

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS**

**ISABELA OLIVEIRA DUARTE**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO  
COM FIBRAS SINTÉTICAS ARMADAS COM BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO  
COM FIBRA DE VIDRO E BASALTO**

**CAMPINAS**

**2022**

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM SISTEMAS DE  
INFRAESTRUTURA URBANA  
ISABELA OLIVEIRA DUARTE**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO  
COM FIBRAS SINTÉTICAS ARMADAS COM BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO  
COM FIBRA DE VIDRO E BASALTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como exigência para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientador (a): Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Nádia Cazarim da Silva Forti.

**CAMPINAS**

**2022**

Ficha catalográfica elaborada por Vanessa da Silveira CRB 8/8423  
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

620.11245 D812e	<p>Duarte, Isabela Oliveira</p> <p>Estudo do comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto com fibras sintéticas armadas com barras de polímero reforçado com fibras de vidro e basalto / Isabela Oliveira Duarte. - Campinas: PUC-Campinas, 2022.</p> <p>130 f.: il.</p> <p>Orientador: Nádia Cazarim da Silva Forti.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana ) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana , Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2022.</p> <p>Inclui bibliografia.</p> <p>1. Cisalhamento. 2. Vigas de concreto. 3. Polímeros. I. Forti, Nádia Cazarim da Silva. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana . III. Título.</p> <p>CDD - 23. ed. 620.11245</p>
--------------------	---

**ISABELA OLIVEIRA DUARTE**

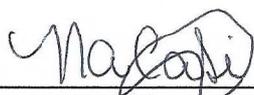
**ESTUDO DO COMPORTAMENTO AO CISALHAMENTO  
DE VIGAS DE CONCRETO COM FIBRAS SINTÉTICAS  
ARMADAS COM BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO  
COM FIBRA DE VIDRO E BASALTO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Nádia Cazarim da Silva Forti.

Dissertação defendida e aprovada em 31 de janeiro de 2022 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



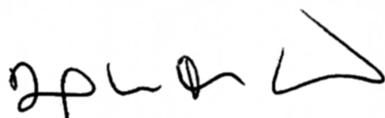
---

Profa. Dra. Nádia Cazarim da Silva Forti  
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



---

Profa. Dra. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



---

Prof. Dr. Carlos Daniel Taissum Cardoso  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RIO

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por todo apoio, cuidado e dedicação ao longo de minha trajetória. Obrigada por terem me dado a oportunidade de estudar e pelos valores e educação que definem a pessoa que sou hoje. Meu eterno agradecimento.

À minha irmã, pelo apoio, carinho e amizade que foram fundamentais para o meu crescimento.

Ao meu namorado, pelo companheirismo, suporte e por sempre me encorajar em minhas decisões.

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Nádia Cazarim da Silva Forti, minha imensa gratidão por todos os ensinamentos, paciência, e empenho ao longo dessa jornada. Expresso minha admiração e respeito em virtude da excepcional educadora e pesquisadora que mostrou ser ao longo de todos esses anos. Obrigada pela oportunidade e confiança a mim depositada.

À minha família e amigos que sempre acreditaram em meu potencial e me incentivaram a realizar meus sonhos. Agradeço especialmente às minhas amigas Michele e Jakeline, por todo o apoio e ensinamentos compartilhados ao longo desse trabalho, que tornaram essa conquista mais prazerosa.

Ao professor Dr. Marco Antonio Carnio, pela orientação, pelo empréstimo de equipamentos para a execução dos ensaios, e por tornar possível a realização desse trabalho.

À empresa Haizer Group, pelo fornecimento dos materiais para a execução da pesquisa e pela bolsa de estudos.

À Pontifícia Universidade Católica de Campinas, em especial a todos os professores que compõem o Programa de Pós-Graduação em Sistemas em Infraestrutura Urbana. Sou muito grata a todos e tenho imenso orgulho em fazer parte da história dessa instituição. Agradeço também, pela bolsa Reitoria 50% do Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu.

Aos funcionários do Laboratório de Materiais da PUC-Campinas, pelo apoio e auxílio na execução dos ensaios e desenvolvimento das atividades experimentais desse trabalho.

## RESUMO

A compreensão do comportamento mecânico das barras de polímero reforçado com fibras, assim como o desempenho em elementos estruturais, é de fundamental importância para a confiabilidade e aplicação desse novo material no mercado nacional. Deste modo, o objetivo deste trabalho foi analisar a substituição parcial e total da armadura de cisalhamento por macrofibra sintética, em vigas de concreto armado com barras longitudinais e estribos compostos pelos materiais polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) e polímero reforçado com fibra de basalto (BFRP). Em uma primeira etapa do estudo, foi realizada a caracterização do comportamento mecânico das barras de GFRP e BFRP por meio do ensaio de resistência à tração e módulo de elasticidade. Posteriormente, para cada material, foram ensaiadas 2 vigas com armadura insuficiente ao cisalhamento (com e sem macrofibras) e 2 vigas sem armadura transversal (com e sem macrofibras). Para a realização do estudo, foi utilizada macrofibra de polipropileno, no teor de 1% em volume de concreto. Pôde-se observar que a substituição total dos estribos de GFRP e BFRP por macrofibras de polipropileno no teor de 1% em volume de concreto não foi suficiente para mudar o modo de ruptura frágil por cisalhamento. Porém, a adição de fibra de polipropileno em conjunto com os estribos, com espaçamento excessivo, proporcionou a mudança do modo de ruptura frágil por cisalhamento para ruptura pseudo-dúctil de flexão por esmagamento do concreto, indicando a eficiência das fibras em substituir parte dos estribos de FRP.

**Palavras-chave:** Barras de GFRP. Barras de BFRP. Comportamento ao cisalhamento. Concreto com fibra.

## ABSTRACT

Understanding the mechanical behavior of fiber reinforced polymer bars, and its performance in structural elements is of fundamental importance for the reliability and use of this new material in the national market. The objective of this work is to assess the partial replacement of shear stirrups by adding synthetic macrofibers to the concrete mixture. The work focus on reinforced concrete beams with longitudinal bars and stirrups made of polymeric bars. Glass fiber reinforced polymer (GFRP) and basalt fiber reinforced polymer (BFRP) are addressed. In a first stage of the study, the characterization of the mechanical behavior of the GFRP and BFRP bars was carried out by means of tensile strength and Young's modulus. Subsequently, for each material, 2 beams with insufficient shear reinforcement (with and without fiber) and 2 beams without transverse reinforcement (with and without fiber) were tested. To carry out the study, polypropylene macrofiber was used, with a content of 1% by volume of concrete. From the results, it could be observed that the total replacement of GFRP and BFRP stirrups by polypropylene macrofibers at a content of 1% by volume of concrete was not enough to change the brittle failure mode by shear. However, the addition of polypropylene fiber with the stirrups, with excessive spacing, provided the change from the brittle failure mode by shear to pseudo-ductile flexural failure by crushing the concrete, indicating the efficiency of the fibers to replace part of the stirrups. of FRP.

**Keywords:** GFRP bars. BFRP bars. Shear behavior. Fiber reinforced concrete.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vigas armadas com barras de GFRP - Ponte para pedestres. ....	21
Figura 2. Tabuleiros armados com tela rígida de GFRP - Ponte para pedestres.....	21
Figura 3. Ponte para pedestres já finalizada. ....	22
Figura 4. Processo de produção das barras de FRP utilizando a técnica de pultrusão. .....	28
Figura 5. Barras de GFRP disponíveis no mercado. ....	29
Figura 6. Distribuição de tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz imediatamente após a fissura quando o descolamento ocorre antes (a) e após (b) a abertura de fissura. ....	35
Figura 7. Comportamento de softening e hardening do CRF sob tração direta. ....	36
Figura 8. Mecanismos de transferência de força cortante em vigas com armadura transversal: efeito de pino da armadura longitudinal ( $V_d$ ); engrenamento dos agregados ( $V_{ay}$ ); e banzo de concreto comprimido ( $V_{cz}$ ). ....	39
Figura 9. Ruptura da viga por rompimento do banzo comprimido de concreto. ....	41
Figura 10. Ruptura da viga por rompimento dos estribos.....	42
Figura 11. Ruptura das diagonais comprimidas no caso de armadura longitudinal e transversal reforçadas.....	42
Figura 12. Ruptura por flexão localizada da armadura longitudinal.....	43
Figura 13. Ruptura por falha da ancoragem.....	43
Figura 14. Geometria e detalhamento das armaduras (medidas em mm). ....	44
Figura 15. Configurações das vigas: (a) seção transversal; (b) elevação.....	47
Figura 16. Esquema do ensaio de flexão a três pontos. ....	49
Figura 17. Detalhes dos corpos de prova e esquema do ensaio.....	52
Figura 18. Configurações na ruptura de vigas submetidas à flexão.....	59
Figura 19. Etapas da pesquisa.....	66
Figura 20. Macrofibra de polipropileno KraTos Macro.....	69
Figura 21. Esquema do ensaio de tração por flexão (ABNT NBR 16940).....	71
Figura 22. Resina epóxi utilizada como preenchimento dos tubos metálicos e a presença de vazios no interior do tubo.....	74
Figura 23. Argamassa expansiva utilizada para preenchimento dos tubos metálicos. .....	75
Figura 24. Dimensões do corpo de prova para o ensaio de resistência à tração de barras de FRP.....	75

Figura 25. Aparato utilizado no processo de confecção dos corpos de prova a serem utilizados no ensaio de tração. ....	76
Figura 26. Posicionamento do corpo de prova e do extensômetro para a realização do ensaio de resistência à tração. ....	77
Figura 27. Ruptura da barra fora da região de ancoragem para validação do ensaio de resistência à tração. ....	77
Figura 28. Nomenclatura das vigas. ....	78
Figura 29. Detalhamento da armadura sem estribos de FRP. ....	80
Figura 30. Detalhamento da armadura com estribos de GFRP e BFRP. ....	81
Figura 31. Armaduras das vigas. ....	81
Figura 32. Extensômetro aplicado na armadura longitudinal. ....	82
Figura 33. Região já lixada para aplicação do extensômetro. ....	82
Figura 34. Extensômetro fixado na barra. ....	82
Figura 35. Extensômetros conectados ao cabo de leitura. ....	83
Figura 36. Sistema de aquisição de dados Quantum X (DAQ), HBM. ....	83
Figura 37. Esquema do ensaio de flexão a quatro pontos. ....	84
Figura 38. Método empregado para a cura das vigas. ....	84
Figura 39. Posicionamento dos equipamentos para aplicação da técnica CID. ....	86
Figura 40. Resultado do ensaio de consistência para os concretos Concreto <sub>GFRP-SF</sub> e Concreto <sub>GFRP-CF</sub> . ....	91
Figura 41. Resultado do ensaio de consistência para os concretos Concreto <sub>BFRP-SF</sub> e Concreto <sub>BFRP-CF</sub> . ....	91
Figura 42. Seção transversal CP01 Concreto <sub>GFRP</sub> . ....	95
Figura 43. Seção transversal CP02 Concreto <sub>GFRP</sub> . ....	95
Figura 44. Seção transversal CP02 Concreto <sub>BFRP</sub> . ....	95
Figura 45. Seção transversal CP04 Concreto <sub>BFRP</sub> . ....	96
Figura 46. Modo de ruptura da viga GFRP-SF-SE. ....	97
Figura 47. Modo de ruptura da viga BFRP-SF-SE. ....	97
Figura 48. Modo de ruptura da viga GFRP-SF-CE. ....	98
Figura 49. Ruptura do estribo. ....	98
Figura 50. Modo de ruptura da viga BFRP-SF-CE. ....	98
Figura 51. Ruptura do estribo. ....	99
Figura 52. Modo de ruptura da viga GFRP-CF-SE. ....	99
Figura 53. Modo de ruptura da viga BFRP-CF-SE. ....	99

Figura 54. Modo de ruptura da viga GFRP-CF-CE. ....	100
Figura 55. Modo de ruptura da viga BFRP-CF-CE.....	100
Figura 56. Comparação dos modos de ruptura das vigas armadas com barras de GFRP .....	101
Figura 57. Comparação dos modos de ruptura das vigas armadas com barras de BFRP.....	101
Figura 58. Leitura de abertura de fissura por meio da técnica de correlação de imagem digital (CID).....	107

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Diagrama Tensão-Deformação à tração das fibras utilizadas como reforço em FRP: a) carbono (alto módulo de elasticidade); b) carbono (alta resistência); c) aramida; d) vidro-S; e) vidro-E; f) basalto.....	25
Gráfico 2. Representação das tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz....	35
Gráfico 3. Carga x Deformação da armadura longitudinal de GFRP.....	45
Gráfico 4. Carga x Flecha das vigas ensaiadas. ....	46
Gráfico 5. Carga x Deformação da armadura longitudinal de BFRP. ....	48
Gráfico 6. Carga x Flecha das vigas ensaiadas. ....	48
Gráfico 7. Ensaio de resistência à tração na flexão (limites de proporcionalidade e residuais).....	50
Gráfico 8. Resultado do ensaio de resistência à flexão em três pontos. ....	50
Gráfico 9. Curvas de carga <i>versus</i> flecha. ....	52
Gráfico 10. Fator de redução de resistência em função da taxa de armadura. ....	55
Gráfico 11. Curva granulométrica da brita.....	67
Gráfico 12. Curva granulométrica da areia.....	67
Gráfico 13. Comparação entre as curvas de tensão <i>versus</i> deformação referentes ao ensaio de resistência à tração das barras de GFRP, para diferentes diâmetros. ....	88
Gráfico 14. Comparação entre as curvas de tensão <i>versus</i> deformação referentes ao ensaio de resistência à tração das barras de BFRP, para diferentes diâmetros.....	88
Gráfico 15. Resultado do ensaio de resistência à tração por flexão do ConcretoGFRP-CF.....	93
Gráfico 16. Resultado do ensaio de resistência à tração por flexão do ConcretoBFRP-CF. ....	94
Gráfico 17. Carga x Flecha das vigas armadas com GFRP.....	102
Gráfico 18. Carga x Flecha das vigas armadas com BFRP. ....	102
Gráfico 19. Curvas experimentais de carga de cisalhamento normalizada x deslocamento das vigas sem estribos.....	104
Gráfico 20. Curvas experimentais de carga de cisalhamento normalizada x deslocamento das vigas com estribos.....	104
Gráfico 21. Carga x Deformação específica da armadura longitudinal das vigas de GFRP. ....	105
Gráfico 22. Carga x Deformação específica da armadura longitudinal das vigas de BFRP.....	106

