical de três faixas de FRP (ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3), na direção e na região onde era previsto aparecimento de fissuras por força cortante, como apresenta a Figura 3.12. Esta direção foi traçada partindo de um apoio até a chapa metálica onde a força é aplicada. Estes extensômetros fornecem dados sobre a deformação presente nas faixas de cada viga, desta forma é possível deduzir a partir de que momento e o quanto o reforço foi solicitado e, conseqüentemente, o quanto contribuiu para a resistência da viga.

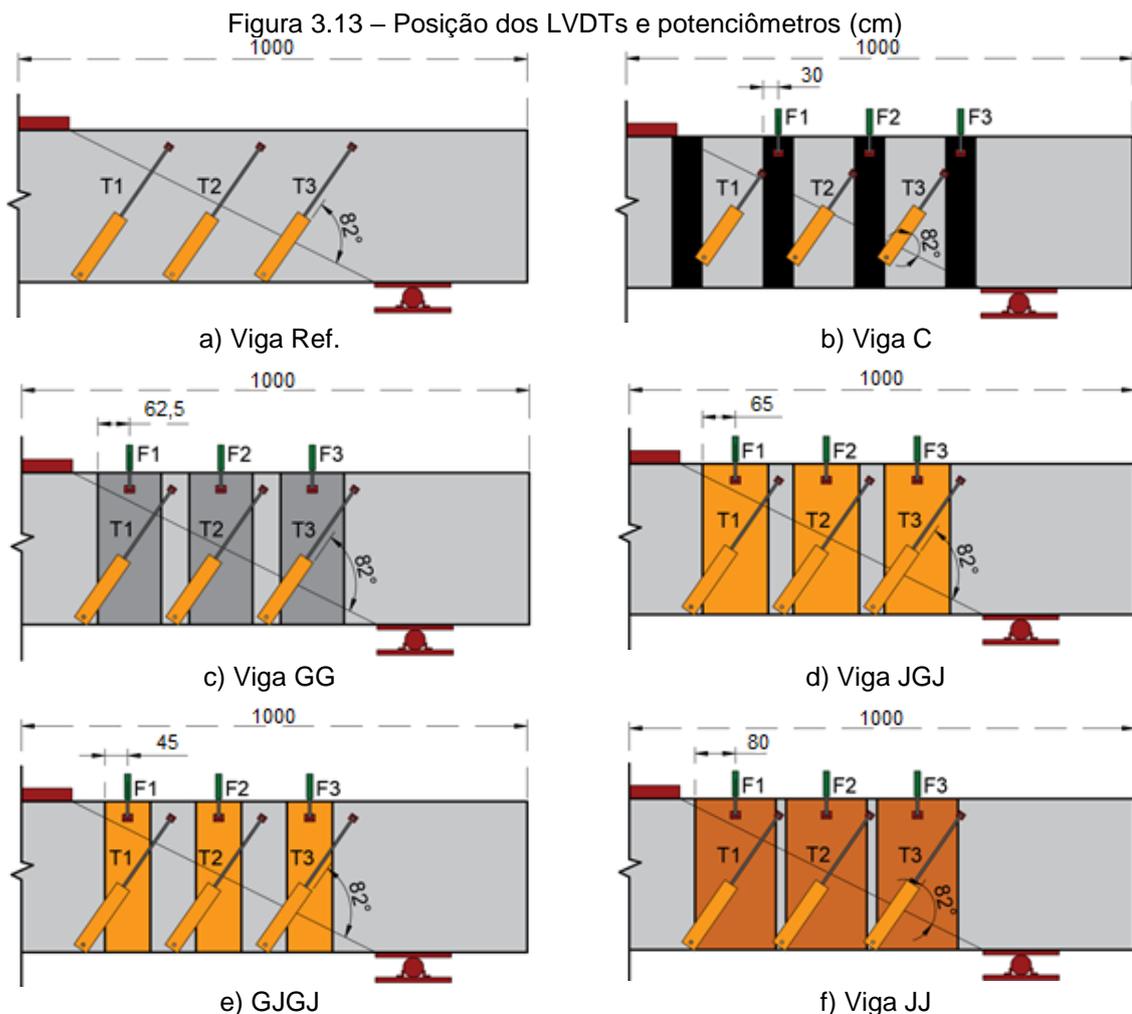
Figura 3.12 – Posição dos EER nos FRPs (mm).



Fonte: Autora (2022).

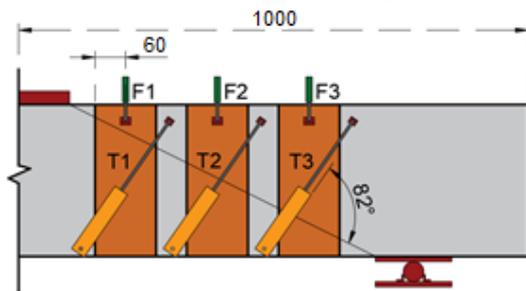
3.3.4 Abertura de fissura e descolamento das faixas de FRP

Para medir o deslocamento causado pela abertura de fissuras no concreto, foram fixados aparelhos LVDT's cruzando três pontos da linha onde foi previsto aparecimento de fissuras por cisalhamento. O ângulo entre os aparelhos e a linha foi definido o mais próximo possível de 90° , sem que os parafusos de fixação danificassem as faixas ou atingissem a armadura da viga. Para todos os elementos foi utilizado o mesmo ângulo e posição dos LVDT's. Além disso, três potenciômetros foram utilizados para verificar o descolamento e deslizamento das faixas durante o ensaio, fixados no concreto, na face superior da viga, e no eixo das faixas analisadas. Tanto os LVDT's (T1, T2 e T3) quanto os potenciômetros das faixas (F1, F2 e F3) podem ser observados nas Figuras 3.13, 3.14, 3.15 e 3.16, abaixo.



Fonte: Autora (2022)

Figura 3.14 – Continuação Figura 3.13.



a) JJJ

Fonte: Autora (2022).

Figura 3.15 – Imagem fotográfica dos LVDT's posicionados.



Fonte: Autora (2022)

Figura 3.16 – Imagem fotográfica do posicionamento dos potenciômetros



Fonte: Autora (2022)

3.4 Materiais

3.4.1 Concreto

O concreto utilizado nas vigas do estudo foi produzido para alcançar resistência à compressão média de 30 MPa. O traço utilizado segue os valores apresentados na Tabela 3.3, com areia natural e brita de diâmetro máximo de 19 mm. Simultaneamente à concretagem das vigas (Figura 3.17), foram moldados 16 corpos de prova cilíndricos (Figura 3.18) de (100x200) mm a serem rompidos após 28 dias de acordo com as normas NBR 5738 (2015) e NBR 5739 (2015), para definir sua resistência à compressão, ensaiados de acordo com a NBR 7222 (2011) e NBR 12142 (2010) para definir sua resistência à tração e conforme a NBR 8522 (2017) para obter seu módulo de elasticidade.

Obedecendo às definições da norma NBR NM 67 (1998), foi realizado o teste de abatimento do tronco de cone, chamado *Slump Test*, com concreto produzido, o

qual forneceu o resultado de 110 mm. Durante os sete dias seguintes à concretagem das peças, foi feita a cura com água diariamente.

Tabela 3.3 – Traço do concreto utilizado nas vigas.

Material	Traço unitário	Quantidade (kg/m ³)
Cimento CP II F 32	1	444,26
Areia média lavada	1,6	710,57
Brita nº 1	2,4	1065,29
Relação água/cimento	0,43	191

Fonte: Autora (2022).

Figura 3.17 – Vigas concretadas.



Fonte: Autora (2022).

Figura 3.18 – Corpos de prova.



Fonte: Autora (2022).

3.4.2 Aço

Para a armadura das vigas, foram utilizadas cinco barras de aço longitudinal com diâmetro de 12,5 mm para tração, duas barras longitudinais com diâmetro de 8 mm na região de compressão, e nove estribos com diâmetro de 6,3mm. As barras foram submetidas à ensaios de tração conforme a norma NBR ISO 6892-1 (2018).

3.4.3 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibra (FRP)

Os FRP's utilizados como reforços a serem aplicados nas vigas foram compostos por uma matriz de resina e um ou dois tipos de fibras contínuas. Foi utilizada a resina de poliéster e as fibras de carbono, vidro e juta. A execução do reforço seguiu o seguinte processo: aplicação de resina na área do reforço, aplicação do tecido, impregnação do tecido com a resina e aplicação de outra camada de tecido quando houvesse e novamente a impregnação com resina. A descrição dos materiais utilizados é dada a seguir:

a) Resina

A resina utilizada para a confecção dos reforços foi a resina de poliéster para laminação Resina de Poliéster Insaturado (Figura 3.19). A qual, segundo informações do fabricante, é uma resina acelerada, tixotrópica, de baixa viscosidade e de excelente compatibilidade com fibras de vidro. A Tabela 3.4 apresenta as propriedades da resina informadas pelo fabricante.

Figura 3.19 – Resina de poliéster.



Fonte: Autora (2022).

Tabela 3.4 – Propriedades da resina dos FRPs

Resistência à tração (MPa)	48
Módulo de tração (MPa)	4.800
Alongamento (%)	1,5
Resistência à flexão (MPa)	70
Módulo de flexão (MPa)	3.400

b) Manta de fibra de carbono

A manta de fibra de carbono utilizada na confecção do compósito é unidirecional. Segundo a ficha técnica do fabricante, é composta por 91% fibra de carbono + 9% fibra de vidro *Hot Melt*, possui força de ruptura de 779 kgf/cm, espessura de 0,29 mm, e gramatura de 320 g/m². A manta foi adquirida por meio de doação realizada pela empresa TexiGlass.

c) Tecido de fibra de vidro

O tecido de fibra de vidro utilizado na confecção do compósito será bidirecional, segundo o fabricante, sua gramatura é de 330 g/m², espessura de 0,30 mm,

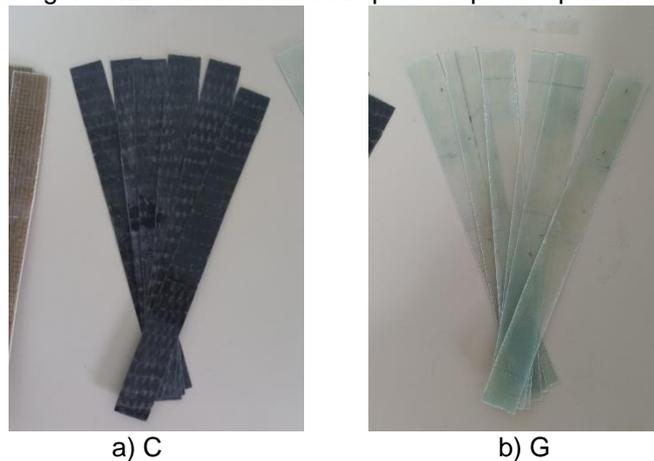
composição de Vidro E, e resistência à tração de aproximadamente 65 kN/m. O tecido foi adquirido em Belém do Pará, no bairro do Mangueirão.

e) Tecido de fibra de juta

O tecido de juta utilizado é um tecido bidirecional com espessura de 1,3mm e gramatura de aproximadamente 260 g/m², adquirido no centro comercial da cidade de Belém do Pará.

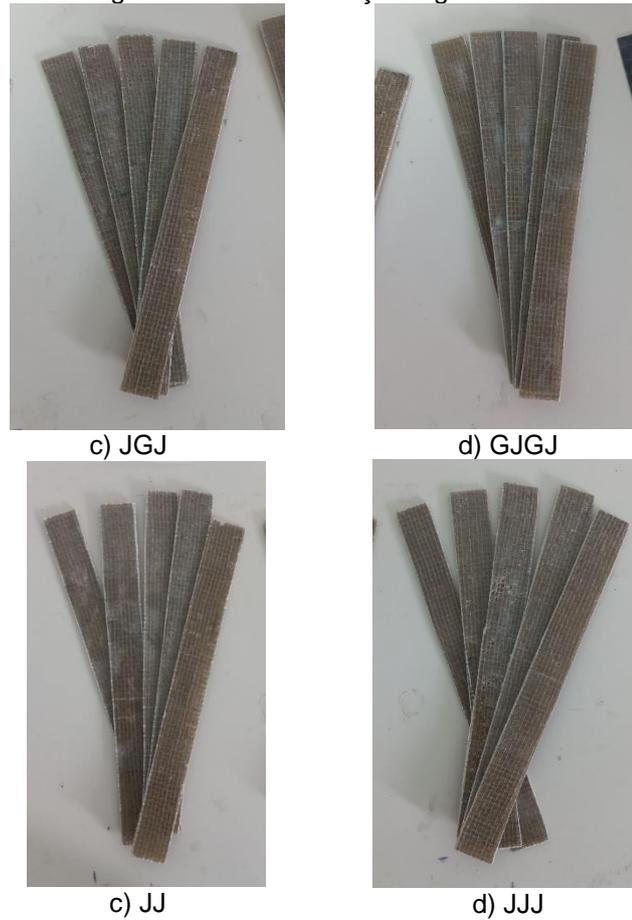
Para definir o número de faixas, número de camadas e largura das faixas de reforço de cada compósito necessários para que as vigas alcancem um aumento equivalente de sua resistência à força cortante, considerando as diferentes características e propriedades mecânicas dos materiais, corpos de prova de FRP foram produzidos afim de se obter suas propriedades e empregá-las nos cálculos normativos. Para tanto, 6 placas de compósitos foram moldadas (Figuras 3.20 e 3.21), representando os 6 tipos de reforço utilizados nesta pesquisa, cujas características são apresentadas na Tabela 3.5. Cada placa foi dividida em cerca de 6 corpos de prova, os quais foram submetidos à ensaio de tração de acordo com a norma ASTM 3039 D. A descrição e dimensões dos corpos de provas são visualizadas na Tabela 3.4.