Gráfico 23. Gráfico Carga cortante x Abertura de fissura para as vigas armadas com barras de GFRP. ....	107
Gráfico 24. Gráfico Carga cortante x Abertura de fissura para as vigas armadas com barras de GFRP. ....	108
Gráfico 25. Curvas experimentais e analíticas de Carga x Flecha para as vigas armadas com GFRP. ....	112
Gráfico 26. Curvas experimentais e analíticas de Carga x Flecha para as vigas armadas com BFRP. ....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades físicas e mecânicas de fibras empregadas em compósitos de FRP.....	26
Tabela 2. Propriedades físicas e mecânicas de resinas termorrígidas .....	28
Tabela 3. Massa específica $\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ ) de barras de FRP. ....	30
Tabela 4. Coeficiente de dilatação térmica $\alpha_f$ ( $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) de barras de FRP. ....	30
Tabela 5. Propriedades físicas e mecânicas de fibras utilizadas como reforço discreto.....	33
Tabela 6. Detalhe das configurações das vigas.....	44
Tabela 7. Matriz de ensaio para as vigas armadas com BFRP.....	47
Tabela 8. Detalhes do programa experimental.....	49
Tabela 9. Teores de fibras utilizados.....	51
Tabela 10. Propriedades das fibras.....	52
Tabela 11. Coeficiente ambiental de redução para diferentes tipos de fibras e condições de exposição. ....	54
Tabela 12. Espessura mínima recomendada de lajes unidirecionais e vigas. ....	57
Tabela 13. Coeficientes de redução de resistência $\gamma_m$ para barras de FRP.....	60
Tabela 14. Fator de redução ambiental $C_E$ . ....	60
Tabela 15. Propriedades dos agregados analisadas. ....	66
Tabela 16. Propriedades do aditivo superplastificante.....	68
Tabela 17. Propriedades da macrofibra KraTos Macro fornecidas pelo fabricante. ...	69
Tabela 18. Dosagem dos concretos com e sem adição de fibra.....	70
Tabela 19. Relação de corpos de prova produzidos para cada ensaio, para o concreto com e sem adição de fibra, em um dia de moldagem. ....	70
Tabela 20. Propriedades das barras de GFRP e BFRP fornecidas pelo fabricante. .	72
Tabela 21. Resultado do ensaio de diâmetro efetivo das barras de GFRP e BFRP. 73	
Tabela 22. Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de resistência à tração das barras de FRP. ....	75
Tabela 23. Dimensionamento das vigas de acordo com a ACI 440.1R-15 e Prática Recomendada (2021).....	79
Tabela 24. Resultado do ensaio de resistência à tração das barras de GFRP e BFRP.....	89

Tabela 25. Resultado do ensaio de módulo de elasticidade para as barras de GFRP e BFRP.....	89
Tabela 26. Resultado ensaio de consistência. ....	90
Tabela 27. Resultados dos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração na flexão dos concretos.....	92
Tabela 28. Resultado do ensaio de resistência à tração na flexão. ....	93
Tabela 29. Resultados dos ensaios com vigas armadas com barras de GFRP e BFRP.....	96
Tabela 30. Resultados de resistência ao cisalhamento normalizada.....	103
Tabela 31. Comparação dos resultados experimentais e do cálculo de cortante resistente de acordo com a ACI 440.1R-15 e a norma ABNT NBR 16935 (2021). .	109
Tabela 32. Comparação dos resultados experimentais e do cálculo de cortante resistente de acordo com a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) e a norma ABNT NBR 16935 (2021).....	110
Tabela 33. Comparação dos resultados experimentais e dimensionamentos de acordo com a ACI 440.1R-15 e Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021). .	110
Tabela A1. Propriedades dos materiais. ....	122

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	18
1.1.	Justificativa.....	20
1.2.	Objetivos.....	22
1.2.1.	Objetivo específico.....	22
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1.	Barras de polímeros reforçados com fibras (FRP).....	24
2.1.1.	Breve histórico.....	24
2.1.2.	Propriedades das fibras contínuas.....	25
2.1.3.	Propriedades das matrizes poliméricas.....	27
2.1.4.	Processo de produção das barras de FRP.....	28
2.1.5.	Classificação geométrica das barras de FRP.....	29
2.1.6.	Propriedades físicas e mecânicas das barras de FRP.....	29
2.1.6.1.	Propriedades físicas das barras de FRP.....	29
2.1.6.2.	Propriedades mecânicas das barras de FRP.....	30
2.1.7.	Durabilidade das barras de FRP.....	31
2.2.	Concreto reforçado com fibras descontínuas.....	32
2.2.1.	O compósito e a interação fibra-matriz.....	34
2.2.2.	Concreto reforçado com fibras de polipropileno.....	36
2.3.	Mecanismos básicos de transferência de força cortante.....	38
2.3.1.	Efeito de pino da armadura longitudinal de tração.....	39
2.3.2.	Engrenamento dos agregados.....	39
2.3.3.	Resistência à tração residual do concreto.....	40
2.3.4.	Concreto comprimido não fissurado.....	40
2.4.	Formas de ruptura por força cortante de vigas submetidas à flexão.....	40

2.5. Estudos realizados sobre a utilização de barras de FRP em estruturas de concreto .....	43
2.6. Estudos sobre a utilização de fibras descontínuas na matriz de concreto como substituição à armadura de cisalhamento de estruturas armadas com FRP .....	49
2.7. Dimensionamento de vigas armadas com barras de FRP de acordo com a norma ACI 440.1R-15 .....	53
2.7.1. Dimensionamento à flexão .....	53
2.7.2. Dimensionamento ao cisalhamento .....	56
2.7.3. Flecha .....	57
2.8. Dimensionamento de vigas armadas com barras de FRP de acordo com a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) .....	58
2.8.1. Dimensionamento à flexão .....	58
2.8.2. Dimensionamento ao cisalhamento .....	61
2.8.3. ELS de Deformação excessiva .....	62
2.9. Dimensionamento no estado limite último de elementos lineares com CRF sujeitos à força cortante – ABNT NBR 16935 (2021) .....	63
2.9.1. Elementos lineares com CRF, com armadura longitudinal e sem armadura transversal .....	63
2.9.2. Elementos lineares com CRF, com armadura longitudinal e com armadura transversal .....	63
2.9.3. Armadura mínima de cisalhamento .....	64
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	65
3.1. Caracterização dos materiais .....	66
3.1.1. Caracterização dos agregados graúdo e miúdo .....	66
3.1.2. Cimento .....	68
3.1.3. Aditivo .....	68
3.1.4. Fibras descontínuas .....	68
3.2. Caracterização do concreto com e sem fibra .....	69
3.2.1. Ensaio de resistência à tração por flexão (ABNT NBR 16940) .....	71

3.3.	Caracterização das barras de GFRP e BFRP .....	71
3.3.1.	Ensaio de resistência à tração .....	72
3.4.	Substituição parcial e total da armadura de cisalhamento por fibra em vigas de concreto armado com barras de GFRP e BFRP .....	78
3.4.1.	Correlação de imagem digital .....	85
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	87
4.1.	Caracterização das barras de GFRP e BFRP .....	87
4.1.1.	Resistência à tração .....	87
4.1.2.	Módulo de elasticidade .....	89
4.2.	Caracterização do concreto .....	90
4.2.1.	Consistência pelo abatimento de tronco de cone (ABNT NBR 16889).....	90
4.2.2.	Resistência à compressão (ABNT NBR 5739), Módulo de elasticidade (ABNT NBR 8522) e Resistência à tração por flexão (ABNT NBR 12142).....	91
4.2.3.	Resistência à tração por flexão (ABNT NBR 16940) .....	92
4.3.	Flexão a quatro pontos de vigas de concreto armado com barras de GFRP e BFRP.....	96
4.4.	Comparação entre resultados teóricos e experimentais.....	109
5.	CONCLUSÕES.....	113
5.1.	Sugestões para trabalhos futuros .....	115
	REFERÊNCIAS .....	116
	APÊNDICE A .....	122
A.1.	Dimensionamento de acordo com a ACI 440.1R-15.....	122
A.1.1.	Dimensionamento à flexão das vigas armadas com barras de GFRP .....	122
A.1.2.	Dimensionamento ao cisalhamento das vigas armadas com barras de GFRP .. .....	123
A.1.3.	Dimensionamento à flexão das vigas armadas com barras de BFRP .....	124
A.1.4.	Dimensionamento ao cisalhamento das vigas armadas com barras de BFRP... .....	125

A.2. Dimensionamento de acordo com a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).....	126
A.2.1. Dimensionamento à flexão das vigas armadas com barras de GFRP .....	127
A.2.2. Dimensionamento ao cisalhamento das vigas armadas com barras de GFRP .. .....	128
A.2.3. Dimensionamento à flexão das vigas armadas com barras de BFRP .....	129
A.2.4. Dimensionamento ao cisalhamento das vigas armadas com barras de BFRP... .....	130

## 1. INTRODUÇÃO

A durabilidade de estruturas de concreto armado é uma grande preocupação para a infraestrutura. Construções de concreto armado expostas a ambientes marinhos e degelos requerem altos gastos em manutenções profundas para minimizar o efeito da corrosão na armadura de aço (Tavares, 2006).

Como Torres (2010) apresenta em seu trabalho, diversos levantamentos a respeito de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado realizados ao redor do mundo (MEHTA, 1993; STEWART *et al.*, 1998) e também no Brasil (CARMONA e MAREGA, 1988; DAL MOLIN, 1988; ARANHA, 1994; NINCE, 1996; ANDRADE, 1997) apontam que a corrosão de armaduras de aço é um dos mecanismos de deterioração mais frequentes do concreto, com índices de ocorrência variando de 27% a 64%, que afetam de modo direto e indireto a durabilidade das estruturas.

Pela perspectiva econômica, os custos de manutenção devido à corrosão de estruturas são bastante significativos. Estudos realizados em 2021 estimam que o Canadá, por exemplo, gasta aproximadamente 51,9 bilhões de dólares anualmente em manutenção (AMPP, 2021).

Recentemente, as barras de polímero reforçado com fibra (FRP) têm sido utilizadas como novo material de reforço para estruturas de concreto, substituindo a armadura tradicional (CAI *et al.*, 2017). Dentre suas principais características destacam-se a alta relação resistência/peso, baixa condutividade térmica e o fato de não sofrerem corrosão. Além disso, pelo fato de serem constituídas por fibras não condutoras e apresentarem bom isolamento elétrico e magnético, fornecido pelas resinas que as revestem, as barras de FRP se destacam em locais sujeitos a ação de campos magnéticos, como hospitais ou qualquer ambiente que possua aparelhos elétricos sensíveis (REIS, 2009).

Com relação aos materiais compósitos de FRP, sua composição consiste em fibras envolvidas em uma matriz polimérica. As fibras, que possuem a forma de filamentos contínuos, apresentam alta resistência à tração, baixa densidade e exibem comportamento frágil. As fibras mais utilizadas nos compósitos de FRP para a construção civil são de vidro, aramida, carbono, e mais recentemente, fibras de basalto (MICALI, 2010).

As fibras de basalto, que são produzidas a partir do derretimento da rocha vulcânica, apresentam boas propriedades de resistência e estabilidade, rigidez, durabilidade, resistência a altas temperaturas, resistência a ácidos e solventes e baixa absorção de água. Elas também não apresentam reação tóxica com o ar ou com a água, não são suscetíveis a possível liberação de partículas perigosas para a saúde humana, e também são caracterizadas por altos níveis de ecocompatibilidade e reciclagem, sendo assim, um material inorgânico verde e de alto desempenho (Monaldo *et al.*, 2019).

As barras poliméricas reforçadas com fibras de vidro apresentam baixo módulo de elasticidade, alta resistência à tração, baixa resistência ao cisalhamento e comportamento elástico-linear até a ruptura, sem patamar de escoamento definido. Esse comportamento faz com que as flechas e fissuras numa viga reforçada com essas barras sejam maiores que as vigas de concreto com armadura de aço. Por isso, o dimensionamento de vigas utilizando fibra de vidro geralmente é governado pelo Estado Limite de Serviço (PAWŁOWSKI & SZUMIGAŁA, 2015).

Em geral, devido ao baixo módulo de elasticidade das barras de FRP, elementos de concreto armado com barras longitudinais de FRP apresentam fissuras com maiores aberturas e profundidade do que estruturas armadas com aço. As fissuras com maior comprimento diminuem a contribuição do concreto na resistência ao cisalhamento, enquanto que as fissuras com maiores aberturas diminuem as contribuições de intertravamento dos agregados e tensões residuais de tração. A adição de fibras descontínuas para aumentar a capacidade de cisalhamento e ductilidade do concreto é uma alternativa utilizada em estruturas armadas com barras de FRP (AWADALLAH *et al.*, 2014).

Este trabalho propõe analisar, por meio de ensaios experimentais, a substituição parcial e total da armadura de cisalhamento por fibra sintética, em vigas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP) e polímero reforçado com fibras de basalto (BFRP). A adição de macrofibras sintéticas à matriz cimentícia tem o intuito de diminuir a fissuração no concreto, além de colaborar na resistência ao cisalhamento.

## 1.1. Justificativa

Atualmente, o setor da construção civil é reconhecido como uma das principais atividades para o desenvolvimento econômico e social de um país. Entretanto, ainda se apresenta como um grande gerador de impactos ambientais. Com o aumento do adensamento das cidades, e como consequência, o crescimento das atividades no setor da construção, a geração de resíduos da construção e demolição atingiu índices alarmantes, devido aos desperdícios nas obras de construções, reformas e demolições. Esses resíduos representam cerca de 20% a 30% da quantidade de resíduos sólidos gerado pelas cidades de países desenvolvidos, sendo que nos demais países pode alcançar índices ainda maiores (BRASILEIRO & MATOS, 2015).

Para que haja desenvolvimento sustentável, é necessário que se produza maior quantidade de bens com o menor consumo de recursos naturais e causando menos poluição, de modo que o desenvolvimento econômico seja desvinculado da geração de impactos ambientais. Para que ocorra essa desvinculação, deve-se reduzir o consumo de matérias primas, que pode ser alcançado pela reciclagem dos resíduos, e pela substituição dos materiais tradicionais por outros mais eficientes, que aumentem a durabilidade das construções (BRASILEIRO & MATOS, 2015).

Em função dos problemas relacionados à degradação das estruturas de concreto, das necessidades do mercado e das exigências de sustentabilidade no setor da Construção Civil, a busca em desenvolver estruturas de concreto armado com maior durabilidade e extensão da vida útil tem aumentado. Nesse contexto, a utilização de armadura não metálica se mostra uma boa alternativa para se obter estruturas mais duráveis em determinados cenários de utilização.

Países como EUA, Canadá, Japão, Rússia, Inglaterra e Egito já possuem normas de dimensionamento de estruturas de concreto com armadura não metálica, que proporcionam maior aplicação desse material em suas construções. O Brasil ainda não possui uma norma que aborde o assunto, contudo, recentemente foi publicada a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) que trata do dimensionamento de estruturas de concreto armado com barras de FRP. Essa publicação em conjunto com os diversos estudos que estão sendo realizados no território brasileiro contribui para a inserção desse material no mercado, já que o concreto armado é utilizado de forma majoritária nas construções do país.

Embora a utilização das barras de FRP em elementos de concreto ainda não seja normatizada no Brasil, o material já está sendo empregado em diversas construções. Um exemplo de aplicação das barras de FRP foi a construção de uma ponte para pedestres pré-moldada, na ilha de Piaçaguera, na cidade de Paranaguá, Paraná. Para a armadura das vigas foram utilizadas barras longitudinais e estribos de GFRP (Figura 1). Já o tabuleiro da ponte é composto por peças que apresentam encaixe macho-fêmea, armadas com tela rígida de GFRP (Figura 2). A ponte já finalizada é apresentada na Figura 3 (HAIZER GROUP, 2019).

**Figura 1.** Vigas armadas com barras de GFRP - Ponte para pedestres.



Fonte: Haizer Group (2019).

**Figura 2.** Tabuleiros armados com tela rígida de GFRP - Ponte para pedestres.



Fonte: Haizer Group (2019).

**Figura 3.** Ponte para pedestres já finalizada.



Fonte: Haizer Group (2019)

## **1.2. Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo analisar a substituição parcial e total da armadura de cisalhamento por macrofibra sintética, em vigas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) e polímero reforçado com fibra de basalto (BFRP), submetidas à flexão no ensaio a quatro pontos.

### **1.2.1. Objetivo específico**

Os objetivos específicos dessa pesquisa são:

- Avaliar o comportamento mecânico das barras de Polímero Reforçado com Fibras de Vidro (GFRP) e Polímero Reforçado com Fibras de Basalto (BFRP);
- Analisar o comportamento da aderência entre barras não metálicas e o concreto;
- Avaliar a substituição parcial e total da armadura de cisalhamento por macrofibra sintética, por meio do ensaio de flexão a quatro pontos em vigas de concreto armado com barras de GFRP e BFRP;

- Avaliar a concordância dos resultados experimentais com os dimensionamentos realizados pela norma ACI 440.1R-15, Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) e ABNT NBR 16935 (2021).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Barras de polímeros reforçados com fibras (FRP)

As barras de polímero reforçado com fibras (FRP) são compostas por fibras contínuas, que possuem alta resistência e rigidez, impregnadas com resina polimérica, que apresenta baixo módulo de elasticidade. Nos compósitos de FRP, as fibras são responsáveis por determinar a resistência e rigidez do material na direção das fibras (FIB, 2007).

#### 2.1.1. Breve histórico

O desenvolvimento do reforço de FRP ocorreu particularmente após a Segunda Guerra Mundial. Nos EUA, a indústria aeroespacial, há tempo, já havia analisado as vantagens referentes à alta resistência e baixa massa específica do material compósito, e durante a Guerra Fria, os avanços na indústria aeroespacial de defesa aumentaram o seu uso. Mas somente em 1960 passou-se a considerar a associação desses materiais no concreto como reforço (ACI 440.1R-15).

O mercado dos anos 80, na América do Norte, demandava reforço não metálico prioritariamente em obras de hospitais, em que se mostrava necessária a utilização de materiais não-condutores magnéticos, viabilizando assim, o uso das barras de FRP nessas construções.

Devido às suas vantagens, especialmente sua resistência à corrosão e alta durabilidade, as barras de FRP passaram a ser utilizadas também em quebra-mares, subestações de bases de reatores, pistas de aeroportos, e laboratórios eletrônicos (BROWN e BARTHOLOMEW, 1996\* *apud* ACI 440.1R-15).

Até meados dos anos 90, os japoneses possuíam a maioria das aplicações de barras de FRP em estruturas, com mais de cem demonstrações ou projetos comerciais. No ano de 1997, a Sociedade de Engenheiros Civis Japoneses (JSCE) incluiu em suas recomendações de projeto e construção de estruturas a utilização de armaduras de FRP (YE *et al.*, 2003 *apud* ACI 440 1R, 2015).

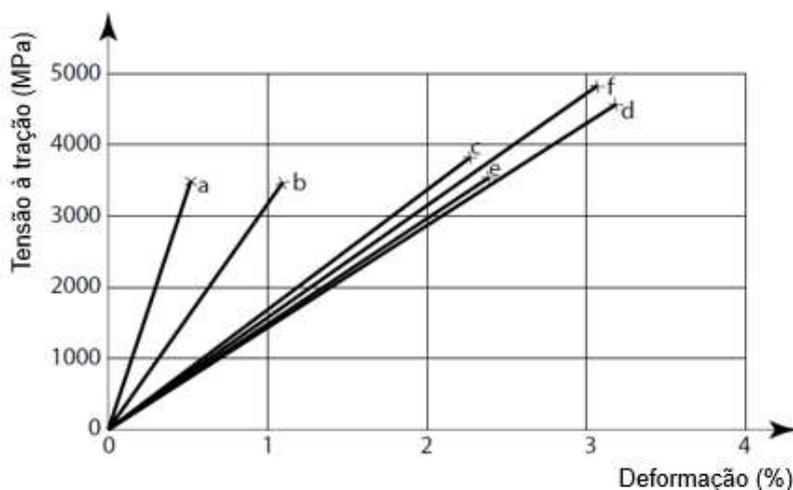
Na Europa, o uso das barras de FRP teve início na Alemanha com a construção de uma ponte rodoviária com barras de FRP protendidas, no ano de 1986. Desde a construção da ponte, estudos têm sido realizados sobre o aumento da implementação

das barras de FRP nas construções por toda a extensão da Europa (MEIER, 1992 *apud* ACI 440.1R-15).

### 2.1.2. Propriedades das fibras contínuas

As fibras são empregadas nas barras poliméricas devido à sua elevada resistência, rigidez e baixa densidade. Além disso, para que as fibras promovam um bom desempenho estrutural às barras, elas devem apresentar os seguintes requisitos: alto módulo de elasticidade para um eficiente reforço, alta capacidade resistente e alongamento quando submetidas à tração, pequena variação da resistência entre os filamentos, estabilidade das propriedades ao longo da fabricação e utilização, uniformidade da superfície e diâmetro das fibras, alta tenacidade, durabilidade, capacidade de adequação a diferentes formas e custo aceitável (FIB, 2007). As fibras mais comumente utilizadas na produção de barras de FRP são fibras de vidro, carbono, aramida, e mais recentemente as fibras de basalto. Todas essas fibras exibem comportamento elástico linear até a ruptura quando submetidas à tração, conforme mostra o Gráfico 1 (FIB, 2007). A Tabela 1 apresenta diferentes tipos de fibras e suas principais propriedades.

**Gráfico 1.** Diagrama Tensão-Deformação à tração das fibras utilizadas como reforço em FRP: a) carbono (alto módulo de elasticidade); b) carbono (alta resistência); c) aramida; d) vidro-S; e) vidro-E; f) basalto.



Fonte: FIB (2007).

**Tabela 1.** Propriedades físicas e mecânicas de fibras empregadas em compósitos de FRP.

Tipo de fibra	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação última (%)	Coef. de expansão térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	Coef. de Poisson
Vidro-E	2500	3450	72,4	2,4	5	0,22
Vidro-S	2500	4580	85,5	3,3	2,9	0,22
Vidro-AR	2270	1800-3500	70-76	2,0-3,0	-	-
Basalto	2800	4840	89	3,1	8	-
Aramida	1440	3620	124	2,2	-0,2 longitudinal 59 radial	0,35
Carbono	1750	3500	240	1,1	-0,6 a -0,2	0,20

Fonte: FIB (2007)

As fibras de vidro são as mais utilizadas como reforço em compósitos de FRP, devido às suas propriedades mecânicas e baixo custo. Os tipos mais comuns de fibra de vidro são as fibras de vidro-E, vidro-S e vidro álcali-resistente (AR). As fibras de vidro-S possuem maior resistência à tração e módulo de elasticidade em relação às fibras de vidro-E, porém, devido ao maior custo, são menos utilizadas. As fibras AR apresentam resistência ao meio alcalino e têm sido utilizadas com sucesso nas matrizes de concreto à base de cimento Portland. A resistência ao meio alcalino é obtida por meio da adição de zircônia ao vidro, quanto maior o teor de zircônia, maior a resistência ao ataque de álcalis (FIB, 2007 e MEHTA e MONTEIRO, 1994)

As fibras de basalto são compostas por rochas vulcânicas derretidas, que apresentam propriedades físicas e mecânicas superiores às fibras de vidro, além de um custo bastante inferior às fibras de carbono. Suas principais propriedades são: resistência ao fogo, alta capacidade de isolamento acústico e resistência a ambientes quimicamente ativos. Devido à alta temperatura de fusão (1450°C), o basalto é um material indicado para aplicações que demandam resistência ao fogo (FIB, 2007).

As fibras de aramida possuem menor densidade e maior relação resistência- peso quando comparadas às demais fibras utilizadas em compósitos de FRPs, contudo são mais suscetíveis à radiação ultravioleta. Com relação às fibras de carbono, possuem elevada resistência à tração e módulo de elasticidade, apresentam propriedades mecânicas estáveis com o aumento da temperatura, além de possuírem alta resistência a ambientes agressivos. Porém, o alto custo do material se mostra um

fator determinante sobre sua menor utilização em relação às demais fibras disponíveis no mercado.

### **2.1.3. Propriedades das matrizes poliméricas**

As matrizes poliméricas possuem função estrutural e de proteção nos compósitos de FRP. Normalmente, representam por volta de 30 a 60% do volume de um compósito polimérico, e são responsáveis por manter as fibras unidas e protegidas da exposição ao ambiente, além de transferir e distribuir o carregamento para os filamentos.

Existem duas classes de matrizes poliméricas utilizadas em compósitos de FRP: resinas termorrígidas e resinas termoplásticas. As resinas termorrígidas são caracterizadas por apresentarem forte ligação molecular, e após serem curadas, apresentam uma estrutura irreversível. Se aquecidas após o processo de cura, não sofrem derretimento e mantêm suas estruturas até que sejam decompostas em alta temperatura. Já as resinas termoplásticas, são polímeros capazes de se tornarem flexíveis com o aquecimento, podendo ser amolecidos e endurecidos repetidamente quando submetidos a ciclo de temperatura. Na construção civil, as resinas termorrígidas são mais utilizadas nas barras de FRP por apresentarem melhor estabilidade térmica, além de exibirem maior resistência à fluência, quando comparadas às resinas termoplásticas (SINGH, 2014).

Os principais polímeros termorrígidos utilizados como matriz em compósitos de FRP são: o epóxi, o poliéster e o vinil éster. As resinas epóxis possuem como principais vantagens as elevadas propriedades mecânicas, fácil produção, baixo encolhimento durante a cura, que permite melhor aderência com os mais variados tipos de fibras. Também possuem alta resistência à corrosão e são menos afetadas pela água e pelo aumento de temperatura do que outras matrizes poliméricas. Já as resinas de poliéster apresentam como vantagens a baixa viscosidade, rápido tempo de cura e alta resistência à corrosão, porém quando utilizadas em combinação com fibras de vidro podem apresentar redução da resistência à corrosão. As resinas vinil éster possuem propriedades similares às resinas poliéster, como a baixa viscosidade e rápida cura, assim como às resinas epóxis, como a alta resistência química e resistência à tração. Possuem boa adesão às fibras de vidro, que as tornam as resinas

mais utilizadas com esse tipo de fibra. A Tabela 2 apresenta as principais propriedades físicas e mecânicas das resinas termorrígidas.

**Tabela 2.** Propriedades físicas e mecânicas de resinas termorrígidas

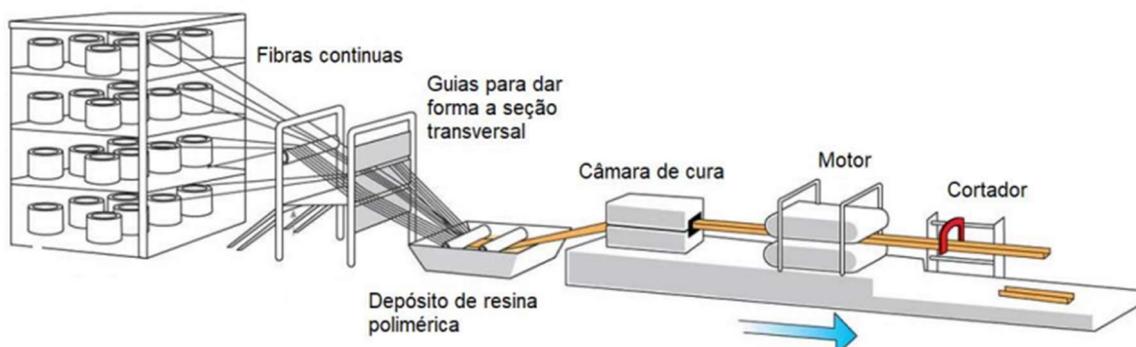
Propriedades	Poliéster	Epóxi	Vinil éster
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1200-1400	1200-1400	1150-1350
Resistência à tração (MPa)	34,5-104	55-130	73-81
Módulo longitudinal (GPa)	2,1-3,45	2,75-4,10	3,0-3,5
Coefficiente de Poisson	0,35-0,39	0,38-0,40	0,36-0,39
Coefficiente de expansão térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	55-100	45-65	50-75

Fonte: FIB (2007)

#### 2.1.4. Processo de produção das barras de FRP

O processo mais comumente utilizado na produção de barras de FRP é o de pultrusão (Figura 4). Este processo consiste em alongar os filamentos de fibra, passando-os por um banho de impregnação de resina e, em seguida são encaminhados para uma matriz de moldagem onde é definida a conformação superficial das barras, e posteriormente a resina é curada e as barras são cortadas. Apesar do alto investimento inicial, o elevado volume de barras produzido por meio do processo de pultrusão possibilita o menor custo do produto final. Como desvantagem, esse processo não fornece flexibilidade para a elaboração de formas variadas, sendo mais utilizado na produção contínua de formas simples, com seção transversal constante (YOU *et al.*, 2015).