Figura 3.20 – Placas de FRP para corpos de prova.



Fonte: Autora (2022)

Figura 3.21 – Continuação Figura 3.20



Fonte: Autora (2022).

Tabela 3.5 – Descrição dos corpos de prova de FRP.

Reforço	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
C	0,60		
G	0,60		
JGJ	2,4	25	250
GJGJ	2,9		
JJ	2,4		
JJJ	2,9		

Fonte: Autora (2022).

4 RESULTADOS

Neste Capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais realizados com os materiais utilizados na pesquisa e com as vigas estudadas. Tais resultados incluem: resistência à compressão do concreto; resistência à tração e módulo de elasticidade do concreto, do aço e dos FRP's utilizados como reforços; deformações e deslocamentos de flexão, abertura de fissuras e força máxima registrados durante os ensaios das vigas. A leitura destes dados foi feita de forma contínua, por meio dos dispositivos instalados em cada peça.

4.1 Materiais

4.1.1 Concreto

Os ensaios com os corpos de prova do concreto utilizado nas vigas foram realizados cerca de 6 meses após o dia de concretagem, na mesma semana do ensaio das vigas. Cinco corpos de prova foram ensaiados à compressão, conforme as normas NBR 5738 (2015) e NBR 5739 (2015), 8 ensaiados à tração conforme as normas NBR 7222 (2011) e NBR 12142 (2010), e 3 ensaiados ao módulo de elasticidade conforme a norma NBR 8522 (2017). Valores de compressão obtidos durante os ensaios de módulo de elasticidade foram incluídos aos dados dos ensaios de compressão, portanto, para este ensaio foram considerados 8 resultados. Houve uma baixa variação dos resultados, por este motivo na análise destas propriedades do concreto foi utilizada a média de todos os resultados, conforme é apresentado na Tabela 4.1.

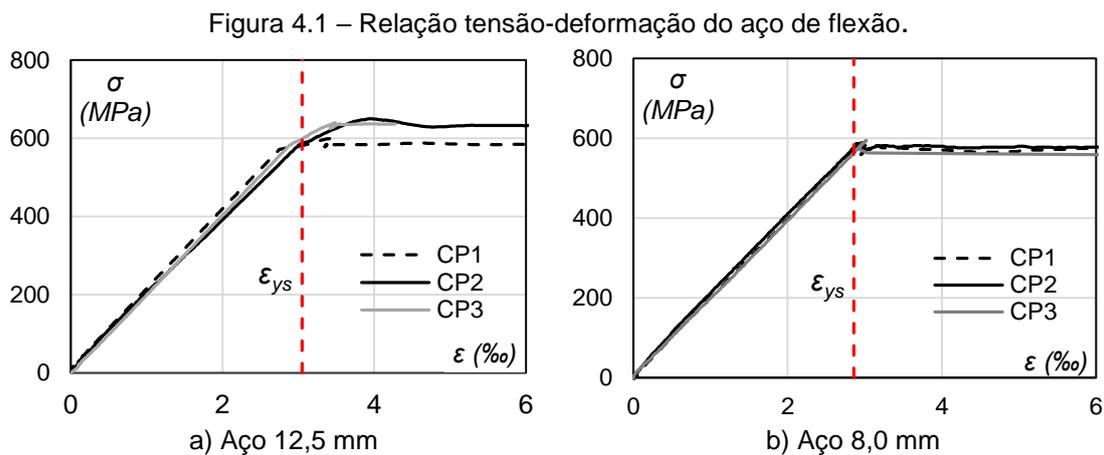
Tabela 4.1 – Propriedades do concreto das vigas.

Viga	f_c (MPa)		f_{ct} (MPa)		E_c (GPa)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio padrão
Ref.	32,46	2,24	4,11	0,71	40,26	2,08
C	29,17	2,87	3,97	0,45		
GG	31,35	4,37	4,16	0,79		
JGJ	31,39	1,47	3,87	0,17		
GJGJ	33,54	1,65	4,35	0,66		
JJ	30,04	3,5	3,89	0,55		
JJJ	30,92	2,09	3,82	0,34		
Média	31,27	2,78	4,02	0,41		

Fonte: Autora (2022).

4.1.2 Aço

A Figura 4.1 apresenta os gráficos com os resultados dos ensaios realizados com corpos de prova das barras de aço de flexão utilizadas nas vigas. Para isto, foram ensaiadas três amostras das barra de 12,5 mm, e três amostras das barras de 8 mm de diâmetro, representando as barras de flexão na área tracionada e comprimida das vigas, respectivamente.



Fonte: Autora (2022).

A partir de análise dos gráficos é possível obter os resultados de resistência à tração do aço de 12,5 mm com média de 618,0 MPa, módulo de elasticidade de 202,6 GPa e deformação específica de escoamento de 3,05‰. Enquanto que para o aço de 8,0 mm o resultado de resistência à tração média foi de 571,1 MPa, módulo de elasticidade de 200,0 GPa e deformação específica de escoamento de 2,86‰.

4.1.3 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibra (FRP)

Após ensaios de tração realizados com os corpos de prova dos FRPs de reforço, de acordo com a norma ASTM D 3039, foram obtidos os resultados mostrados na Figura 4.2, os quais se referem aos gráficos de tensão-deformação de cada material compósito com matriz polimérica de poliéster e tecidos de fibra de carbono, vidro, juta e híbridos. Os corpos de prova que apresentaram resultados inconsistentes ou discrepantes, devido a falhas ocorridas durante o ensaio, foram descartados. Observa-se que, de forma geral, os compósitos

tiveram comportamento elástico linear durante os esforços de tração aplicados sobre os corpos de prova. A partir dos gráficos e da área transversal dos corpos de prova de FRP determinou-se as propriedades mecânicas dos FRP's apresentadas na Tabela 4.2. Para comparar os resultados obtidos, a Figura 4.3 mostra a média das propriedades de cada material.

Figura 4.2 – Relação tensão-deformação FRPs

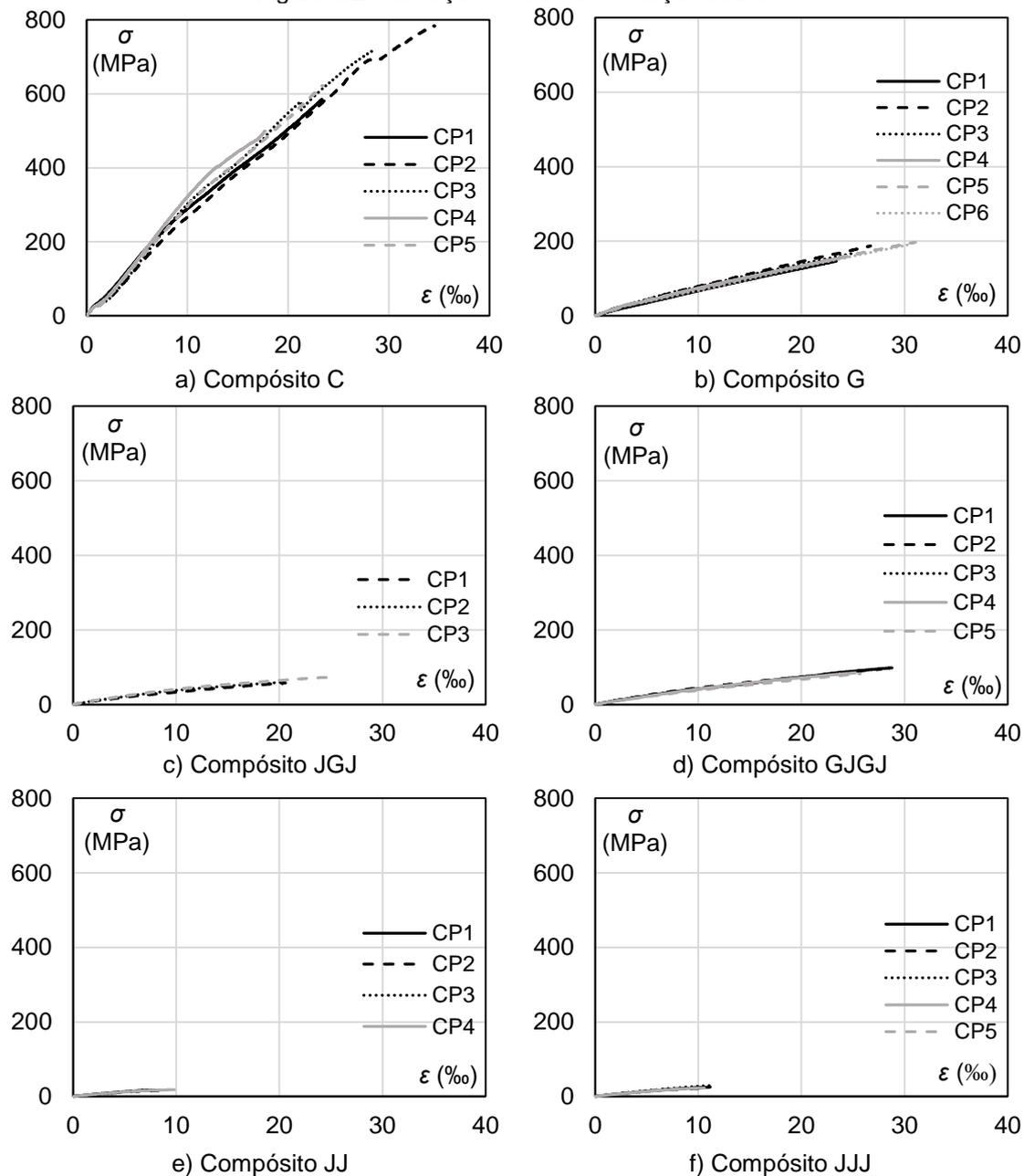
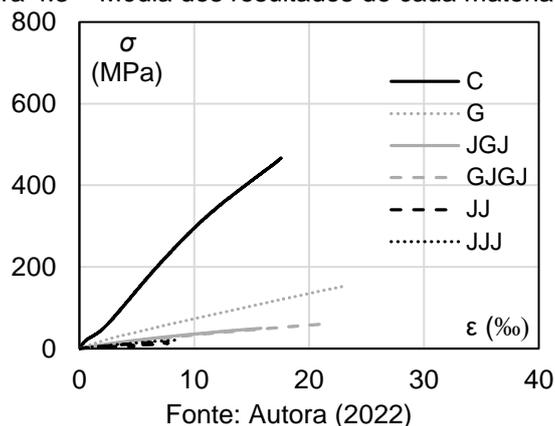


Figura 4.3 – Média dos resultados de cada material FRP.



O FRP com fibra de vidro foi moldado com apenas uma camada do tecido, no entanto, com base nos resultados dos corpos de prova, foram aplicadas duas camadas no reforço da viga GG para que, de acordo com o cálculos normativos, esta viga alcançasse aumento de resistência equivalente às outras vigas reforçadas. De acordo com a Tabela 4.2, o compósito com uma camada de manta de carbono possui a maior resistência à tração e módulo de elasticidade, em relação aos demais materiais. Em contrapartida, o FRP com duas camadas de tecido de juta apresentou os menores resultados de resistência e módulo. A deformação última do compósito com fibra de vidro foi superior e similar ao compósito com fibra de carbono, enquanto que os compósitos com fibra de juta apresentaram os menores resultados.

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas dos FRPs ensaiados.

FRP	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação última (%)
C	28,45	642,04	22,57
G	6,80	174,8	25,71
JGJ	3,95	63,41	16,05
GJGJ	4,09	88,55	21,65
JJ	2,70	17,73	6,57
JJJ	2,98	24,31	8,16

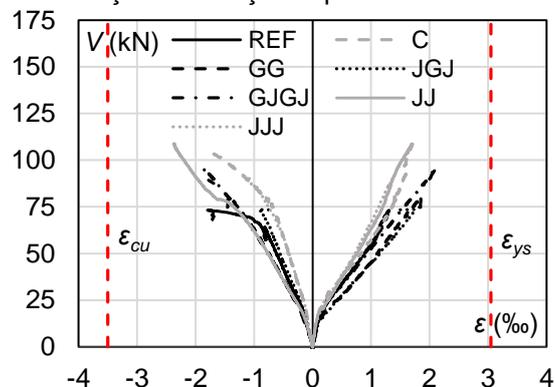
Fonte: Autora (2022).

4.2 Vigas de Concreto Armado

4.2.1 Deformações de flexão

A Figura 4.4 apresenta resultados registrados pelos extensômetros fixados nas regiões comprimidas e tracionadas de cada viga, ou seja, na superfície do concreto, acima da linha neutra, e no aço de flexão, abaixo da linha neutra. Os dados obtidos se referem, portanto, ao comportamento de flexão das vigas durante o ensaio, apresentados por meio de um gráfico da relação força-deformação específica. O gráfico desta figura mostra que quando ocorre a ruptura de todas as vigas ensaiadas, a deformação, que ocorre no aço da armadura positiva e na região comprimida do concreto, não ultrapassam seus limites de escoamento e encurtamento, respectivamente. A partir da análise destes dados e dos resultados encontrados na Tabela 4.1 e Figura 4.1, percebe-se que nenhuma das vigas falharam por flexão.

Figura 4.4 – Força-deformação específica de flexão das vigas.



4.2.2 Modos de ruptura

As Figura 4.5 apresenta as vigas rompidas após os ensaios, estes registros fotográficos se referem ao instante da ruptura e à região estudada das vigas. As Figura 4.6 mostra as fissuras e modos de ruptura de forma mais detalhada. Observa-se que nas vigas C, GG, JGJ e GJGJ ocorreu o descolamento dos reforços e destacamento parcial de concreto, e nas vigas JJ e JJJ ocorreu descolamento e ruptura de faixas de reforço.

Figura 4.5 – Vigas rompidas após ensaios



a) Viga Ref.



b) Viga C



a) Viga GG



b) JGJ



c) GJGJ



d) JJ



e) JJJ

Fonte: Autora (2022).

Figura 4.6 – Detalhes do modo de ruptura das vigas



a) Viga C com destacamento do cobrimento de concreto.



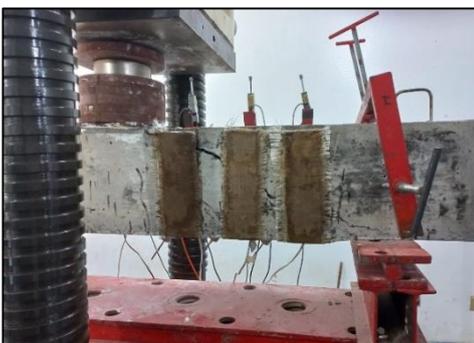
b) Viga C com descolamento das faixas de FRP.



a) Viga GG com descolamento das faixas de FRP.



b) Viga JGJ com descolamento das faixas e destacamento parcial do concreto.



c) Viga GJGJ com descolamento as faixas.



d) Viga GJGJ com destacamento parcial de concreto.



e) Viga JJ com ruptura das faixas de FRP.



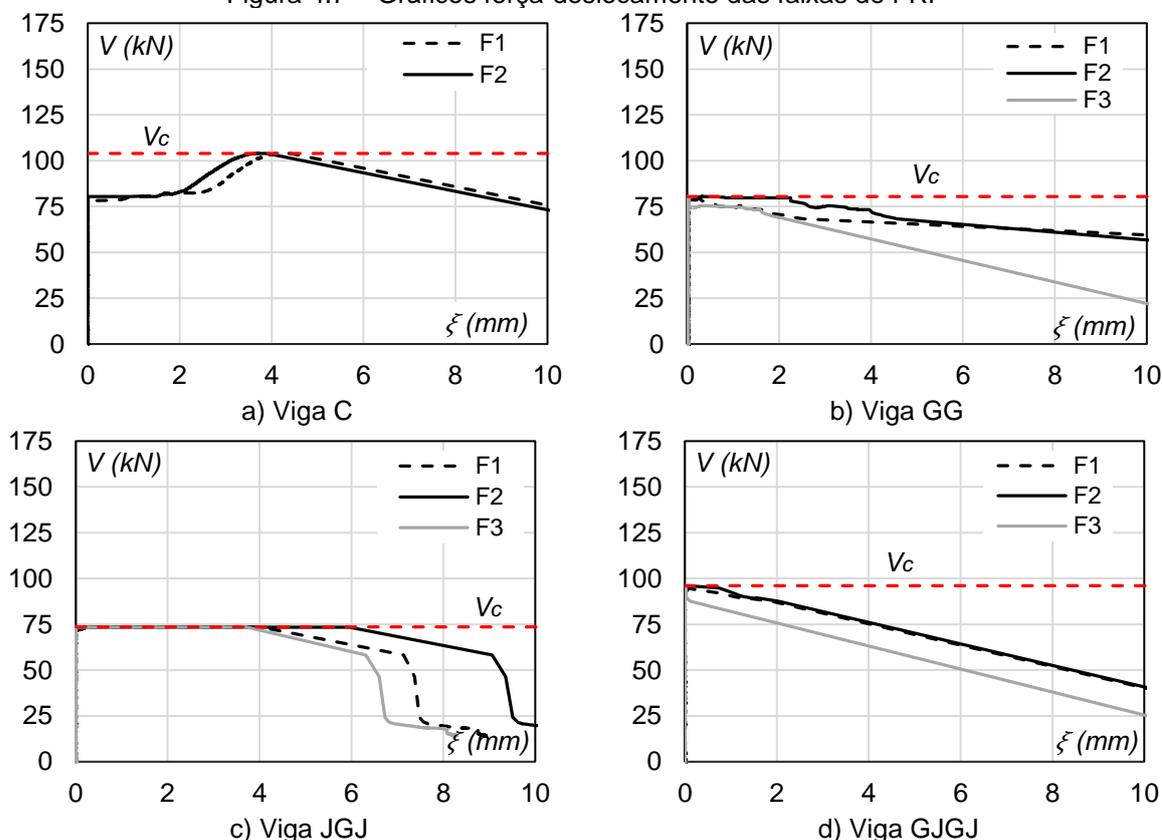
f) Viga JJJ com ruptura e descolamento de faixas.

Fonte: Autora (2022)

4.2.3 Deslizamento das faixas de FRP

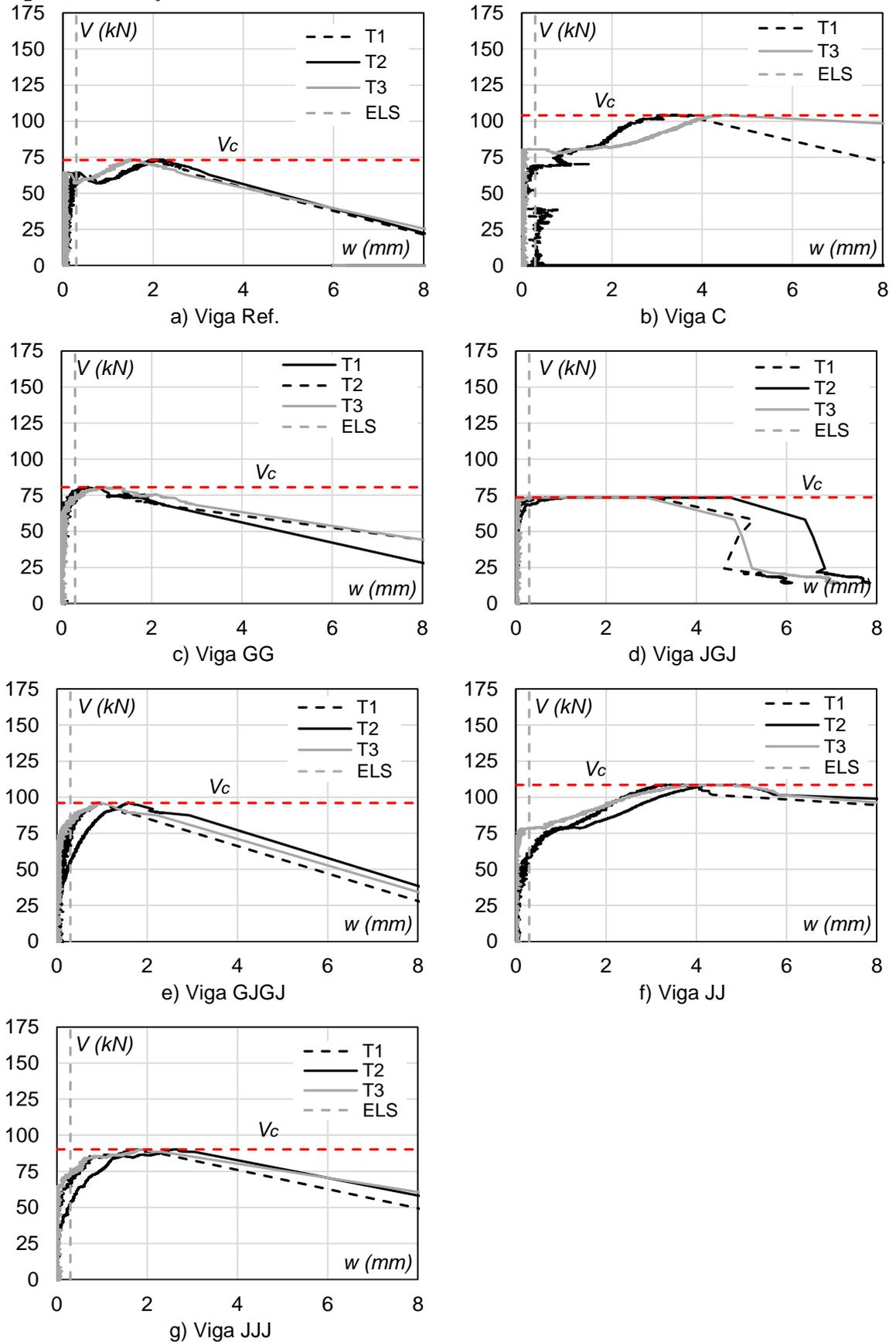
As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam resultados acerca do deslizamento das faixas de FRP em relação à viga. O deslocamento excessivo do compósito indica o descolamento das faixas da superfície do concreto, além disso, os dados indicam também o instante em que este fenômeno começou a acontecer. Os gráficos visualizados se referem à relação força-deslocamento das faixas de FRP. O resultado fornecido pelo potenciômetro F3 da viga C não pôde ser registrado devido a um erro ocorrido na leitura durante o ensaio. Analisando os dados dos gráficos da figura, observa-se que houve o início do descolamento das faixas analisadas no início da ruptura das vigas por força cortante, com exceção das vigas JJ e JJJ, nas quais é identificado o deslocamento sutil pelo potenciômetro de apenas uma faixa de FRP (F3 e F1, respectivamente), e pouca movimentação nas faixas remanescentes em relação à superfície do concreto. Nestes dois casos foi visualizada ruptura das fibras. Nas vigas GG e GJGJ, assim que ocorreu o descolamento das faixas houve a perda de resistência, enquanto que na viga C não houve esta perda de forma imediata, a resistência foi mantida enquanto o deslocamento do FRP aumentava.

Figura 4.7 – Gráficos força-deslocamento das faixas de FRP



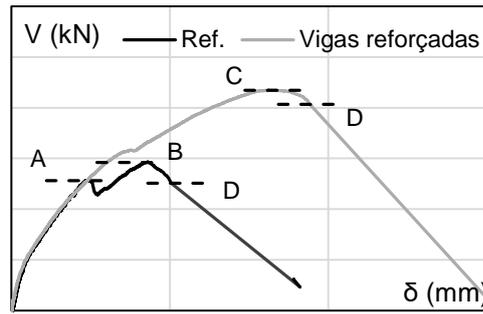
Fonte: Autora (2022)

Figura 4.9 – Força-abertura de fissura de cisalhamento



Fonte: Autora (2022).

Figura 4.10 – Estágios de carregamento utilizados nas figuras.



Fonte: Autora (2022)

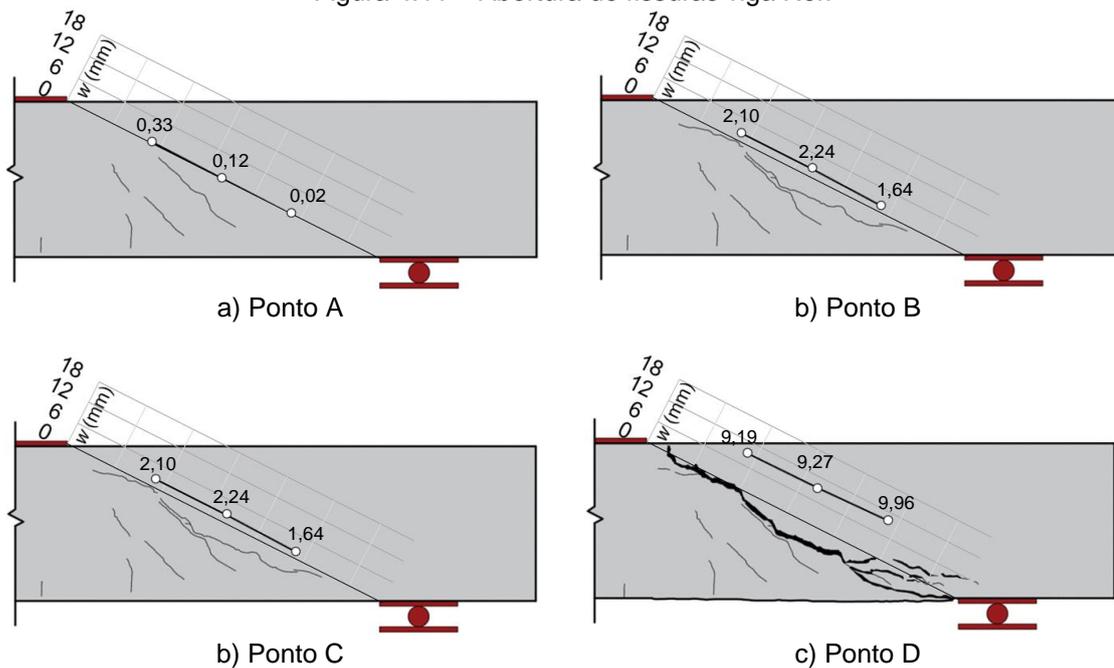
Tabela 4.3 – Estágios de carregamento utilizados nas figuras.

VIGAS	Estágio A (kN)	Estágio B (kN)	Estágio C (kN)	Estágio D (kN)
REF			-	62,79
C			104,03	103,7
GG			80,52	68,24
JGJ	64,01	73,04	73,53	58,16
GJGJ			96,06	87,52
JJ			108,58	101,67
JJJ			90,12	88,49

Fonte: Autora (2022).