**Figura 4.** Processo de produção das barras de FRP utilizando a técnica de pultrusão.



Fonte: Sá (2018).

### 2.1.5. Classificação geométrica das barras de FRP

De acordo com a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), os materiais de reforço para as barras de FRP disponíveis no mercado são feitos de fibras contínuas de aramida (AFRP), fibras de carbono (CFRP), fibras de vidro (GFRP) ou fibra de basalto (BFRP), impregnadas em uma matriz de resina. Os produtos de FRP comumente encontrados são telas, barras, malhas e cordoalhas. As barras possuem várias formas de seções transversais, como quadradas, redondas, maciças e vazadas. Exemplos de barras de FRP são apresentadas na Figura 5.

**Figura 5.** Barras de GFRP disponíveis no mercado.



Fonte: ACI 440.1R-15.

Há uma grande variedade dos processos de fabricação das barras de FRP, de modo que cada um obtém uma conformação superficial distinta. As características físicas da superfície das barras de FRP são de grande importância para a aderência mecânica com o concreto. Existem diferentes conformações superficiais como: o revestimento de areia, nervuras compostas por um feixe de fibras enroladas helicoidalmente à barra e barras revestidas por fibras longitudinais trançadas externamente ao seu eixo (ACI 440.1R-15).

### 2.1.6. Propriedades físicas e mecânicas das barras de FRP

#### 2.1.6.1. Propriedades físicas das barras de FRP

A massa específica das barras depende do tipo de fibra e polímero utilizados, assim como da fração volumétrica de fibras. A Tabela 3 apresenta valores usuais dessa propriedade física, de acordo com a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021). Devido ao peso inferior das barras de FRP, se comparadas às barras

metálicas, há uma redução no custo de transporte e também pode facilitar o manuseio das barras no local da construção.

**Tabela 3.** Massa específica  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) de barras de FRP.

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
AFRP	1400
BFRP	2400
CFRP	1700
GFRP	2200

Fonte: Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

O coeficiente de dilatação térmica das barras de FRP varia nas direções longitudinal e transversal dependendo do tipo de fibra, da resina empregada e da fração volumétrica de fibra. O coeficiente longitudinal de dilatação térmica depende das propriedades das fibras, enquanto que o coeficiente transversal depende da resina utilizada (BANK, 1993 *apud* ACI 440.1R-15).

A Tabela 4 apresenta os coeficientes de expansão térmica nas direções longitudinal e transversal, de acordo com a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

**Tabela 4.** Coeficiente de dilatação térmica  $\alpha_f$  ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) de barras de FRP.

Material	Direção	$\alpha_f$ ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
AFRP	Longitudinal	-4,0
	Transversal	70
BFRP	Longitudinal	8,0
	Transversal	22
CFRP	Longitudinal	-4,5
	Transversal	90
GFRP	Longitudinal	8,0
	Transversal	22

Fonte: Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

#### 2.1.6.2. Propriedades mecânicas das barras de FRP

Com relação ao comportamento à tração, os principais fatores que influenciam nas propriedades à tração das barras de FRP (resistência e módulo de elasticidade)

dizem respeito às propriedades dos constituintes, a fração de volume de fibra, distribuição, interações físicas e químicas, métodos de fabricação e controle de qualidade (Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2021).

Quando submetidas à tração, as barras de FRP não apresentam nenhum comportamento plástico e rompem sem aviso, o que caracteriza o comportamento elástico-linear até a ruptura.

Diferentemente do aço, a resistência à tração de uma barra de FRP pode variar com o diâmetro. Na ACI 440.1R-15 é apresentado um exemplo que mostra que barras de GFRP de três diferentes fabricantes mostram reduções na resistência à tração de até 40% à medida que o diâmetro aumenta de 9,5 a 22,2 mm. Isto ocorre devido ao aumento da área de interface entre as fibras e a resina com o aumento da seção transversal da barra.

Sobre o comportamento à compressão, embora não seja recomendado considerar a resistência à compressão das barras de FRP, estudos mostraram que o seu valor é bastante inferior à resistência à tração. O modo de falha para barras de FRP sujeitas à compressão longitudinal podem incluir falha de tração transversal, microfissuras das fibras ou falha por cisalhamento (ACI 440.1R-15).

Grande parte dos compósitos de barra de FRP são relativamente fracos quando submetidos ao cisalhamento interlaminar, em que as camadas de resina não reforçadas ficam entre camadas de fibras. No cisalhamento interlaminar, a resistência é governada pela matriz polimérica, que apresenta menor resistência se comparada às fibras. Quando as fibras são orientadas em uma direção fora do eixo entre as camadas de fibras, tendem a aumentar a resistência ao cisalhamento (ACI 440.1R-15).

### **2.1.7. Durabilidade das barras de FRP**

As barras de FRP apresentam limitações quando expostas a ambiente com a presença de água, raios ultravioleta, temperatura elevada, soluções alcalinas, ácidas e salinas. Essas exposições podem acarretar perda de resistência à tração e aderência com o concreto. Para que seja garantido o desempenho das barras de FRP em estruturas de concreto armado ao longo da vida útil do elemento, as propriedades dos componentes matriz, fibra e interface matriz/fibra devem ser mantidos.

A exposição das barras de FRP aos raios ultravioleta e umidade prévia à utilização como reforço de concreto, pode afetar a resistência à tração das barras. Isso ocorre devido à degradação dos constituintes do polímero, sendo observada em todos os tipos de resina. Quando utilizadas práticas construtivas adequadas, que impedem o contato das barras com a umidade e raios solares antes da utilização, e também aditivos para resinas, esse problema pode ser significativamente mitigado (ACI 440.1R-15).

Com relação à exposição ao fogo, o desempenho das barras de FRP é afetado quando as barras são submetidas a temperaturas próximas à de transição vítrea da resina, que começa a se decompor e se torna incapaz de transferir as tensões do concreto para as fibras, por conta da perda de aderência com o concreto. As fibras ainda podem resistir aos esforços se a ligação adequada for fornecida nas zonas não expostas ao fogo. O colapso do elemento ocorre no momento em que a temperatura das fibras atinge sua temperatura crítica. Assim, o comportamento das barras de FRP em relação ao fogo depende do tipo de fibra empregada, tipo de matriz, diâmetro da barra, fração volumétrica de fibra, processo de produção e tratamento da superfície da barra (Nanni, 2014).

Quando expostas a ambientes alcalinos, como é o caso da matriz cimentícia, as fibras podem sofrer ataques alcalinos que afetam suas propriedades mecânicas. A função das resinas é proteger as fibras, evitando o contato das mesmas com o concreto. A proteção das fibras de maneira efetiva é obtida com a proteção superficial contínua por parte da matriz, pois no caso de um ponto de falha, o ataque dos álcalis é capaz de percorrer o comprimento da fibra, agindo de forma integral na barra. Por isso, é de extrema importância que as extremidades das barras de FRP sejam revestidas com resina polimérica (FIB, 2007).

## **2.2. Concreto reforçado com fibras descontínuas**

O concreto reforçado com fibra (CRF) é um compósito cuja constituição é dividida em duas fases, o concreto (matriz) e as fibras (reforço). As fibras são elementos descontínuos, cujo comprimento é bem maior que a maior dimensão da seção transversal.

O uso de fibras para reforçar materiais é uma técnica milenar. Desde a antiguidade os povos costumavam usar crinas de cavalo, palhas e outras fibras

vegetais para reforço do adobe e outros materiais construtivos, pois essas fibras aumentavam a vida útil da edificação e melhoravam a trabalhabilidade desses materiais (FIGUEIREDO, 2011). Atualmente, existe uma variedade de fibras utilizadas na engenharia, como as fibras convencionais de aço, vidro, carbono e aramida, fibras de baixo módulo artificiais (polipropileno e náilon) e naturais (sisal, juta e celulose). A Tabela 5 apresenta algumas propriedades de diferentes fibras.

**Tabela 5.** Propriedades físicas e mecânicas de fibras utilizadas como reforço discreto.

Fibra	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Massa específica ( $\text{g/cm}^3$ )	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)
Aço	5 - 500	7,84	200	500 – 2000
Vidro	9 – 15	2,60	70 – 80	2000 – 4000
Polipropileno	20 – 400	0,90 – 0,95	3,5 – 10	450 – 760
Aramida	10 – 12	1,44	63 – 120	2300 – 3500
Carbono	8 – 9	1,60 – 1,70	230 – 380	2500 – 4000
Náilon	23 – 400	1,14	4,1 – 5,2	750 – 1000
Celulose	-	1,20	10	300 - 500
Acrílico	18	1,18	14 – 19,5	400 - 1000
Polietileno	25 – 1000	0,92 – 0,96	5	80 – 600
Madeira	-	1,50	71	900
Sisal	10 - 50	1,50	-	800
Matriz de cimento (para comparação)	-	1,5 - 2,5	10 - 45	3 - 7

Fonte: Bentur e Mindess (2007) - Adaptado.

No concreto armado, as barras contínuas de reforço são colocadas em locais determinados para resistir às tensões de tração e cisalhamento impostas, o que gera um aumento da capacidade de carga do concreto. As fibras, por outro lado, são descontínuas e, ao serem distribuídas aleatoriamente na matriz cimentícia, promovem maior eficiência no controle de abertura e da propagação das fissuras. Elas atuam como ponte de transferência de tensões através da fissura, diminuindo sua velocidade de propagação e assim há uma manutenção de carregamento de tração mesmo após a primeira fissura.

Por esta razão, existem aplicações em que o reforço de fibras é a melhor opção em relação às barras convencionais, como por exemplo, componentes de chapa fina, em que as barras convencionais não podem ser utilizadas, e assim as fibras

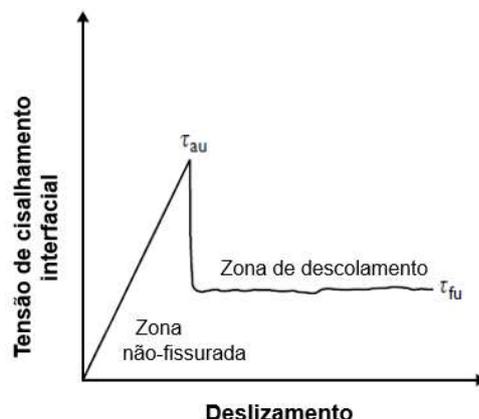
constituem o reforço primário. Nessas aplicações são utilizados altos teores de fibras, que normalmente excedem 5% em volume de concreto, tendo como função aumentar a resistência e tenacidade do compósito, sendo assim, considerado concreto reforçado com fibra (CRF) de alto desempenho. As fibras também são empregadas em componentes que devem suportar cargas ou deformações localmente altas, como revestimento de túneis, estruturas resistentes às explosões ou estacas pré-moldadas que devem ser inseridas no solo. Já o compósito CRF convencional possui a função principal de controlar as fissuras, que podem ser induzidas por variações de umidade ou temperatura, e assim promover ductilidade pós-fissuração, como em lajes e pavimentos. Nessas aplicações, as fibras são chamadas de reforço secundário (BENTUR; MINDESS, 2007).

### **2.2.1. O compósito e a interação fibra-matriz**

De acordo com Bentur e Mindess (2007), o processo de transferência de tensões pode ser dividido em duas fases, sendo uma fase anterior à fissuração da matriz e uma outra após a fissuração. O efeito da adição das fibras é particularmente maior na segunda fase. A eficiência das fibras em melhorar o desempenho mecânico frágil da matriz cimentícia depende principalmente das interações fibra-matriz. Dentre as interações, destacam-se: adesão física e química, atrito, ancoragem mecânica induzida por deformações na superfície da fibra ou pela geometria das fibras. Antes do aparecimento da primeira fissura, o mecanismo de transferência elástico é o dominante, e os deslocamentos longitudinais na interface da fibra e da matriz são geometricamente compatíveis.

Quando são alcançados estágios mais avançados de carregamento, o atrito se torna o principal mecanismo de transferência de tensões. Nessa condição, ocorrem deslocamentos relativos entre a fibra e a matriz. A transição da transferência elástica para a transferência por atrito ocorre quando as tensões de cisalhamento interfacial, por conta do carregamento, excedem a tensão cisalhante de aderência última ( $\tau_{au}$ ) fibra-matriz. Após o início de deslocamento entre a fibra e a matriz, a máxima tensão tangencial de atrito que pode ocorrer na interface é denominada  $\tau_{fu}$  (Gráfico 2).

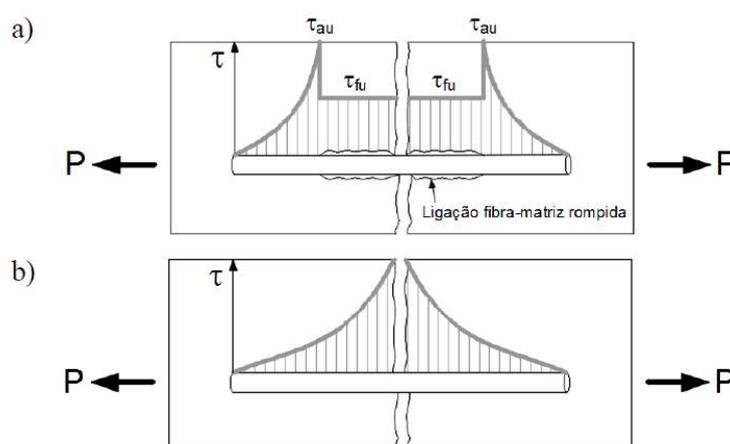
**Gráfico 2.** Representação das tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz.