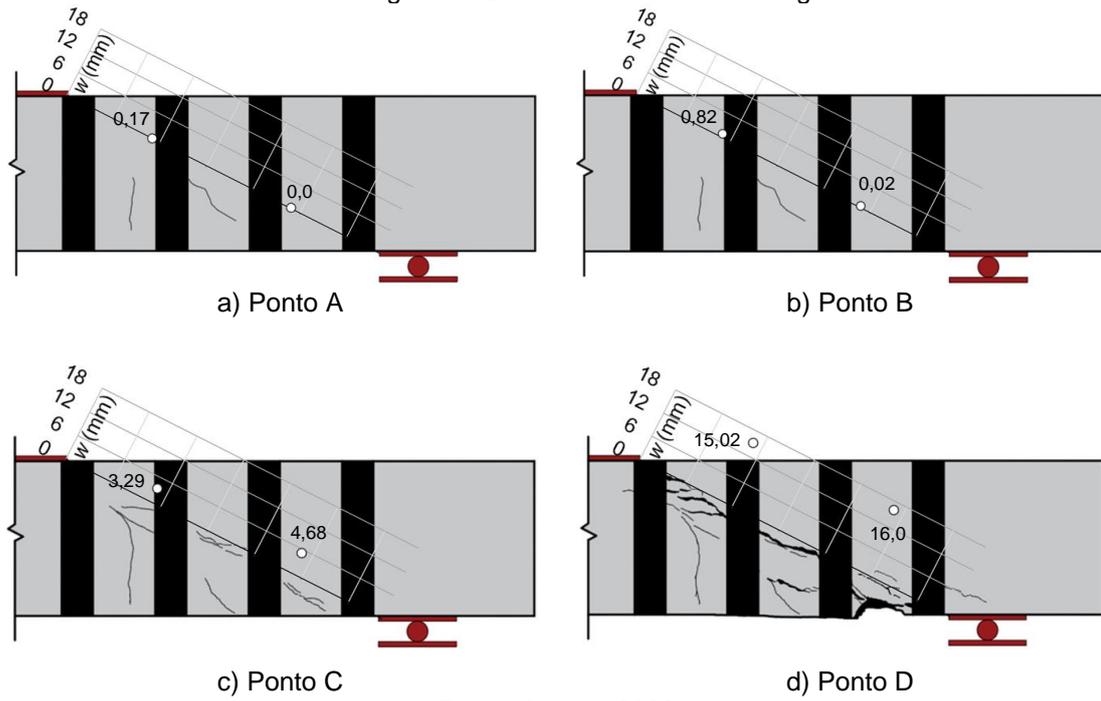
As Figuras 4.11 à 4.17 apresentam um gráfico sobreposto à figuras das vigas que mostram o padrão de fissuração observados em cada estágio. Neste gráfico, o eixo Y representa a abertura de fissura em mm (w), e o eixo X a extensão da fissura, da extremidade do apoio até a extremidade do ponto de força aplicada. Os 3 valores de abertura de fissura obtidos para cada viga se referem às posições dos LVDT's.

Figura 4.11 – Abertura de fissuras viga Ref.



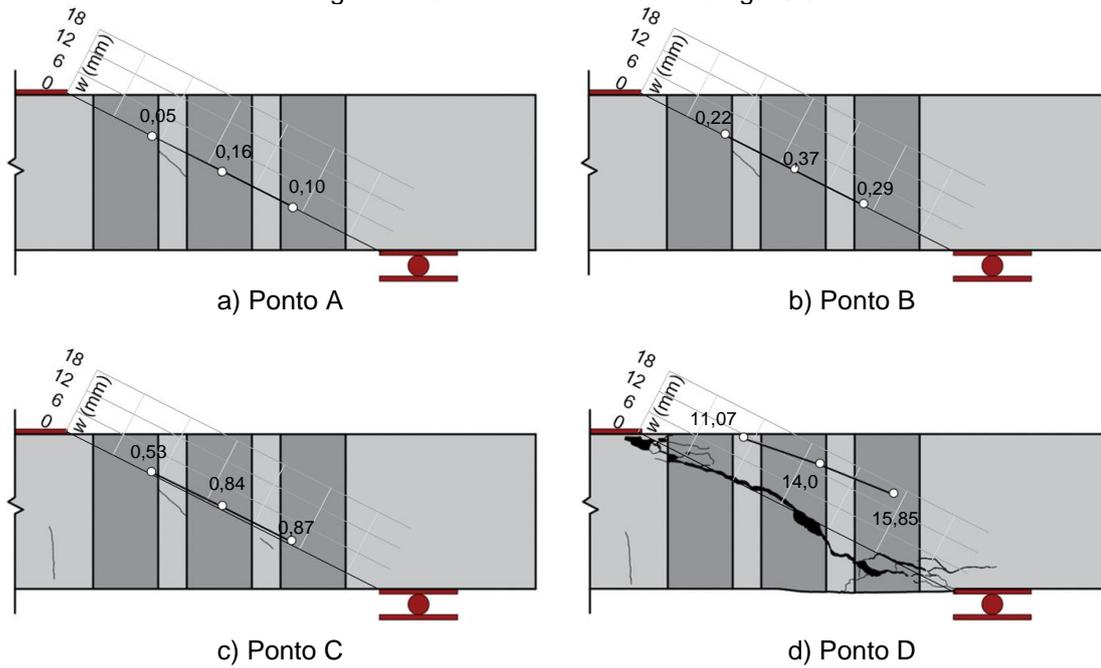
Fonte: Autora (2022)

Figura 4.12 – Abertura de fissuras viga C.



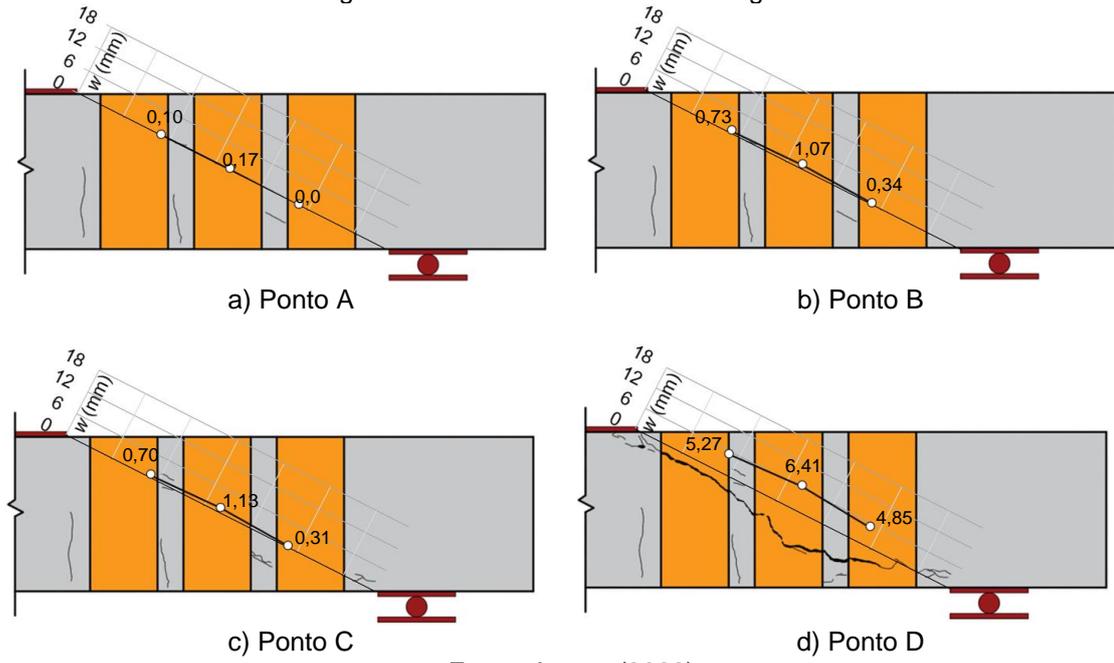
Fonte: Autora (2022).

Figura 4.13 – Abertura de fissuras viga GG.



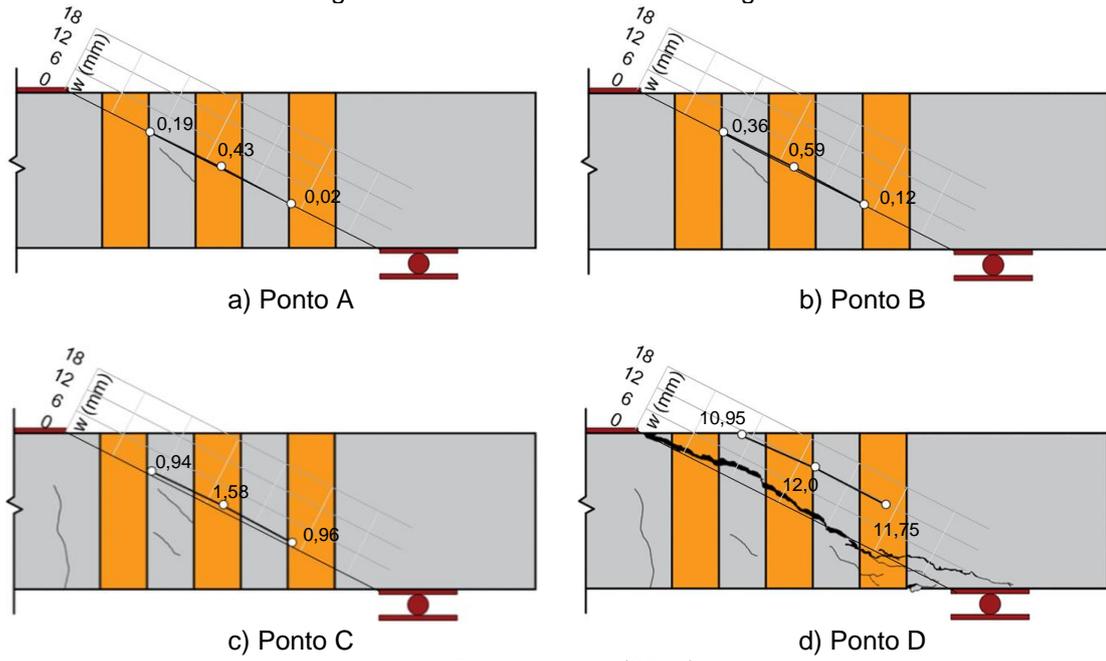
Fonte: Autora (2022).

Figura 4.14 – Abertura de fissuras viga JGJ



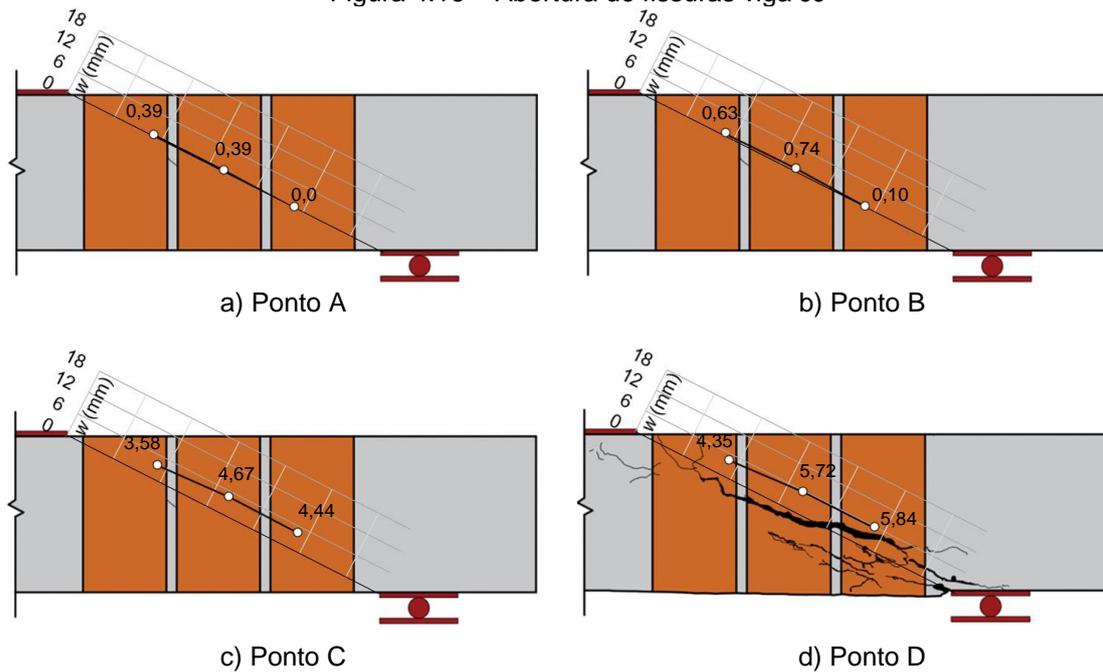
Fonte: Autora (2022).

Figura 4.15 – Abertura de fissuras viga GJGJ



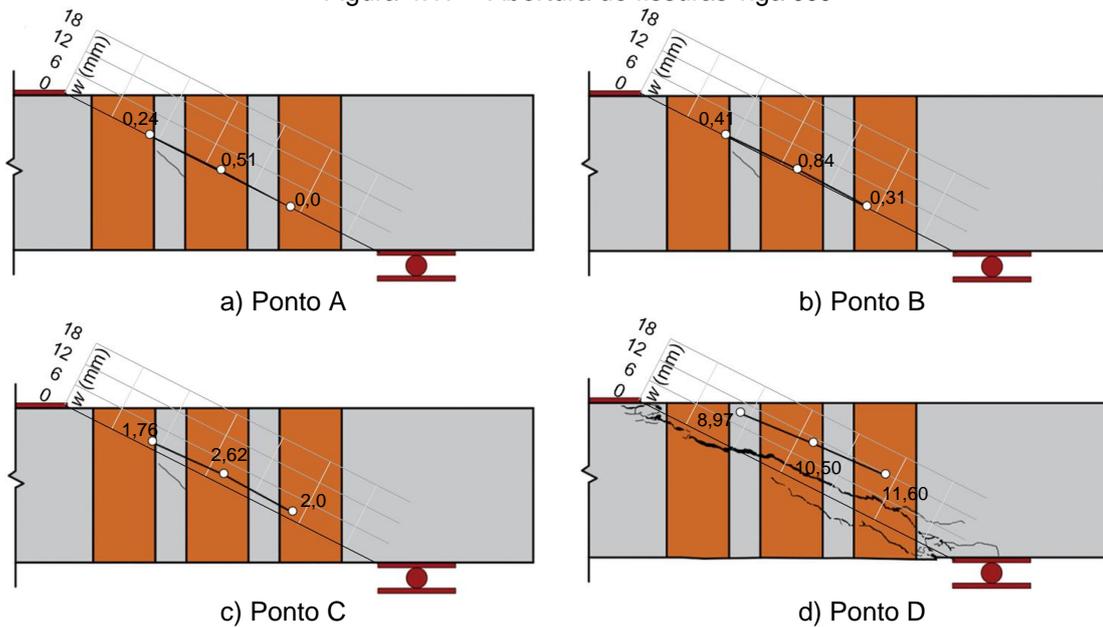
Fonte: Autora (2022).