Fonte: Castoldi (2018).

Casos em que o descolamento da fibra ocorre anteriormente ao início de fissuração da matriz, pode ocorrer um efeito combinado de ambos os mecanismos. Isso ocorre quando a tensão de cisalhamento na interface excede a tensão de aderência cisalhante última, ocorrendo a perda da aderência antes do aparecimento de fissura na matriz. Com relação aos compósitos em que a matriz possui baixa resistência, a fissuração pode ocorrer antes da degradação da aderência. A Figura 6 apresenta a distribuição de tensão cisalhante na interface imediatamente após a fissuração, quando o deslocamento ocorre antes (a) e após (b) a fissuração. Além dos mecanismos de transferência de tensões por aderência química/física e atrito, certas fibras podem apresentar ancoragem mecânica resultantes de deformações na sua superfície (CASTOLDI, 2018).

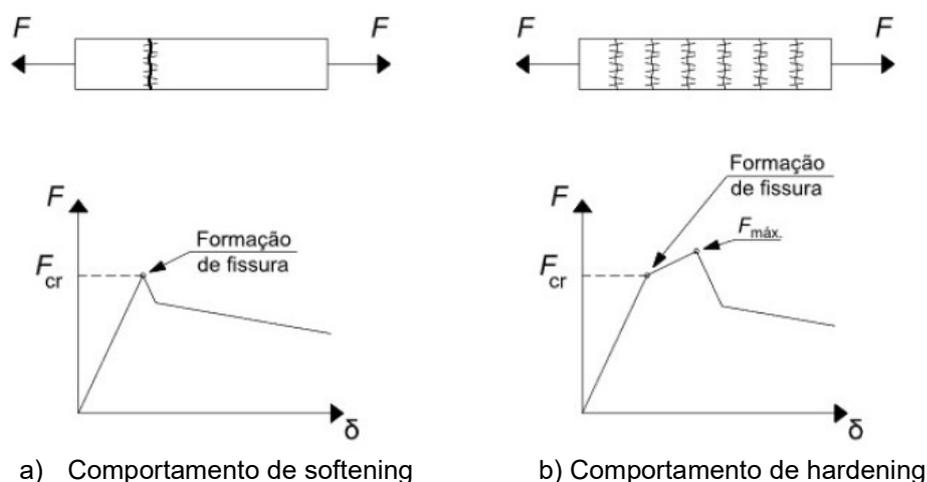
**Figura 6.** Distribuição de tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz imediatamente após a fissura quando o descolamento ocorre antes (a) e após (b) a abertura de fissura.



Fonte: Castoldi (2018).

As propriedades mecânicas das matrizes cimentícias são modificadas quando fibras descontínuas são adicionadas. Contudo, propriedades elásticas e de compressão não são significativamente afetadas, exceto quando são inseridos altos teores de fibras. Além disso, dependendo do tipo e do teor de fibra adicionada, e das propriedades da matriz cimentícia, após a fissuração da matriz de concreto ( $F_{cr}$ ), a curva de força *versus* deslocamento do CRF pode assumir comportamento *softening* (a) ou *hardening* (b). No caso do comportamento *softening* as deformações se concentram em uma única fissura, e por uma redução gradual dos valores de força abaixo da força  $F_{cr}$ , proporcionando apenas ganho de deformação. Enquanto no comportamento *hardening* ocorre o aumento inicial dos valores de força ( $F$ ) com a formação de múltiplas fissuras antes de se atingir a força máxima ( $F_{máx}$ ) (Figura 7). Independentemente do comportamento, o compósito passa a ter uma resistência residual mais expressiva após a ruptura (ABNT NBR 16935, 2021).

**Figura 7.** Comportamento de softening e hardening do CRF sob tração direta.



Fonte: ABNT NBR 16935 (2021).

### 2.2.2. Concreto reforçado com fibras de polipropileno

As fibras de polipropileno são um tipo de fibra sintética polimérica obtida da polimerização do propileno. Dentre suas vantagens, destacam-se o baixo peso, ótima relação custo-benefício, alta tenacidade, resistência à corrosão, boa estabilidade térmica e alta estabilidade no ambiente alcalino. Além disso, por apresentarem superfície hidrofóbica (ou seja, não absorve água), não interfere na reação de hidratação do concreto. No entanto, a fibra de polipropileno apresenta propriedades mecânicas inferiores, quando comparadas às fibras de aço, vidro, aramida e carbono,

baixa aderência química com a matriz e sensibilidade ao sol e ao oxigênio (HU e MA, 2021; LIU, WANG, KAO e SUN, 2021)

Existem dois tipos de fibra de polipropileno, as microfibras e as macrofibras. De acordo com a ABNT NBR 16942 (2021), elas são classificadas em função do seu diâmetro: microfibras pertencem à classe I, de diâmetro menor do que 0,30 mm, enquanto que as macrofibras fazem parte da classe II, com diâmetro igual ou superior a 0,30 mm. Cada uma delas exerce uma função no concreto, de modo que as macrofibras são chamadas de fibras estruturais devido à possibilidade de serem utilizadas como alternativa à armadura convencional de aço. O comprimento das macrofibras varia de 30 a 50 mm, enquanto que as microfibras são inferiores a 30 mm e possuem como principal função reduzir a retração plástica do concreto e a formação de fissuras, dessa forma elas aumentam a durabilidade e prolongam a vida útil das estruturas que as empregam.

Diversos estudos foram realizados a fim de analisar o efeito das fibras no comportamento mecânico do concreto. No trabalho desenvolvido por Khan *et al.* (2015), foram avaliados diferentes teores de macrofibra polimérica inseridos nos concretos de classe C25 e C30. Os teores foram de 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0%, 2,5% e 3,0% em volume de concreto. Os resultados indicaram que para o concreto de classe C25, todas as adições promoveram aumento de resistência à compressão, porém, a adição de 1,0% obteve o maior aumento, de 12,15%, enquanto a adição de 3,0% apresentou menor variação, de 1,52% em relação ao concreto de referência. Para o concreto de classe C30, os teores de 0,5% a 1,5% de adição de fibras aumentaram em até 10,48% a resistência à compressão do concreto, porém, para os teores superiores a 1,5% observou-se uma queda de resistência de até 6,51% para a adição de 3,0% de macrofibra de polipropileno. Com relação à resistência à tração, os concretos de classe C25 apresentaram um aumento de até 2,81% com a adição de 0,5% a 1,0%, e um decréscimo de até 5,94 % para a adição de 3,0%. Para o concreto de classe C30, o maior aumento de resistência, de 9,63%, foi observado para a adição de 1,0%, enquanto que a maior queda de resistência, de 26,91%, foi observada com a adição de 3,0%. Com base nos resultados, pôde-se observar que a adição de 1,0% de macrofibras de polipropileno apresentou maiores contribuições em relação à resistência à compressão e tração, quando comparada às demais.

A pesquisa feita por Altalabani *et. al* (2020) indicou que as adições de 0,44% e 0,66% de macrofibra de polipropileno diminuíram em 2,7% e 6,4% a resistência à compressão do concreto, respectivamente, e indicando assim, uma possível falha na homogeneização dos materiais constituintes. Enquanto que para o módulo de elasticidade, foi observado um aumento de 1,31% e 0,94%, indicando que a adição das fibras não afetou de maneira significativa o módulo de elasticidade do concreto. Com relação à resistência à tração, a adição de fibras diminuiu em 6,42% e 8,26% a resistência do concreto. Os resultados do ensaio de resistência residual à tração indicaram que os concretos reforçados com teores de 0,44% e 0,66% apresentaram uma queda de 67,4% e 58,9%, respectivamente, em relação à resistência após a primeira fissura, enquanto que o concreto sem fibra reduziu em 100%, mostrando que a adição das fibras promoveu maior ductilidade ao concreto. A partir dos resultados, pôde-se observar que a adição de 0,44% e 0,66% de macrofibra de polipropileno não afetou de forma significativa a resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos, porém, observou-se um aumento bastante expressivo na resistência residual à tração, que proporcionou maior ductilidade ao concreto.

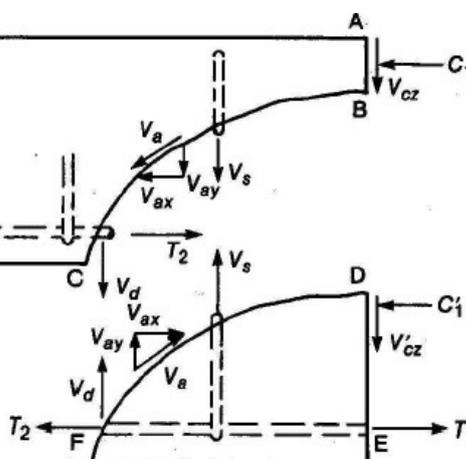
### **2.3. Mecanismos básicos de transferência de força cortante**

Os diversos mecanismos responsáveis pela transferência da força cortante são difíceis de serem medidos, pois após o aparecimento das fissuras inclinadas, a redistribuição de tensões ocorre de forma complexa. Além dos estribos, destacam-se quatro principais mecanismos: efeito de pino da armadura longitudinal ( $V_d$ ), engrenamento dos agregados ( $V_{ay}$ ), resistência residual do concreto e concreto comprimido não fissurado (banzo de concreto comprimido -  $V_{cz}$ ). Três desses mecanismos são apresentados na Figura 8 (BASTOS, 2021).

Em função da flexibilidade das armaduras longitudinal e transversal de FRP, as parcelas de força cortante transferidas por engrenamento dos agregados e efeito de pino são menores (Prática Recomendada IBRACON/ABECE, 2021).

As propriedades mecânicas de resistência à compressão e tração do concreto possuem grande influência na resistência à força cortante de vigas de concreto armado, e por isso, existe a possibilidade de uma ruptura frágil da estrutura, o que aumenta a necessidade de cuidados ao realizar o correto dimensionamento das vigas à força cortante.

**Figura 8.** Mecanismos de transferência de força cortante em vigas com armadura transversal: efeito de pino da armadura longitudinal ( $V_d$ ); engrenamento dos agregados ( $V_{ay}$ ); e banzo de concreto comprimido ( $V_{cz}$ ).



Fonte: Bastos (2021).

### 2.3.1. Efeito de pino da armadura longitudinal de tração

O efeito de pino apresentado pela armadura longitudinal diz respeito à capacidade de restringir deslocamento relativo entre faces de fissura na direção paralela aos planos dessas faces (RESENDE, 2020).

A força cortante a ser transferida pelo efeito de pino depende de alguns parâmetros, como a quantidade de armadura longitudinal, diâmetro da barra, espaçamento entre barras, espessura do cobrimento de concreto na parte inferior à barra, propriedades do concreto, tensões axiais na armadura e a existência da armadura transversal que impeça o deslocamento da barra longitudinal (BASTOS, 2021).

De acordo com Vintzeleou & Tassios (1986), para cobrimentos de armadura superiores a 7 vezes o diâmetro da armadura longitudinal, o efeito de pino é governado pelo escoamento da armadura longitudinal e esmagamento do concreto sob essa armadura. Enquanto que, para cobrimentos menores, como é o caso de vigas de concreto armado, onde não há presença de estribos, a capacidade resistente ao cisalhamento é limitada pela resistência à tração do concreto do cobrimento da armadura que, ao atingir a máxima resistência, apresenta fendilhamento.

### 2.3.2. Engrenamento dos agregados

Mesmo após o aparecimento de fissura inclinada no concreto, a rugosidade e engrenamento dos agregados em conjunto com a matriz de concreto proporcionam

transferência de força cortante através da abertura de fissura. A ação mecânica das partículas que sobressaem em uma face da fissura e reagem às partículas da face oposta impede o deslizamento entre as faces (RESENDE, 2020).

A largura de fissura e tamanho dos agregados são fatores que influenciam nesse mecanismo, de modo que quanto maior abertura de fissura e menor tamanho dos agregados, a resistência tende a diminuir. Com relação ao concreto, utilização de concretos com maiores resistências tende a diminuir a transferência de força cortante, por conta de apresentarem superfícies menos rugosas. Além disso, o uso de estribos de pequeno diâmetro e espaçamentos menores entre eles, favorece o engrenamento dos agregados (BASTOS, 2021).

### **2.3.3. Resistência à tração residual do concreto**

O mecanismo de resistência à tração residual do concreto diz respeito à capacidade residual do concreto de transmitir tensões de tração no estado fissurado até uma determinada abertura de fissura. Quando o concreto é solicitado às tensões de tração superiores à sua resistente, surgem as fissuras. À medida que essas fissuras aumentam, a transferência de tensões no concreto é reduzida, até o momento em que o limite de abertura de fissura é atingido, e a capacidade resistente se torna nula. Deste modo, a capacidade do concreto em contribuir para a transferência de força cortante é maior quando a abertura da fissura ainda é pequena (entre 0,05 e 0,15 mm) (BASTOS, 2021).

### **2.3.4. Concreto comprimido não fissurado**

A região não fissurada do concreto comprimido pela flexão (banzo comprimido) proporciona uma parcela de resistência ao cisalhamento. Essa contribuição depende principalmente da altura da zona comprimida, de modo que em vigas retangulares de altura reduzida, e sem força axial de compressão, apresentam menor contribuição do concreto comprimido na resistência às forças de cisalhamento (BASTOS, 2021).

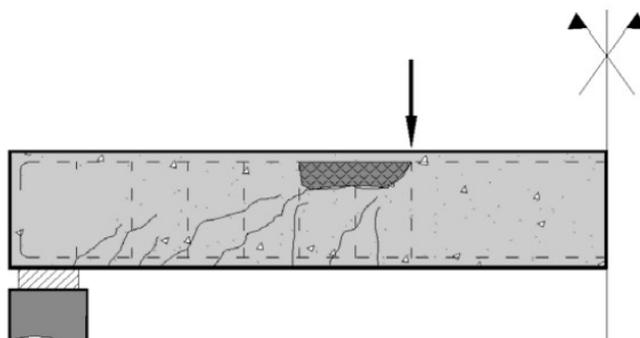
## **2.4. Formas de ruptura por força cortante de vigas submetidas à flexão**

Quando as tensões principais de tração inclinadas atingem a resistência à tração do concreto, começam a surgir as primeiras fissuras de cisalhamento. Após o surgimento das fissuras, ocorre uma redistribuição dos esforços internos, de maneira que a armadura transversal e as diagonais comprimidas passam a ser mais

solicitadas. Essa redistribuição de esforços depende do número e direção dos estribos, o que acarreta diferentes tipos de ruptura por força cortante (BASTOS, 2021; PINHEIRO, 2007).

No caso de a armadura transversal ser insuficiente, o aço atinge a deformação de início de escoamento, e as fissuras de cisalhamento caminham em direção ao banzo comprimido. Durante este estágio, o elemento ainda possui uma certa resistência fornecida principalmente pelo engrenamento dos agregados. Porém, com o aumento da abertura das fissuras, o atrito entre as faces do concreto diminui, o que ocasiona o aumento de tensões transferidas pelo concreto do banzo comprimido e aumenta a solicitação da armadura longitudinal por meio da ação de pino. Quando a fissura de cisalhamento alcança o banzo comprimido e diminui a seção resistente de concreto, pode ocorrer a ruptura brusca do concreto. Além disso, a fissura pode prolongar-se até a armadura longitudinal, separando-a do restante da viga. Nesse caso, ocorre a ruptura por força cortante-flexão, como mostra a Figura 9 (BASTOS, 2021; PINHEIRO, 2007).

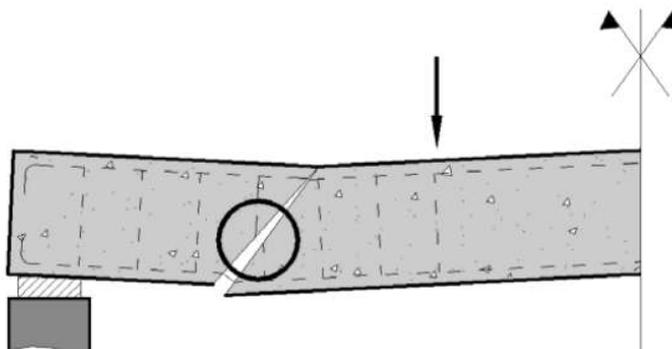
**Figura 9.** Ruptura da viga por rompimento do banzo comprimido de concreto.



Fonte: Pinheiro (2007).

Outra possibilidade de ruptura é o rompimento ou a deformação excessiva dos estribos, antes da ruptura do banzo comprimido, nesse caso a ruptura ocorre por força cortante-tração (Figura 10).

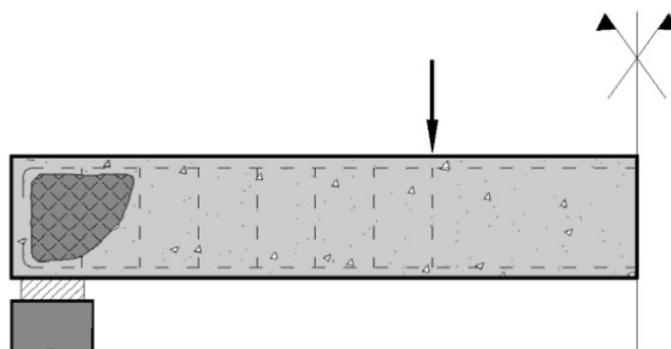
**Figura 10.** Ruptura da viga por rompimento dos estribos.



Fonte: Pinheiro (2007).

No caso de seções muito pequenas quando comparadas às solicitações atuantes, as tensões principais de compressão podem alcançar valores bastante altos, e caso sejam superiores à resistência à compressão do concreto e tração perpendicular, ocorre a ruptura da estrutura por esmagamento do concreto (Figura 11).

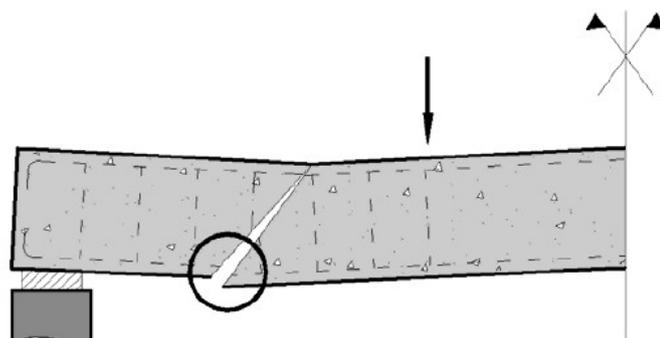
**Figura 11.** Ruptura das diagonais comprimidas no caso de armadura longitudinal e transversal reforçadas.



Fonte: Pinheiro (2007).

Em decorrência da deformação exagerada da armadura transversal, podem ocorrer grandes aberturas de fissuras de cisalhamento. Por isso, o deslocamento excessivo das seções pode gerar a flexão localizada da armadura longitudinal, levando a viga a uma ruína que também deriva do cisalhamento (Figura 12) (BASTOS, 2021; PINHEIRO, 2007).

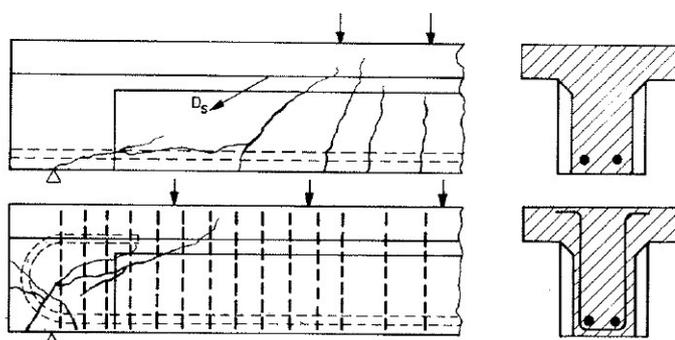
**Figura 12.** Ruptura por flexão localizada da armadura longitudinal.



Fonte: Pinheiro (2007).

A armadura longitudinal é bastante solicitada no apoio, devido ao efeito de arco. Casos em que a ancoragem é insuficiente, pode ocorrer a ruptura na região de junção da diagonal comprimida próxima ao apoio com o banzo tracionado, caracterizando a ruptura por falha da ancoragem no apoio, conforme mostra a Figura 13 (LEONHARDT & MONNING, 1982).

**Figura 13.** Ruptura por falha da ancoragem.

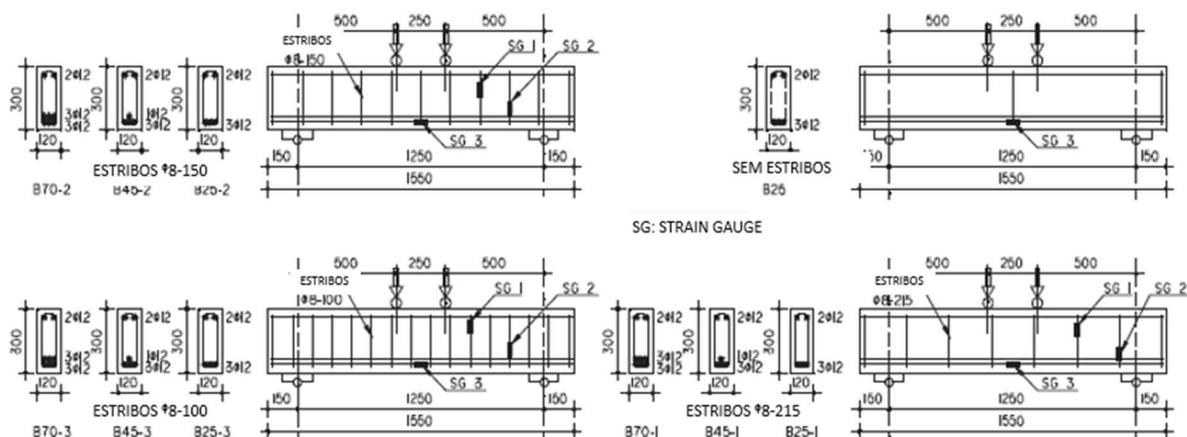


Fonte: Leonhardt & Monning (1982).

## 2.5. Estudos realizados sobre a utilização de barras de FRP em estruturas de concreto

O trabalho desenvolvido por Said *et al.* (2016) apresenta um estudo analítico e experimental do comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armadas com barras e estribos de GFRP. No total, foram ensaiadas dez vigas com dimensões de 120 mm de largura, 300 mm de altura e 1550 mm de comprimento, submetidas à flexão no ensaio a quatro pontos. O estudo consistiu em analisar o efeito de diferentes resistências de concreto (25, 45 e 70 MPa) para diferentes espaçamentos de estribos (8 mm de diâmetro espaçados 215 mm, 150 mm e 100 mm). A Figura 14 e a Tabela 6 apresentam o detalhamento das armaduras adotadas.

**Figura 14.** Geometria e detalhamento das armaduras (medidas em mm).



Fonte: Said *et al.* - Adaptado (2016).

**Tabela 6.** Detalhe das configurações das vigas.

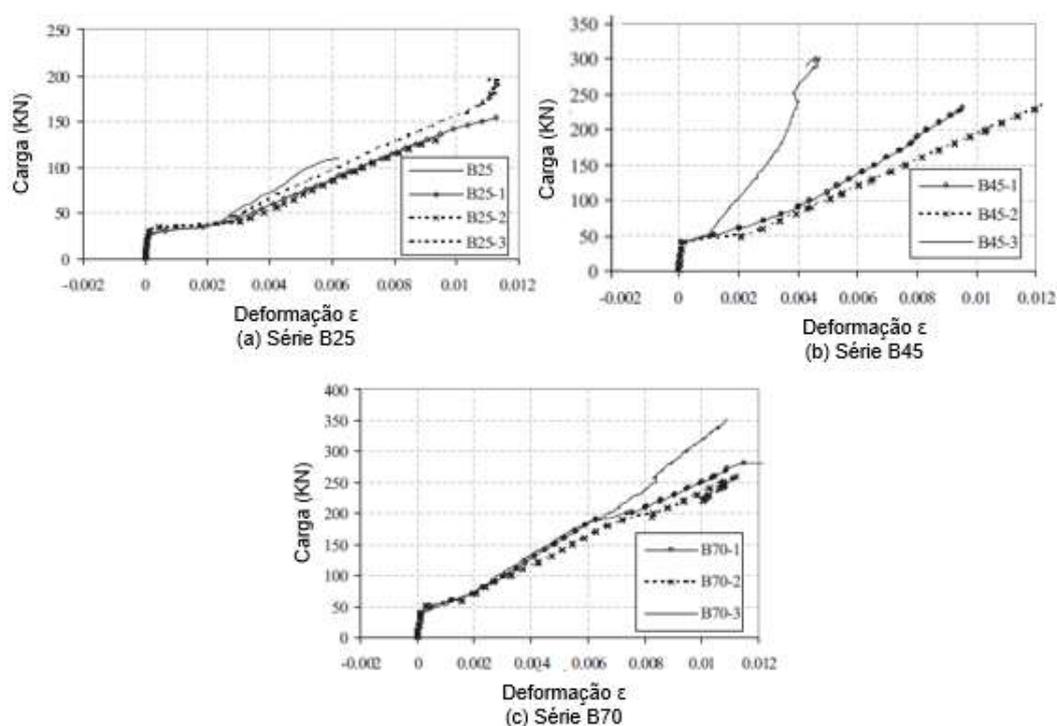
Série	Viga	Dimensões das vigas		$f_{cu}$ (MPa)		Armadura longitudinal (barras de GFRP)	Porta-estribos (Barras de GFRP)	Estribos (Estribos de GFRP)
		Base (mm)	Altura (mm)	Classe de resistência	Real			
	B25*	120	300	25	24,5	3 $\emptyset$ 12	2 $\emptyset$ 12	Sem estribos
B25	B25-1	120	300	25	24,5	3 $\emptyset$ 12	2 $\emptyset$ 12	8 @ 215
	B25-2	120	300	25	24,5	3 $\emptyset$ 12	2 $\emptyset$ 12	8 @ 150
	B25-3	120	300	25	24,5	3 $\emptyset$ 12	2 $\emptyset$ 12	8 @ 100
B45	B45-1	120	300	45	48	4 $\emptyset$ 12	2 $\emptyset$ 12	8 @ 215
	B45-2	120	300	45	48	4 $\emptyset$ 12	2 $\emptyset$ 12	8 @ 150
	B45-3	120	300	45	48	4 $\emptyset$ 12	2 $\emptyset$ 12	8 @ 100
B70	B70-1	120	300	70	74,4	6 $\emptyset$ 12	2 $\emptyset$ 12	8 @ 215
	B70-2	120	300	70	74,4	6 $\emptyset$ 12	2 $\emptyset$ 12	8 @ 150
	B70-3	120	300	70	74,4	6 $\emptyset$ 12	2 $\emptyset$ 12	8 @ 100

Fonte: Said *et al.* – Adaptado (2016).