Figura 4.16 – Abertura de fissuras viga JJ



Fonte: Autora (2022).

Figura 4.17 – Abertura de fissuras viga JJJ



Fonte: Autora (2022).

Analisando as figuras referentes ao Ponto A, todas as vigas, com ou sem reforços, apresentaram abertura de fissura irrelevante. No Ponto B, a figura da viga Ref. coincide com o Ponto C, e apresenta abertura média de 1,99 mm, enquanto que nas vigas reforçadas, no Ponto B, esta abertura foi inferior, alcançado no máximo 1,07 mm, na viga JGJ. No Ponto C, as vigas GG, JGJ e GJGJ mantiveram quase a mesma abertura de fissura manifestada no Ponto B, no entanto a força aplicada nas vigas GG

e JGJ, neste Ponto, é inferior às apresentadas nas demais vigas reforçadas. Por fim, no Ponto D, é possível visualizar que as vigas GJGJ e JJJ apresentaram fissuras com aberturas similares à viga de referência no instante da ruína total do elemento, de 9 a 12 mm, enquanto que nas vigas JGJ e JJ este valor foi inferior, com abertura máxima de 6,41 mm. Neste Ponto, as vigas C e GG tiveram abertura de fissura média de 15,51 e 13,64 mm, respectivamente, aproximadamente 50% superiores à média encontrada na viga *Ref.* de 9,47 mm.

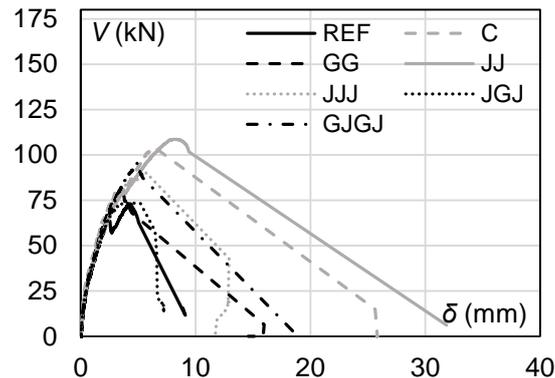
De forma geral, de acordo com as figuras, é possível confirmar que os reforços com FRP's restringiram o aparecimento de fissuras nas vigas. Na viga GG a ruptura foi brusca, sem avisos, pois esta alcançou sua força máxima (Ponto C) com quase nenhuma fissura visível. Em contrapartida, as demais vigas reforçadas mantiveram o padrão de fissuração da viga de referência. As vigas JGJ e GJGJ apresentaram fissuras antes da ruptura, porém de forma reduzida. Por fim, as vigas JJ e JJJ não apresentaram fissuras visíveis, o que pode ter acontecido devido à largura das faixas de FRP, no entanto os LVDT's registraram movimentações que sugerem abertura de fissuras por baixo dos compósitos.

4.2.5 Deslocamento vertical

A Figura 4.18 apresenta o gráfico de força-deslocamento vertical, onde V (kN) se refere à tensão de cisalhamento e δ (mm) ao deslocamento vertical de cada viga ensaiada. A Tabela 4.4 resume os dados do gráfico com informações sobre a força cortante máxima, o deslocamento correspondente e o incremento de cada espécime em comparação à viga de referência, sem reforço.

De acordo com os dados apresentados, a maior resistência à força cortante alcançada pertence à viga JJ, reforçada com duas camadas de juta e faixas com maior largura, com acréscimo de 48,66% em relação à viga de referência (*Ref.*), semelhante à viga C, com uma camada de fibra de carbono, e incremento cinco vezes superior à viga GG, reforçada com duas camadas de vidro. A viga JJJ, reforçada com 3 camadas de fibra de juta, apresentou aumento de resistência cisalhante inferior à viga JJ e à viga C, com metade do incremento destas vigas, e o dobro do incremento apresentado na viga GG.

Figura 4.18 – Gráfico força-deslocamento de flexão das vigas.



Fonte: Autora (2022).

Nota-se também um aumento irrelevante de resistência referente à viga JGJ, de 0,67%. No entanto é observado que o comportamento desta viga se difere da viga de referência, pois houve uma contenção de deslocamento vertical e de aparecimento de fissuras com força superior aplicada na viga reforçada. Ademais, analisando a viga JJ com a viga C no gráfico, pode-se concluir que, o compósito reforçado com fibra de juta apresentou eficiência comparável ao FRP com fibras de carbono, como reforço à força cortante de vigas de concreto armado.

Tabela 4.4 – Resumo de resultados máximos obtidos de força-deslocamento

VIGAS	V (kN)	δ (mm)	Incremento (%)
REF	73,04	4,35	-
C	104,03	6,45	42,43
GG	80,52	3,52	10,24
JGJ	73,53	3,67	0,67
GJGJ	96,06	5,01	31,52
JJ	108,58	8,37	48,66
JJJ	90,12	5,70	23,38

Fonte: Autora (2022).

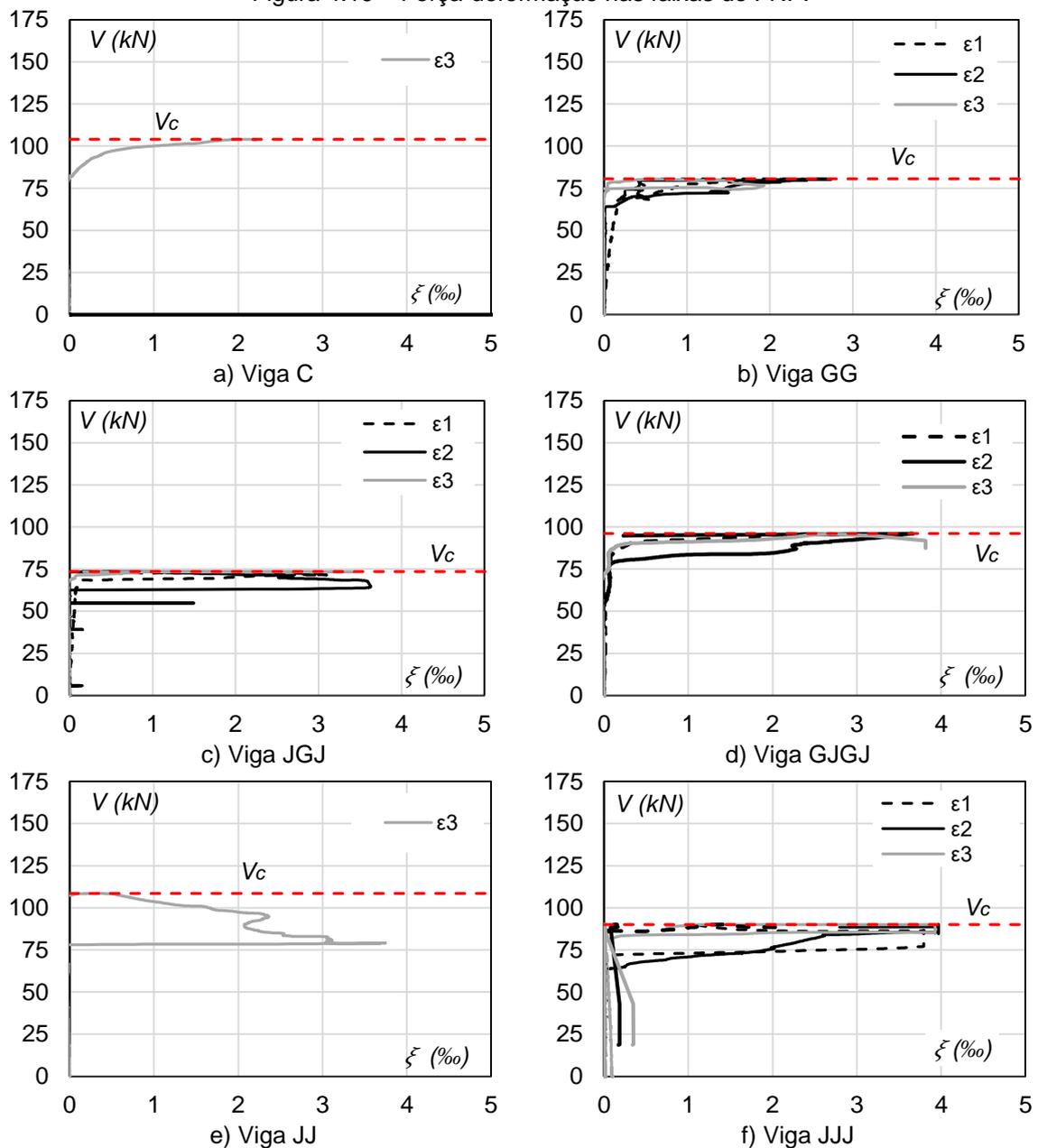
4.2.6 Deformação nas fibras

Os resultados apresentados na Figura 4.19 se referem aos extensômetros ε_1 , ε_2 e ε_3 , colados nas faixas de FRP, para medir as deformações sofridas pelo reforço em relação à força aplicada, além de registrar o instante em que a resistência das faixas é solicitada. Os gráficos relacionam força-deformação.

Os resultados fornecidos pelos extensômetros ε_1 e ε_2 das vigas C e JJ foram perdidos devido a erros de leitura. No geral, os reforços passaram a ser solicitados após o valor da força máxima da viga Ref. ser atingido. Na viga C, o extensômetro que pôde ser registrado, apresentou deformação de 2,21‰, e os compósitos da viga GG alcançaram deformações de até 2,74‰, e então houve o descolamento do

material nestes dois elementos. Nas vigas JGJ e GJGJ, as deformações foram superiores às visualizadas nas vigas C e GG, com 3,63‰ e 3,81‰, respectivamente, próximas da deformação máxima definida pela norma ACI 440.2R (2017) de 4‰, ainda assim houve a falha por descolamento do FRP sem a ruptura deste. Por fim, na viga JJ a deformação registrada foi de 3,75‰, e na viga JJJ a deformação ultrapassou a deformação de 4‰, no entanto a máquina de registro de dados possui leitura limitada e portanto deformações acima deste valor não puderam ser registradas. Nestas duas vigas a falha ocorreu com a ruptura das faixas.

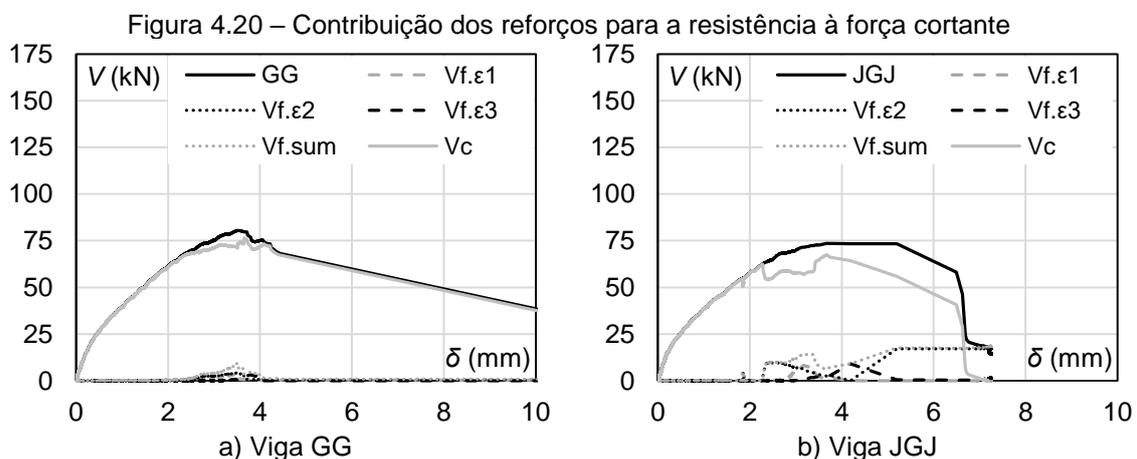
Figura 4.19 – Força-deformação nas faixas de FRP.



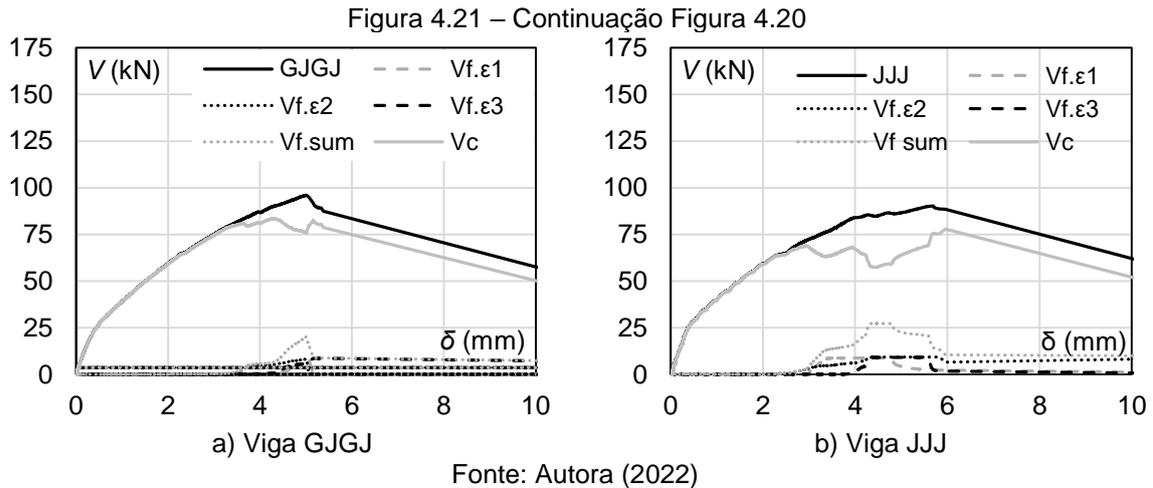
Fonte: Autora (2022).

Para melhor interpretação acerca da solicitação de resistência das faixas, utilizando os resultados da Figura 4.19, foram elaborados os gráficos da Figura 4.20, onde é possível visualizar a contribuição de resistência cortante fornecida pelos reforços. V_f , visualizado na figura, se refere à parcela de força resistida pelo FRP, sendo $V_{f.\epsilon1}$, $V_{f.\epsilon2}$, $V_{f.\epsilon3}$ a força registrada por cada extensômetro colado, e $V_{f.sum}$ a somatória destes valores. Estes resultados foram obtidos utilizando a deformação das faixas, registrada em ensaios experimentais das vigas, multiplicada pela área da seção transversal do reforço nas duas faces da viga e pelo módulo de elasticidade do compósito, obtido nos ensaios experimentais dos corpos de prova de FRP. V_c é a parcela de força resistida pelo concreto devido ao efeito pino, engrenagem dos agregados, entre outros fatores. Este valor foi obtido subtraindo $V_{f.sum}$ da resistência à força cortante total de cada viga.

A partir dos gráficos apresentados é possível observar que, de forma geral, a força resistida pelo concreto apresentou resultado similar para todas as vigas, com valor próximo à força cortante máxima da viga de referência, *Ref.* Observa-se também a alta contribuição fornecida pelo FRP com três camadas de juta, em comparação aos demais reforços, visto que ainda que o concreto nesta viga tenha perdido resistência, o compósito, ao ser solicitado, contribuiu para manter e aumentar sua capacidade. Na viga JGJ, apesar de sua resistência cortante máxima ter sido a mesma apresentada pela viga de referência, também houve diminuição de tensão do concreto neste elemento em relação à viga *Ref.*, o que ocasionou a solicitação das faixas de FRP, as quais contribuíram com cerca de 9% da resistência à força cortante máxima desta viga, mantendo a resistência original. Além disso, o FRP neste elemento tornou a ruptura estável mantendo aumento de deformação, sem perda de resistência.



Fonte: Autora (2022).



O FRP com duas camadas de fibra de vidro foi pouco solicitado e portanto sua contribuição foi pouco significativa. Por fim, de acordo com o gráfico o reforço da viga GJGJ contribui com aproximadamente 21,02% de sua resistência máxima à força cortante, visto que a viga apresentou um pouco mais de resistência em relação à viga Ref. Devido ao erro ocorrido nos resultados das vigas C e JJ, não foi possível a elaboração dos gráficos de contribuição de resistência nessas duas peças.

Utilizando os quatro Estágios mostrados na Figura 4.10, foram desenvolvidas as Figuras 4.22 e 4.23, onde gráficos apresentando a deformação dos FRPs (ϵ) em cada estágio, fornecida pelos extensômetros instalados, estão sobrepostos à ilustração das vigas. Observa-se que no Estágio A a viga JGJ apresentou maior solicitação do FRP central, em relação às demais vigas, as quais apresentaram deformações irrelevantes. No Estágio B, as vigas GG, JGJ e JJJ apresentam deformação nos reforços, por outro lado, as vigas C, GJGJ e JJ ainda não haviam sofrido deformações. No Estágio C, todas as vigas apresentam deformação nos compósitos, no entanto, esta é maior nas vigas GJGJ e JJJ. No Estágio D, de forma geral, as deformações diminuem em relação ao Estágio C devido a ruptura e descolamento das faixas, neste caso os reforços deixam de ser solicitados.

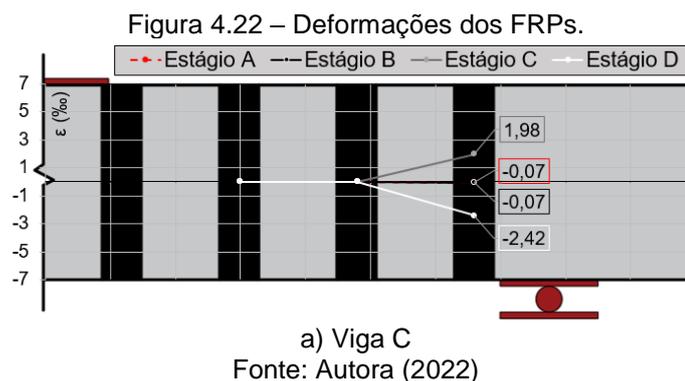
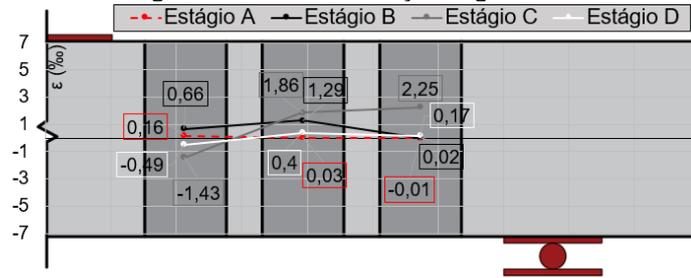
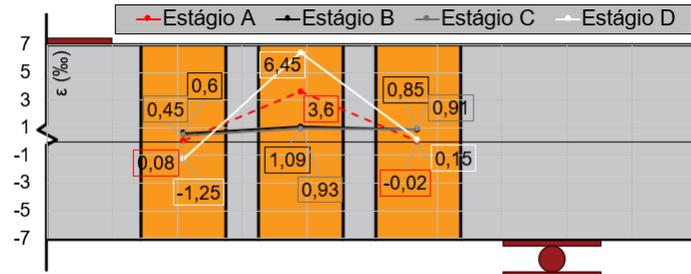


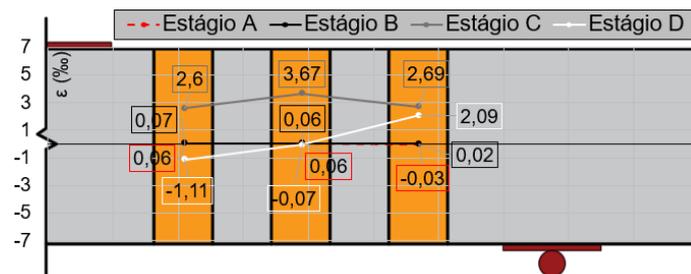
Figura 4.23 – Continuação Figura 4.22



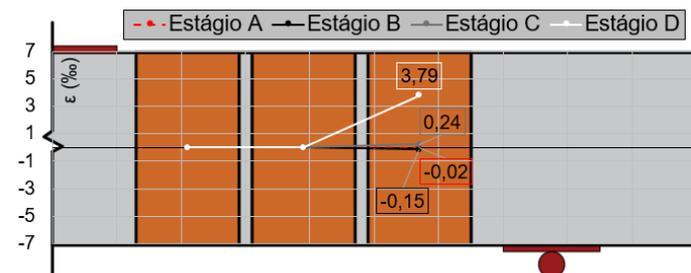
a) Viga GG



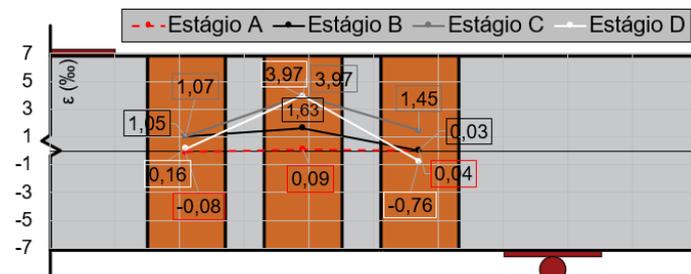
b) Viga JGJ



c) Viga GJGJ



d) Viga JJ



e) Viga JJJ

Fonte: Autora (2022)

4.2.7 Carga última e revisão normativa

A Tabela 4.5 apresenta as características de cada viga ensaiada, a resistência à compressão média do concreto utilizado, relação entre a força cortante máxima das vigas e a força de flexão calculada (V_u/V_{flex}), propriedades dos reforços aplicados, modo de ruptura, incremento fornecido pelo reforço e força resistida pelo concreto. É possível observar que apesar dos compósitos das vigas C e JJ apresentarem propriedades diferentes, a força cortante máxima atingida por estas vigas durante os ensaios foi similar, pois esta diferença foi compensada no dimensionamento das faixas aplicadas, o mesmo pode ser visualizado nas vigas GJGJ e JJJ. Além disso, a relação entre a força cortante máxima (V_u) e a força de flexão calculada (V_{flex}) foi menor que 1 em todas as vigas, isto significa que nenhuma viga rompeu por flexão neste estudo experimental.

Tabela 4.5 – Resumo das características e propriedades das vigas.

VIGAS	d (mm)	b (mm)	f _c (MPa)	V _u /V _{flex}	FRP		Modos de ruptura	V _{f.exp} (kN)	V _{c.exp} (kN)
					E _f (GPa)	f _f (MPa)			
REF	266,85	147		0,65	-	-	Cisalhamento	-	
C	270,65	160		0,90	28,45	642,04	Cisalhamento/ descolamento de FRP/ destacamento parcial do concreto	30,99	
GG	270,05	145		0,71	6,80	174,8	Cisalhamento/ descolamento de FRP	7,48	73,04
JGJ	262,45	152	31,25	0,66	3,95	63,41	Cisalhamento/ descolamento de FRP	0,48	
GJGJ	267,85	153		0,84	4,09	88,55	Cisalhamento/ descolamento de FRP	23,02	
JJ	271,05	150		0,94	2,70	17,73	Cisalhamento/ ruptura do FRP	35,54	
JJJ	263,85	162		0,80	2,98	24,31	Cisalhamento/ ruptura do FRP	17,08	

Obs.: A_s = 613,59 mm² para todas as vigas.

Fonte: Autora (2022).

A Tabela 4.6 apresenta todos os valores de previsão de força máxima de cada viga e reforço, baseados em cálculos normatizados. Os cálculos para encontrar a força cortante (V_c) das vigas, sem contar com os reforços, foram realizados de acordo

com as normas ABNT NBR 6118 (2014), Eurocode 2 (2004) e ACI 318 (2019). Para obter o valor de resistência à força cortante acrescentada às vigas pelos FRPs (V_f), foram utilizadas as normas ACI 440.2R (2017) e *fib* 90 (2019). Foram desconsiderados os coeficientes de segurança a fim de obter valores mais precisos.

O valor de $V_{c,NBR}$ foi calculado conforme o que é descrito no tópico 2.7.3.2 deste trabalho, desconsiderando o fator de segurança e utilizando os dados fornecidos nas Tabelas 3.1 e 4.1. Para calcular o $V_{c,ACI}$, foi utilizada a Equação 2.20c, com os dados observados na Tabela 3.1. Por fim, o cálculo de $V_{c,EC2}$ foi realizado conforme a Equação 2.25, desconsiderando o fator de segurança e considerando os dados das Tabelas 3.1 e 4.1.

O valor de $V_{f,ACI}$ foi obtido a partir da Equação 2.3, os valores aplicados nesta equação são encontrados nas Tabelas 3.2 e 4.2, a tensão efetiva foi considerada 0,004% conforme descreve a norma, o ângulo α adotado foi de 90° e o valor de d_{fv} coincide com a altura útil das vigas encontrada na Tabela 3.1. Para definir o valor de $V_{f,fib}$, foi utilizada a Equação 2.7, para a qual também foram utilizados os dados das Tabelas 3.1, 3.2 e 4.2, além disso, foi necessário realizar o cálculo do comprimento de ancoragem das faixas, conforme o que é descrito em norma. Foi estimado um valor de V_f que aumentasse a resistência das vigas em 20% à 30%, em relação à viga de referência, de acordo com a norma ACI 440.2R (20147), para isto, foram testados diferentes dimensões e espaçamentos para as faixas de reforços até que fossem obtidos resultados similares de $V_{f,ACI}$ para todas as vigas reforçadas. O valor de incremento foi definido de forma que a força cortante total das vigas fosse, de forma segura, inferior à força de flexão, a fim de garantir a ruptura por cisalhamento mesmo com os reforços aplicados. As normas utilizadas definem limites de espaçamento entre as faixas aplicadas, no entanto, este limite foi ignorado para que os incrementos de força determinados fossem atingidos.

A força cortante máxima das vigas reforçadas foi considerada o maior valor encontrado a partir da somatória dos resultados obtidos de V_c de cada norma aos resultados de V_f calculados pelas normas americana e europeia, sem ultrapassar a força de flexão máxima (V_{flex}) e a resistência ao esmagamento das bielas de compressão do concreto ($V_{máx}$). É possível observar que na soma da resistência cortante do concreto obtida pela norma brasileira ao resultado de contribuição das fibras pela norma americana ($V_{c,NBR} + V_{f,ACI}$) a força cortante máxima total prevista foi

superior em relação às outras somas, e ainda inferior a V_{flex} e $V_{máx}$, portanto o cálculo da área de reforço com FRP baseou-se nas equações fornecidas por estes dois documentos normativos.