O Gráfico 3 mostra as curvas de carga *versus* deformação da armadura longitudinal. Para todas as vigas, não houve mudança significativa do comportamento de deformação da armadura longitudinal até a primeira fissura do concreto. As leituras de deformação aumentaram rapidamente nas proximidades da primeira carga de fissura, e posteriormente, pôde-se observar um comportamento linear até a carga de ruptura. A deformação medida nas vigas com estribos espaçados a 100 mm foi menor do que nas vigas armadas com menos reforço da alma. As deformações das barras longitudinais de GFRP se encontraram na faixa de 0,006 a 0,0125, que correspondem

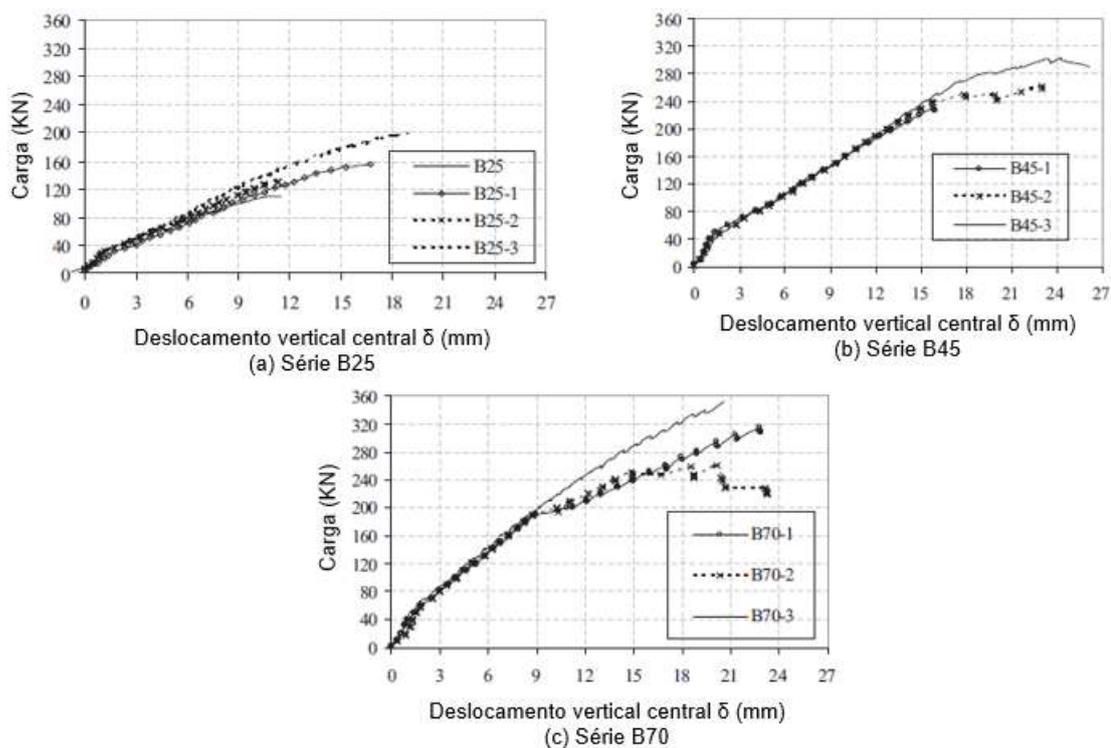
a cerca de 30-63% das deformações finais das barras obtidas no ensaio de tração, que atingiu o valor de 0,02. Devido aos baixos valores de deformação das barras, pode-se concluir que as barras não sofreram ruptura durante a ruína da viga, indicando assim, que o modo de falha da estrutura foi controlado por cisalhamento.

**Gráfico 3.** Carga x Deformação da armadura longitudinal de GFRP.



Fonte: Said *et al.* - Adaptado (2016).

O Gráfico 4 apresenta as curvas de carga *versus* flecha no centro do vão, das vigas ensaiadas. Os resultados mostraram que as vigas se comportaram quase linearmente até a primeira fissura por flexão. Depois de fissurado, a área resistente do concreto foi reduzida, diminuindo o momento de inércia. No segundo estágio, as vigas apresentaram comportamento linear, porém com rigidez reduzida. A quantidade de armadura longitudinal de GFRP teve efeito mais significativo na rigidez e deformação das vigas do que a armadura de cisalhamento.

**Gráfico 4.** Carga x Flecha das vigas ensaiadas.

Fonte: Said *et al.* - Adaptado (2016).

Os resultados apontaram que a resistência ao cisalhamento aumentou em 41% e 82% da capacidade resistente da viga sem estribo usando as barras de GFRP de 8 mm a cada 215 mm e 100 mm, respectivamente.

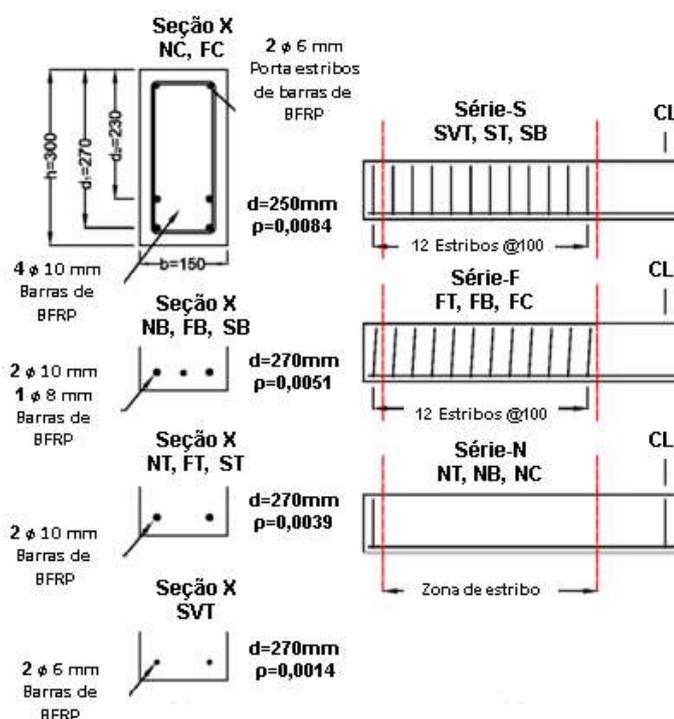
Em relação às resistências do concreto, para uma mesma taxa de armadura de GFRP, a resistência ao cisalhamento das vigas aumentou 49% e 104% com o aumento da resistência do concreto de 25 MPa para 45 MPa e 70 MPa, respectivamente.

O estudo feito por Tomlinson e Fam (2015) avaliou o desempenho de vigas de concreto armadas à flexão e ao cisalhamento, com barras de BFRP. Foram moldadas nove vigas com dimensões de 150 mm de largura, por 300 mm de altura e 3100 mm de comprimento. As vigas foram ensaiadas à flexão a quatro pontos para analisar o efeito da variação da taxa de reforço à flexão de 0,28 a 1,60 da taxa balanceada. Três vigas foram armadas ao cisalhamento com estribos de aço, três com estribos de BFRP e três vigas sem estribos. A Tabela 7 fornece um resumo da matriz de ensaio e a Figura 15 as configurações das armaduras das vigas.

**Tabela 7.** Matriz de ensaio para as vigas armadas com BFRP.

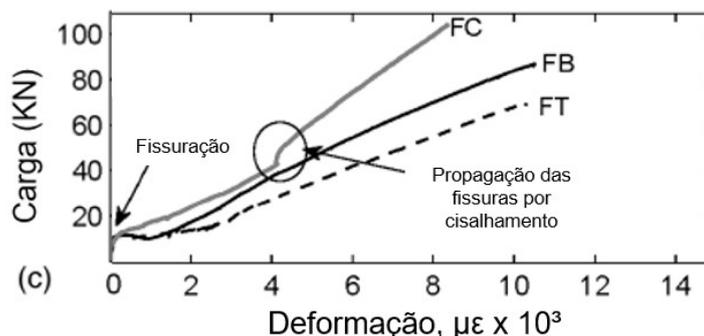
Identificação das vigas	Tipo de estribo	Resistência do concreto $f'_c$	Área da barra (mm <sup>2</sup> )	Altura d (mm)	Taxa de reforço à flexão, $\rho$	Taxa relativa balanceada $\frac{\rho}{\rho_b}$	
						ACI 440	CSA S806
FT	BFRP	51,0	157	270	0,0039	0,88	0,72
FB		52,5	207	270	0,0051	1,13	0,93
FC		52,1	314	245	0,0085	1,85	1,53
SVT	Aço	57,2	57	270	0,0014	0,28	0,24
ST		59,8	157	270	0,0039	0,75	0,64
SB		55,4	207	270	0,0051	1,07	0,85
NT	Nenhum	60,0	157	270	0,0039	0,75	0,64
NB		59,9	207	270	0,0051	0,98	0,85
NC		56,5	314	245	0,0085	1,71	1,45

Fonte: Tomlinson e Fam - Adaptado (2015).

**Figura 15.** Configurações das vigas: (a) seção transversal; (b) elevação.

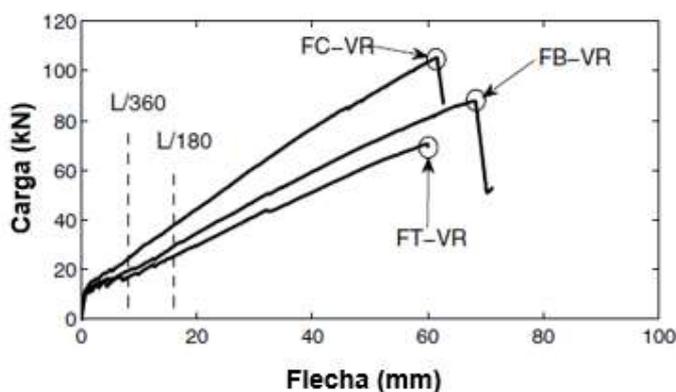
Fonte: Tomlinson e Fam - Adaptado (2015).

O Gráfico 5 apresenta as curvas de carga *versus* deformação da armadura longitudinal das vigas armadas com barras de BFRP. As vigas com maior taxa de reforço longitudinal apresentaram maior capacidade de carga para uma mesma deformação.

**Gráfico 5.** Carga x Deformação da armadura longitudinal de BFRP.

Fonte: Tomlinson e Fam – Adaptado (2015).

O Gráfico 6 apresenta as curvas de carga *versus* flecha no centro do vão, para as vigas armadas com barras longitudinais e estribos de BFRP. É possível observar um comportamento quase linear até a ruptura, característica encontrada nas barras de FRP, que exibem comportamento elástico-linear quando submetidas à tração.

**Gráfico 6.** Carga x Flecha das vigas ensaiadas.

Fonte: Tomlinson e Fam – Adaptado (2015).

Os resultados mostraram que a capacidade resistente última das vigas está diretamente associada à taxa de reforço à flexão, independentemente do modo de falha, podendo ser por flexão ou cisalhamento. Entretanto, os valores de carga-flecha para o estado de serviço não foram visivelmente afetados pelo tipo de reforço ao cisalhamento. Nas vigas que não possuíam estribos, a carga na qual ocorreram as maiores fissuras diagonais, aumentou à medida que a taxa de armadura à flexão de BFRP aumentou.

Todas as vigas com estribos de BFRP falharam por cisalhamento, com a ruptura dos estribos. As capacidades últimas das vigas ao cisalhamento aumentaram à medida que a taxa de reforço à flexão aumentou.

## 2.6. Estudos sobre a utilização de fibras descontínuas na matriz de concreto como substituição à armadura de cisalhamento de estruturas armadas com FRP

O estudo realizado por Dev *et al.* (2020) analisou o efeito das fibras no comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado com barras longitudinais de GFRP. O objetivo do trabalho foi compreender a eficiência da macrofibra sintética de poliolefina (PO) e uma combinação híbrida de fibras de aço e PO, para melhorar o comportamento ao cisalhamento de vigas armadas com barras de GFRP. Foram ensaiadas 13 vigas, utilizando três teores de fibras PO e híbridas, 0,35%, 0,70% e 1,0% em volume de concreto. Para a análise da substituição dos estribos, a zona de teste não apresenta armadura transversal. Os detalhes do programa experimental são apresentados na Tabela 8, enquanto o esquema do ensaio de flexão é apresentado na Figura 16.

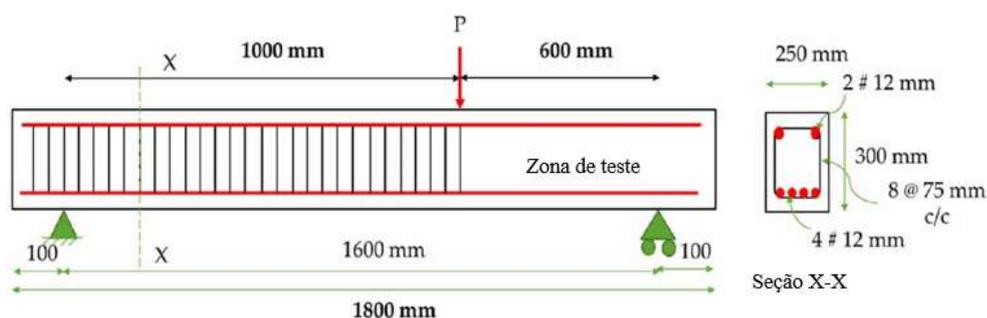
**Tabela 8.** Detalhes do programa experimental.

Corpo de prova	Teor de fibra PO em volume (%)	Teor de fibra HB em volume (%)	Área das barras (mm <sup>2</sup> )	$\rho_t E_{FRP}$ (GPa)	Número de corpos de prova
PO00/HB00	0,00	0,00	4 $\Phi$ 12=452	0,35	1
PO35	0,35	-	4 $\Phi$ 12=452	0,35	2
PO70	0,70	-	4 $\Phi$ 12=452	0,35	2
PO100	1,00	-	4 $\Phi$ 12=452	0,35	2
HB35	0,175	0,175	4 $\Phi$ 12=452	0,35	2
HB70	0,35	0,35	4 $\Phi$ 12=452	0,35	2
HB100	0,50	0,50	4 $\Phi$ 12=452	0,35	2

Fonte: Dev *et al.* - Adaptado (2020).

Nota:  $\rho_t E_{FRP}$  = rigidez axial; PO = fibra de poliolefina; e HB = combinação híbrida de fibras de aço e poliolefina.

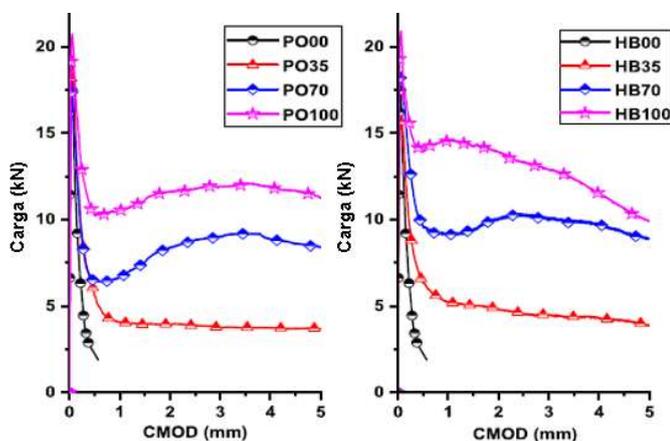
**Figura 16.** Esquema do ensaio de flexão a três pontos.