A Figura 4.24 mostra os resultados de força máxima de todas as vigas previstos com base nas normas determinadas, comparados aos resultados experimentais obtidos após os ensaios. Observa-se que o gráfico reafirma que as vigas não romperam por esmagamento do concreto ou por flexão, além disso, percebe-se a diferença relevante entre os valores de força cortante máxima experimentais e as previsões teóricas, o que se deve à característica conservadora dos documentos normativos. A partir destes resultados, determinou-se que os resultados experimentais foram superiores, em média, em 88% à soma $V_{c.ACI} + V_{f.ACI}$, em 77% à soma $V_{c.EC2} + V_{f.fib}$, em 45% à soma $V_{c.NBR} + V_{f.ACI}$, e em 72% à soma $V_{c.NBR} + V_{f.fib}$. Para todos os cálculos realizados foram utilizados resultados de resistência à compressão média do concreto, obtidos após ensaios experimentais, ao invés da resistência característica.

A Figura 4.25 mostra os resultados experimentais e teóricos da contribuição de força cortante fornecida pelos reforços, onde observa-se que as contribuições calculadas pela norma *fib* 90 (2019) alcançam no máximo 2,7 kN de incremento, e pela norma ACI 440.2R (2017) o incremento alcança até cerca de 14,3 kN. No entanto, os resultados experimentais apresentaram valores de até 35,5 kN. Nesta figura é possível visualizar que ambas as normas utilizadas demonstraram resultados conservadores e adequados para o reforço com fibras de carbono, como era previsto.

A Figura 4.26 apresenta a comparação entre os resultados de força cortante resistida pelo concreto (V_c) teóricos e experimental. O valor de V_c experimental foi adotado o mesmo valor para todas as vigas, considerado a força máxima da viga de referência de 73,04 kN. Observa-se na figura que os resultados calculados foram inferiores ao obtido experimentalmente, além disso, os cálculos realizados utilizando as normas NBR 6118 (2014) e ACI 318 (2019) foram similares, enquanto que a norma Eurocode 2 (2004) forneceu valores inferiores em comparação a elas. Desta forma, observa-se que o uso destas normas foi seguro e adequado para as vigas moldadas.

As normas de dimensionamento de reforços com FRP não foram desenvolvidas para fibras naturais, no entanto, neste estudo foram utilizadas para o dimensionamento dos reforços com fibras de juta, sem adaptações. De acordo com a Figura 4.25, pela norma americana, o nível de conservadorismo na viga JJ foi aproximado à viga C, com aumento de 181% e 152%, respectivamente, entre os

valores experimentais e teóricos, o que torna seguro o uso deste cálculo para reforços com este material. Para as viga GJGJ e JJJ, este percentual foi de 81% e 40%, respectivamente, o que também indica segurança para o uso da norma neste compósito como reforço estrutural. A viga GG apresentou incremento 18,56% inferior ao resultado teórico desta norma.

Pela norma europeia, observa-se um conservadorismo significativo e adequado para todos os materiais utilizados neste estudo, exceto o compósito JGJ, o qual obteve incremento irrelevante. Das cinco vigas que apresentaram resultados experimentais superiores aos calculado pelo *fib* 90 (2019), o menor incremento, obtido na viga GG, foi aproximadamente quatro vezes o valor teórico. Nas vigas C e JJ, este valor é de aproximadamente 14 e 15 vezes, enquanto que nas vigas GJGJ e JJJ, estes resultados são cerca de 10 e 7 vezes o valor obtido pela norma, respectivamente.

Tabela 4.6 – Valores de carregamento máximo calculados.

Força máxima (kN)	Ref. 1	Vigas					
		C	GG	JGJ	GJGJ	JJ	JJJ
V_{flex}	112,54	115,86	113,85	110,98	113,73	114,95	112,74
$V_{c.AC1}$	35,60	37,89	35,45	36,16	36,62	36,31	37,81
$V_{c.EC2}$	48,17	51,28	47,98	48,90	49,55	49,15	51,14
$V_{c.NBR}$	49,04	54,13	48,95	49,87	51,23	50,83	53,43
$V_{f.AC1}$	-	12,32	9,18	14,36	12,71	12,48	12,18
$V_{f.fib}$	-	2,24	1,67	2,70	2,33	2,26	2,27
$V_{máx.AC1}$	144,73	159,77	144,47	147,18	151,20	150,01	157,70
$V_{máx.EC2}$	289,61	319,71	289,09	294,52	302,56	300,17	315,57
$V_{máx.NBR}$	206,86	228,36	206,49	210,37	216,11	214,40	225,41
$V_{c.AC1} + V_{f.AC1}$	-	50,21	44,63	50,52	49,33	48,79	49,99
$V_{c.EC2} + V_{f.fib}$	-	53,52	49,65	51,60	51,88	51,41	53,41
$V_{c.NBR} + V_{f.AC1}$	-	66,45	58,13	64,23	63,94	63,31	65,61
$V_{c.NBR} + V_{f.fib}$	-	56,37	50,62	52,57	53,56	53,09	55,70

Fonte: Autora (2022).

Figura 4.24 – Comparação entre forças máximas experimentais e previsões teóricas.

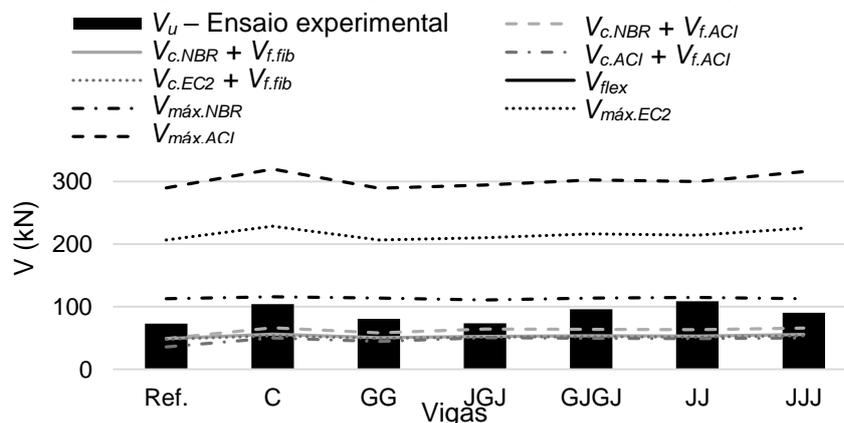
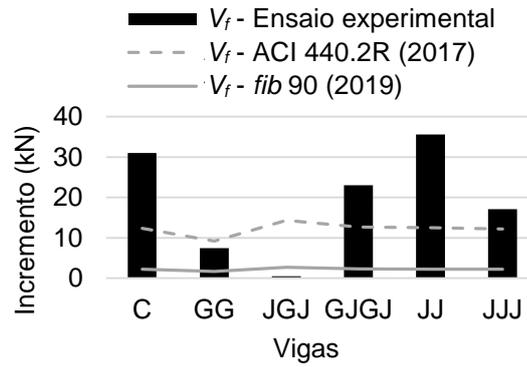
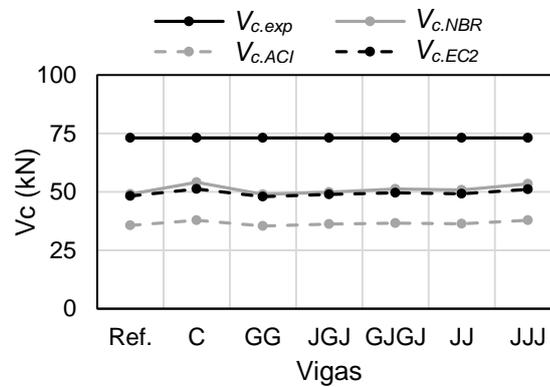


Figura 4.25 – Comparação entre incrementos experimentais e previsões teóricas.



Fonte: Autora (2022).

Figura 4.26 – Comparação entre resultados de força cortante do concreto experimentais e teóricas.



Fonte: Autora (2022)

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Nesta pesquisa foi realizada uma série de ensaios experimentais com o objetivo de avaliar o desempenho de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com FRPs com fibra de juta, fibra de carbono e fibra de vidro, utilizando a técnica *Externally Bonded Reinforcement* (EBR), para avaliar a viabilidade técnica de substituição de fibras sintéticas por fibras naturais como reforço em elementos de concreto armado. Para tanto, sete vigas de concreto armado foram moldadas, sendo uma viga de referência, sem reforço ao cisalhamento; duas vigas reforçadas com FRPs de fibras sintéticas, uma com uma camada de manta de fibra de carbono e outra com duas camadas de tecido de fibra de vidro; duas vigas reforçadas com FRP com tecido de juta, com duas e três camadas; e, por fim, duas vigas reforçadas com compósito híbrido de fibra de vidro e de juta, com três e quatro camadas.

O reforço foi aplicado em faixas ao longo do comprimento do vão de cisalhamento das vigas, envolvendo sua seção transversal em U. As peças foram submetidas ao ensaio de flexão simples de três pontos. Os resultados de deflexão, força cortante máxima, modo de falha, abertura de fissuras obtidos foram comparados e discutidos. As principais conclusões obtidas foram:

- 1 – Todas as vigas falharam por cisalhamento, com ruptura da diagonal tracionada, na região prevista. Sendo que, as vigas JJ e JJJ falharam com ruptura do FRP, enquanto que as vigas restantes tiveram sua falha atribuída ao descolamento das faixas e destacamento parcial do cobrimento do concreto;
- 2 – A viga JJ, reforçada com duas camadas de FRP com fibras naturais, apresentou acréscimo de resistência à força cortante de 48,66% em relação à viga de referência sem reforço. Resultado próximo ao apresentado pela viga C, com FRP com fibra de carbono, a qual obteve 42,43% de aumento de resistência, em relação à viga de referência;
- 3 – A viga JJ apresentou incremento cerca de duas vezes o incremento fornecido na viga JJJ, com três camadas de fibra de juta, e área de reforço similar. Este resultado pode ser justificado pela maior área de contato das faixas aplicada na viga com duas camadas do reforço;

- 4 – A viga GG, reforçada com duas camadas de vidro, obteve resultados inferiores ao esperado no que se refere ao aumento de resistência à força cortante, o qual alcançou 10,24%, o que pode ser justificado por má aderência entre a resina e a fibra neste compósito. Entretanto, foi possível observar que o aparecimento de fissuras nesta viga, assim como nas outras vigas, foi mais contido ao longo do ensaio, conforme a aplicação de força, em comparação à viga de referência;
- 5 – O controle de aparecimento de fissuras na viga JJ foi superior em relação à viga C, foi observado também nesta viga maior ductilidade pois a abertura das fissuras foi gradual sem perda de resistência enquanto mais força foi aplicada;
- 6 – O compósito com fibras naturais de juta, com duas camadas, se mostrou eficiente para o reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado;
- 7 – A viga GJGJ apresentou um resultado satisfatório com incremento de 31,51%, enquanto que a viga JGJ, de forma geral, não apresentou contribuição em relação à viga de Referência;
- 8 – A viga JGJ, apresentou a mesma força máxima apresentada pela viga de Referência, no entanto, após análise detalhada sobre as deformações das fibras, observou-se que houve uma contribuição de aproximadamente 9% atribuída ao reforço. Ainda assim, este valor foi inferior ao valores teóricos calculados pelo ACI 440.2R (2017);
- 9 – A diferença entre os resultados experimentais e os resultados teóricos de força cortante das vigas apresentaram diferença relevante, com aumentos, em média, de 45%, 72%, 77% e 88%, em relação às somatórias $V_{c.NBR} + V_{f.ACI}$, $V_{c.NBR} + V_{f.ACI}$, $V_{c.EC2} + V_{f.fib}$, $V_{c.ACI} + V_{f.ACI}$, respectivamente. Onde os valores de V_c foram calculados de acordo com as normas ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2017) e Eurocode 2 (2004), e os valores de V_f foram calculados com base nas normas ACI 440.2R (2017) e *fib* 90 (2019). A diferença observada sugere a característica conservadora por parte das normas utilizadas, e indica segurança em utilizá-las;
- 10 – Os resultados teóricos da norma ACI 440.2R (2017), direcionada à compósitos de fibras sintéticas, relativos às contribuições dos reforços, nas vigas JJ, JJJ e GJGJ, foram inferiores em 40%, 185% e 81%, respectivamente, aos resultados experimentais. Portanto, o uso desta norma é adequado para estes materiais, com nível de conservadorismo satisfatório;
- 11 – Os resultados teóricos da norma *fib* 90 (2019), relativos às contribuições dos reforços, se demonstraram conservadores e adequados para quase todos os

compósitos utilizados nesta pesquisa, exceto para o reforço da viga JGJ, com resultados experimentais de, no mínimo, quatro vezes os resultados teóricos.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

A fim de complementar os resultados e conclusões apresentados nesta pesquisa, sugere-se:

- Realizar novos ensaios utilizando reforços com fibras de juta submetidas à tratamentos químicos ou físicos;
- Realizar ensaios com os reforços aplicados utilizando *primer* para a avaliação de aderência;
- Desenvolver parâmetros próprios e adequados para reforços com fibras naturais;
- Analisar a variação de largura e espessura das faixas de FRP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-KAREEM A. H., DEBAIKY A. S., MAKHLOUF M. H., ABDEL-BASET M. Shear Strengthening Of RC Beams With FRP Using (NSM) Technique. *Advances in Research* 19(4): 1-20, 2019.
- ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. ACI 440 2R. Farmington Hills. 2017.
- ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE). Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures. ACI 440 3R. Farmington Hills. 2004.
- ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE). Building Code Requirements for Structural Concrete. ACI 318M. Farmington Hills. 2019.
- ADEL, B.; NOUREDDINE, F.; MOHCENE, B.; MESBAH, H. A. Modeling of CFRP Strengthened RC Beams Using the SNSM Technique Proposed As an Alternative to NSM and EBR Techniques. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2020. 54, 21-35.
- ALAM, MD. A.; RIYAMI, K. A. Shear Strengthening Of Reinforced Concrete Beam Using Natural Fibre Reinforced Polymer Laminates. *Construction and Building Materials* 162 (2018) 683–696.
- ALBAQAMI, M. D.; DWIVEDI, Y. D.; KRISHNAMOORTHY, N.; KUMAR, M. L.; MANJUNATHA, L. H.; CHOWDARY, CH. M.; WABAIDUR, S. M.; PRASAD, A. R.; CHIKHALE, R. V.; KUMAR, S. P. Investigation on Mechanical and Thermal Properties of a Kenaf/Jute Fiber-Reinforced Polyester Hybrid Biocomposite. *Advances in Polymer Technology*, 2022. Article ID 7408135, 6 pages.
- ALVES, C.; DIAS, A. P. S.; DIOGO, A. C.; FERRÃO, P. M. C.; LUZ, S. M.; SILVA, A. J.; REIS, L.; FREITAS, M. Eco-Composite: The Effects of The Jute Fiber Treatment on The Mechanical and Environmental Performance of The Composite Materials. *Journal of Composite Materials*. 2010; 45: 573–589.
- ARAVIND, N.; SAMANTA, A. K.; THANIKAL, J. V.; ROY, D. KR. S. An Experimental Study On The Effectiveness Of Externally Bonded Corrugated GFRP Laminates For Flexural Cracks Of RC Beams. *Construction and Building Materials* 136 348–360, 2017.
- ARCINE, M. F.; MENON, N. V. Avanços no estudo experimental e analítico de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento dom PRF – Um estudo na literatura. *Revista Principia*. 2021.
- ASHRAF, M. A.; M. ZAWWI; MEHRAN, M. T.; KANTHASAMY, R.; BAHADAR A. Jute Based Bio and Hybrid Composites and Their Applications. *Fibers* 7, 77, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. NBR 6118. Rio de Janeiro. 2014.

BAGGIO, D.; SOUDKI, K.; NOËL, M. Strengthening Of Shear Critical RC Beams With Various FRP Systems. *Construction and Building Materials* 66 (2014) 634–644.

BARROS J. A. O., DALFRÉ G. M. Assessment of the Effectiveness of the Embedded Through-Section Technique For the Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams. *Strain*, 2012; 49(1):75–93.

BELLO, C. B. C.; BOEM, I.; CECCHI, A.; GATTESCO, N.; OLIVEIRA, D. V. Experimental Tests For The Characterization Of Sisal Fiber Reinforced Cementitious Matrix For Strengthening Masonry Structures. *Construction and Building Materials* 219, 2019.

BREVEGLIERI, M.; APRILE, A.; BARROS, J. A. O. Embedded Through-Section Shear Strengthening Technique Using Steel And CFRP Bars In RC Beams Of Different Percentage Of Existing Stirrups. *Composite Structures* 126, 2015. 101–113

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. D. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de Concreto Armado. São Carlos: EdUFSCar, 2014.

CEB-FIP. *fib* Bulletin 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Lausanne. 2001.

CEB-FIP. *fib* Bulletin 90: Externally applied FRP reinforcement for concrete structures. Lausanne. 2019.

CHEN, C.; YANG, Y.; ZHOU, Y.; XUE, C.; X, CHEN; WU, H.; SUI, L.; LI, X. Comparative analysis of natural fiber reinforced polymer and carbono fiber reinforced polymer in strengthening of reinforced concrete beams. *Journal of Cleaner Production* 263 (2020) 121572.

CHEREMISINOFF, N. P.; CHEREMISINOFF; P. N. *Fiberglass Reinforced Plastics*. New Jersey: Noyes Publications, 1995.

DA SILVA, L. J.; PANZERA, T. H.; VELLOSO, V. R.; CHRISTOFORO, A. L.; SCARPA, F.. Hybrid Polymeric Composites Reinforced With Sisal Fibres And Silica Microparticles. *Composites: Part B* 43, 2012.

EDIE, D. D.; BUCKLEY, J. D. *Carbon-Carbon Materials and Composites*, 1993. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. CEN, EN 1992-1-1, Brussels, Belgium, 2004.

FIORE, V.; DI BELLA, G.; VALENZA, A. The Effect Of Alkaline Treatment On Mechanical Properties Of Kenaf Fibers And Their Epoxy Composites. *Composites Part B: Engineering*, 2015. 68, 14–21.

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Estruturas de Concreto**. Solicitações Tangenciais. São Paulo: Pini. 2008.

GOODMAN, S. H. Handbook of Thermoset Plastics. New Jersey: Noyes Publications, 1998. 2^a ed.

GUO, S.; HE, H.; LIU, C.; CHENG, S.; LIU, H. Theoretical And Experimental Study On Shearing Capacity Of Concrete Beams Reinforced With Carbon Fiber Truss. *Composite Structures* 258, 2021.

HARISH, S.; MICHAEL, D. P.; BENSELY, A.; LAL, D.M.; RAJADURAI A. Mechanical Property Evaluation of Natural Fiber Coir Composite. *Materials Characterization*, 2009. 60(1), 44-49.

HOSSAIN, MD. M.; ABDULLA, F. Jute Production in Bangladesh: A Time Series Analysis. *Journal of Mathematics and Statistics* 2015, 11 (3): 93.98 DOI: 10.3844/jmss.2015.93.98.

IMAN, M.; MAJI, T.K. Jute: An Interesting Lignocellulosic Fiber for New Generation Applications. *Lignocellul. Polym. Compos.* 2014, 3, 453–475.

ISLAM, M. S.; AHMED, S. J. Influence Of Jute Fiber On Concrete Properties. *Construction and Building Materials* 189 768–776, 2018.

JIA, Z.; LI, T.; CHIANG, F.; WANG, L. An Experimental Investigation of the Temperature Effect on the Mechanics of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites. *Composites Science and Technology* 154, 2018.

JIRAWATTANASOMKULA, T.; LIKITLERSUANGB, S.; WUTTIWANNASAKC, N.; UEDAD, T.; ZHANGE, D.; SHONOF, M. Structural Behaviour Of Pre-Damaged Reinforced Concrete Beams Strengthened With Natural Fibre Reinforced Polymer Composites. *Composite Structures* 244 (2020) 112309.

JUNQUEIRA, Flávio. Juta: da terra para a terra. **Abit Review**, São Paulo, Ed. 02, p. 15, fev. 2022.

KANDAN, A M.; RAJAKUMAR, S. A Review On Natural Fiber And Its Characteristics. *Industrial Engineering Journal*. vol. 13, issue 3, March 2020.

KARZAD, A. S.; LEBLOUBA, M.; TOUBAT, S. A.; MAALEJ, M. Repair And Strengthening Of Shear-Deficient Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer. *Composite Structures* 223, 2019.

LEÃO, A.L., CARASCHI, TAN, I.H. Curauá Fiber – A Tropical Natural From Amazon-Potential And Application In Composites. *Natural Polymers And Agrofibers Composites*, 2000. P. 257-272, São Paulo, Brasil, USP & UNESP.

LI, A.; ZHANG, J.; ZHANG, F.; LI, L.; ZHU, S.; YANG, Y. Effects Of Fiber And Matrix Properties On The Compression Strength Of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites. *New Carbon Materials*, 2020.

LI, X.; TABIL, L. G.; PANIGRAHI, S. Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review. *Journal of Environmental Polymer Degradation*. 2007, 15, 25–33.

LIMA, Amanda Camerini. **Caracterização E Propriedades de Compósitos de Tecido de Juta Reforçando Matriz de Polietileno Reciclado**. 2009. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2009.

LIU, L.; JIA, C.; HE, J.; ZHAO, F.; FAN, D.; XING, L.; WANG, M.; WANG, F.; JIANG, Z.; HUANG, Y. Interfacial Characterization, Control And Modification Of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites. *Composites Science and Technology* 121, 2015.

LIU, L.; YU, J.; CHENG, L.; YANG X. Biodegradability Of Poly(Butylene Succinate) (PBS) Composite Reinforced With Jute Fibre. *Polymer Degradation and Stability* 94 (2009) 90–94.

MOSTOFINEJAD, D.; ESFAHANI, M. R.; SHOMALI, A. Experimental And Numerical Study Of The RC Beams Shear-Strengthened With NSM Technique. *Journal of Composite Materials*, 2019.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. - “Compósitos Estruturais – Ciência e Tecnologia”, Ed. Edgar Blücher Ltda, São Paulo, 2006. 2ª edição revista e ampliada.

NIKOLOUTSOPOULOS, N.; PASSA, D.; GAVELA, S.; SOTIROPOULOU, A. Comparison of Shear Strengthening Techniques of Reinforced Concrete Beams with Carbon Fibre Reinforced Polymers (CFRPs). 1st International Conference of the Greek Society of Experimental Mechanics of Materials. *Procedia Structural Integrity* 10 141–147, 2018.

PANNEERSELVAM, T.; RAGHURAMAN, S.; KANDAVEL, T. K.; MAHALINGAM, K. Evaluation And Analysis Of Delamination During Drilling On Sisal-Glass Fibres Reinforced Polymer. *Measurement* 154, 2020.

PIRES, E. N.; MERLINI, C.; AL-QURESHI, H. A.; SALMÓRIA, G. V.; BARRA, G. M. O. Efeito Do Tratamento Alcalino De Fibras De Juta No Comportamento Mecânico De Compósitos De Matriz Epóxi. *Polímeros*, vol. 22, n. 4, p. 339-344, 2012.

RAFIQUZZAMAN, MD.; ISLAM, MD. M.; RAHMAN, MD. H.; TALUKDAR, MD. S.; HASAN, MD. N. Mechanical Property Evaluation Of Glass–Jute Fiber Reinforced Polymer Composites. *Polym. Adv. Technol.* 2016, 27 1308–1316.

RAMSEYER, C.; KANG, T. H. K. Post-Damage Repair Of Prestressed Concrete Girders. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2012. 6(3):199–207.

ROSSO, P.; YE, L.; FRIEDRICH, K.; SPRENGER S. A Toughened Epoxy Resin By Silica Nanoparticle Reinforcement. *Journal Applied Polymer Science*, 2006. 100:1849–55

SAADAH, M.; ASHTEYAT, A.; MURAD, Y. Shear Strengthening Of RC Beams Using Side Near Surface Mounted CFRP Ropes and Strips. Structures 32, 2021.

SADIQSHA, H. A. J.; PRADEEP, P. P. A Review On Natural Fibre Composites. Journal of Xidian University. Volume 14, issue 6, 2020.

SAMORA, M. S.; DOS SANTOS, A. C.; TRAUTWEIN, L. M.; MARQUES, M. G. Análise Experimental da Contribuição do Concreto na Resistência ao Cisalhamento em Vigas sem Armadura Transversal. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais. Volume 10, Number 1 (February 2017) p. 160 – 191. ISSN 1983-4195.

SANCHEZ, E. M. S.; CAVANI, C. S.; LEAL, C. V.; SANCHEZ, C. G. Compósito de Resina de Poliéster Insaturado com Bagaço de Cana-de-Açúcar: Influência do Tratamento das Fibras nas Propriedades. Polímeros, 2010. Vol. 20, nº 3, p. 194-200.

SANJAY, M. R.; MADHU, P.; JAWAID, M.; SENTHAMARAIKANNAN, P.; SENTHIL, S.; PRADEEP, S. Characterization And Properties Of Natural Fiber Polymer Composites: A Comprehensive Review. Journal of Cleaner Production 172, 2018.

SENTHILKUMAR, K.; SABA, N.; RAJINI, N.; CHANDRASEKAR, M.; JAWAID, M.; SIENGCHIN, S.; ALOTMAN O. Y. Mechanical Properties Evaluation of Sisal Fibre Reinforced Polymer Composites: A review. Construction and Building Materials, 2018.

SONG, H.; LIU, J.; HE, K.; AHMAD W. A Comprehensive Overview Of Jute Fiber Reinforced Cementitious Composites. Case Studies in Construction Materials 15 (2021) e00724.

SUDARSANA, K. Performance Of Composite Local Glass Fibre Sheets And Epoxy On Flexural Strengthening Of Reinforced Concrete Beams. MATEC Web of Conferences 195, 02002 (2018) ICRMCE 2018.

SUNDARRAJA, M. C.; RAJAMOHAN, S. Strengthening Of RC Beams In Shear Using GFRP Inclined Strips – An Experimental Study. Construction and Building Materials 23 (2009) 856–864.

VERSATILIDADE nos produtos sustentáveis da juta amazônica. **Pará Industrial**, Pará, ano 12, Ed. 72, p. 20, dez. 2020.

VIGNESHWARAN, S.; SUNDARAKANNAN, R.; JOHN, K. M.; JOHNSON, R. D. J.; PRASATH, K. A.; AJITH, S.; ARUMUGAPRABU, V.; UTHAYAKUMAR, M. Recent Advancement In The Natural Fiber Polymer Composites: A Comprehensive Review. Journal of Cleaner Production, 2020.

WANG, H.; MEMON, H.; HASSAN, E. A. M.; MIAH, MD. S.; ALI, MD. A. Effect of Jute Fiber Modification on Mechanical Properties of Jute Fiber Composite.. Materials, 2019. 12, 1226.

WIGHT, J. K.; MACGREGOR, J. G. **Reinforced Concrete Mechanics & Design**. New Jersey: Pearson. 6th edition, 2012.

ZHANG, Z.; HSU, C. T.; ASCE, F. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Laminates. *Journal Of Composites for Construction* © Asce / March/April 2005.