Fonte: Dev *et al.* - Adaptado (2020).

O Gráfico 7 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão dos concretos com fibras e de referência.

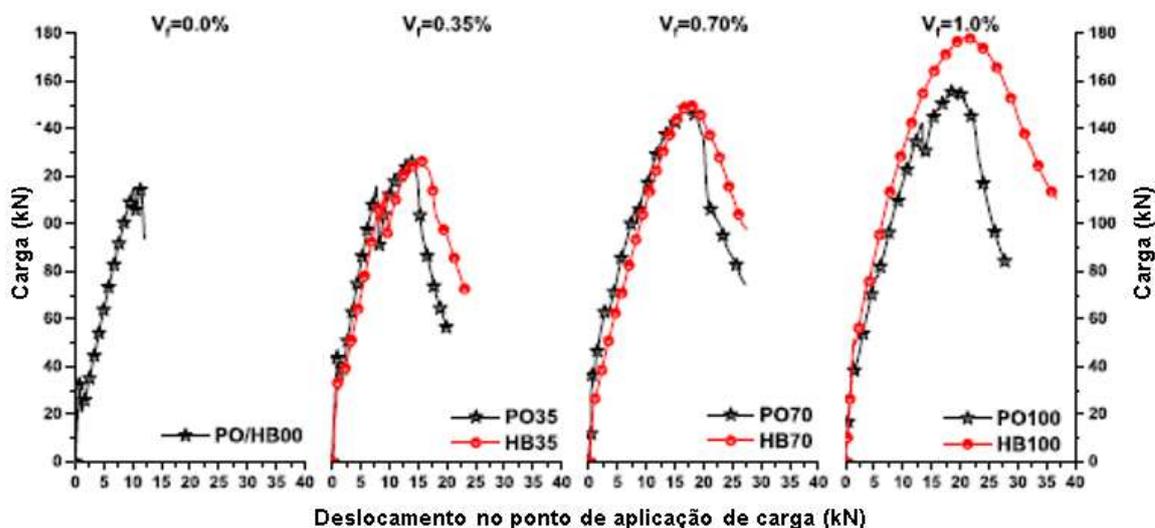
**Gráfico 7.** Ensaio de resistência à tração na flexão (limites de proporcionalidade e residuais).



Fonte: Dev *et al.* - Adaptado (2020).

Como esperado, o corpo de prova de referência (sem fibras) apresentou ruptura abrupta após atingir a resistência de pico. A adição de fibras PO e fibras híbridas aumentaram a resistência a tração pós-fissuração do concreto, promovendo maior incremento de rigidez quando comparado ao concreto de referência. As propriedades mecânicas superiores das fibras de aço proporcionaram às vigas reforçadas com fibras híbridas maior resistência residual e uma queda menor na carga pós-fissuração quando comparadas com as vigas reforçadas com fibras sintéticas para a mesma dosagem de fibras. O resultado do ensaio de flexão é apresentado no Gráfico 8.

**Gráfico 8.** Resultado do ensaio de resistência à flexão em três pontos.



Fonte: Dev *et al.* - Adaptado (2020).

Tanto as fibras sintéticas quanto as híbridas melhoraram a resistência ao cisalhamento, o comportamento pós-fissuração, e promoveram pseudo-ductilidade às vigas armadas com GFRP. Os resultados do ensaio de fratura mostraram que as fibras híbridas são mais eficientes em melhorar o desempenho geral em termos de rigidez pós-fissuração, resistência residual à tração na flexão e absorção de energia. Porém, essa tendência foi observada apenas para vigas com alta dosagens de fibra. Apesar das fibras sintéticas terem colaborado para melhorar a ductilidade das vigas, elas não foram eficazes o suficiente para alterar a ruptura frágil por cisalhamento.

Em seus estudos, Tran, Pham e Hao (2020) avaliaram o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto geopolimérico armado com barras longitudinais de BFRP, sem estribo e com adição de fibras descontínuas. Diferentes combinações de fibras foram utilizadas: macrofibras de aço (SF), fibras macro sintéticas de polipropileno (PF), híbridas de aço e fibras de álcool polivinílico (PVA), e PF e microfibras de carbono. Os teores de fibras utilizados e as propriedades das fibras são apresentados nas Tabelas 9 e 10, respectivamente. O esquema do ensaio é mostrado na Figura 17.

**Tabela 9.** Teores de fibras utilizados.

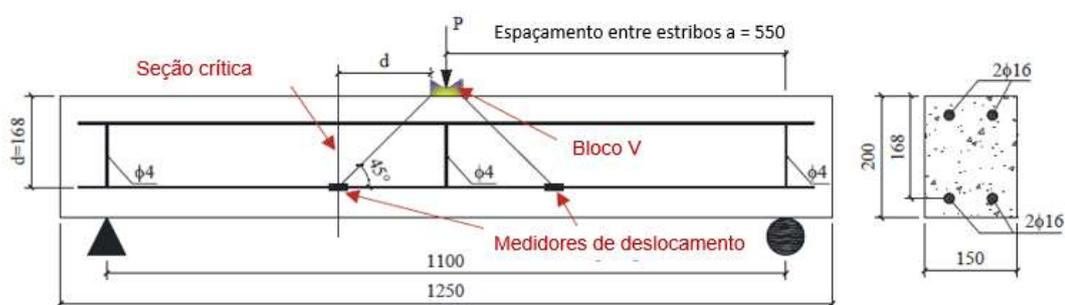
Viga	Porcentagem de fibra em volume (%)			
	Aço	PF	PVA	Carbono
OPC	-	-	-	-
OPC-0.5SF	0,5	-	-	-
GPC1	-	-	-	-
GPC2	-	-	-	-
GPC-0.25SF	0,25	-	-	-
GPC-0.5SF	0,5	-	-	-
GPC-1SF	1	-	-	-
GPC-0.25PF	-	0,25	-	-
GPC-0.5PF	-	0,5	-	-
GPC-0.4SF-0.1PVF	0,4	-	0,1	-
GPC-0.3SF-0.2PVF	0,3	-	0,2	-
GPC-0.4PF-0.1CF	-	0,4	-	0,1
GPC-0.3PF-0.2CF	-	0,3	-	0,2

Fonte: Tran, Pham e Hao – Adaptado (2020).

**Tabela 10.** Propriedades das fibras.

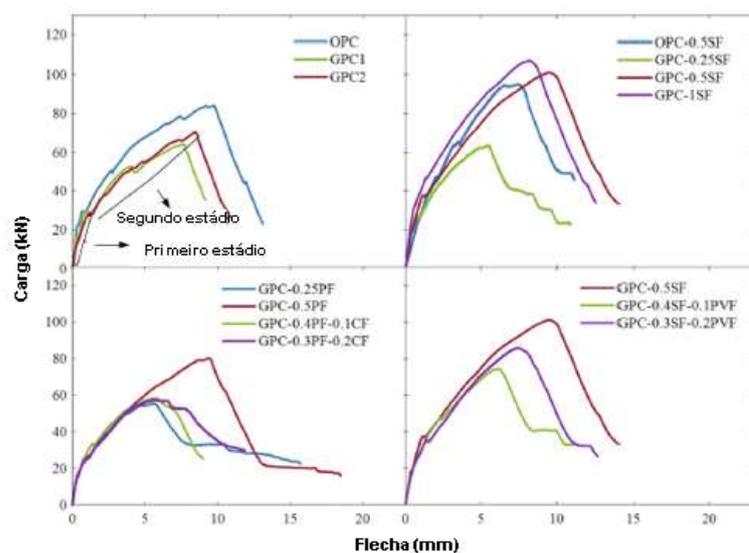
Parâmetros	Aço	Sintética	PVA	Carbono
Comprimento (mm)	35	48	12	24
Diâmetro (mm)	550	850	40	10
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	7,8	0,9	1,3	1,78
Módulo de elasticidade (GPa)	210	12	66	230
Alongamento na ruptura (%)	-	-	5-6%	1,4-1,6%
Resistência à tração (MPa)	1345	640	1600	3400

Fonte: Tran, Pham e Hao – Adaptado (2020).

**Figura 17.** Detalhes dos corpos de prova e esquema do ensaio.

Fonte: Tran, Pham e Hao – Adaptado (2020).

As curvas de carga *versus* flecha são apresentadas no Gráfico 9.

**Gráfico 9.** Curvas de carga *versus* flecha.

Fonte: Tran, Pham e Hao – Adaptado (2020).

Os resultados dos ensaios experimentais mostraram que a adição de fibras de aço não só aumentou a capacidade de cisalhamento das vigas com concreto

convencional e geopolimérico, mas também aumentou a resistência à abertura de fissuras e a rigidez pós-fissuração.

A adição de fibras de polipropileno mostrou considerável melhoria da capacidade de cisalhamento das vigas de concreto geopolimérico. As vigas com adição de 0,5% de fibra PF apresentaram aumento de 33% em relação à resistência ao cisalhamento normalizada, quando comparadas com as vigas sem adição de fibras. A combinação das fibras de carbono e polipropileno se mostrou eficiente para melhorar a ductilidade das vigas, porém, o mesmo não foi observado em relação à capacidade de cisalhamento.

## **2.7. Dimensionamento de vigas armadas com barras de FRP de acordo com a norma ACI 440.1R-15**

O dimensionamento de estruturas de concreto armado com barras de FRP apresenta similaridades ao de estruturas armadas com barras de aço, de modo a garantir a segurança contra ruína e a adequação às condições de utilização, por meio do Estado Limite de Serviço (ELS) e Estado Limite Último (ELU). Porém, em razão do baixo módulo de elasticidade das barras de FRP, são observadas grandes deformações das estruturas armadas com esse material, o que torna, em grande parte dos casos, o Estado Limite de Serviço (ELS) limitante para o dimensionamento de estruturas armadas com barras não metálicas.

### **2.7.1. Dimensionamento à flexão**

Para o dimensionamento à flexão, as ações às quais o elemento está submetido são majoradas e sua capacidade resistente é minorada, assegurando que a primeira não seja superior à segunda, conforme mostra a Equação 1.

$$\phi M_n \geq M_u \quad (1)$$

$M_u$  é o momento calculado a partir das ações que o elemento é submetido, já multiplicadas pelos fatores de majoração probabilísticos.

$M_n$  é o momento resistente do elemento calculado por meio das equações de equilíbrio e a compatibilidade das deformações.

$\phi$  é o coeficiente dependente do tipo de ruína que governa o comportamento do elemento.

Os parâmetros utilizados para definir o tipo de ruína são a taxa de armadura de FRP do elemento e a taxa de armadura balanceada (taxa de armadura em que ocorrem os dois tipos de ruína simultaneamente).

A taxa de armadura de FRP ( $\rho_f$ ) é definida pela Equação 2, onde  $A_f$  é a área das barras de FRP,  $b$  é a largura da viga de concreto e  $d$  é a altura útil da viga de concreto.

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (2)$$

A taxa de armadura balanceada ( $\rho_{fb}$ ) é dada pela Equação 3, onde  $\beta_1$  é um fator de redução,  $f'_c$  é a resistência característica do concreto à compressão,  $E_f$  é o módulo de elasticidade de projeto da barra de FRP,  $f_{fu}$  é a resistência à tração de cálculo da barra de FRP e  $\varepsilon_{cu}$  é a deformação última do concreto.

$$\rho_{fb} = 0,85 \cdot \frac{f'_c}{f_{fu}} \cdot \beta_1 \cdot \frac{E_f \cdot \varepsilon_{cu}}{E_f \cdot \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (3)$$

Por meio da Equação 4 obtém-se  $f_{fu}$ , onde  $f_{fu}^* = f_{u,ave} - 3\sigma$ , sendo  $f_{u,ave}$  a resistência média à tração de corpos de prova analisados,  $\sigma$  o desvio padrão e  $C_E$  o coeficiente ambiental de redução das propriedades mecânicas das fibras devido às suas condições de exposição

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (4)$$

A Tabela 11 apresenta os coeficientes ambientais de redução, para diferentes condições de exposição.

**Tabela 11.** Coeficiente ambiental de redução para diferentes tipos de fibras e condições de exposição.

Condição de exposição	Tipo de fibra	Coeficiente de redução ( $C_E$ )
Concreto não exposto à água e intempéries	Carbono	1,0
	Vidro	0,8
	Aramida	0,9
Concreto exposto à água e intempéries	Carbono	0,9
	Vidro	0,7
	Aramida	0,8

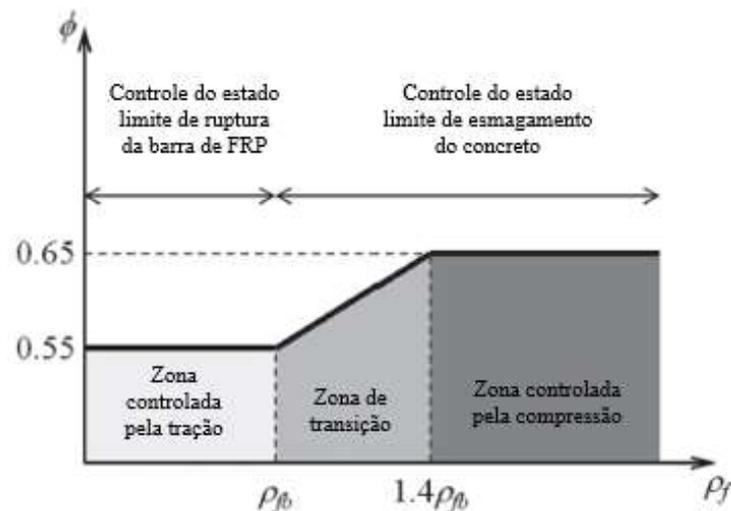
Fonte: ACI 440.1R-15 – Adaptado.

O fator de redução da resistência  $\phi$ , apresentado na Equação 5, depende da razão entre a taxa de armadura de FRP e a taxa de armadura balanceada:

$$\phi = \begin{cases} 0,55 & \text{se } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0,30 + \frac{\rho_f}{4 \cdot \rho_{fb}} & \text{se } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4 \rho_{fb} \\ 0,65 & \text{se } \rho_f \geq 1,4 \rho_{fb} \end{cases} \quad (5)$$

Os três casos possíveis para a ruína do elemento reforçado com barras de FRP são: ruína governada pelo esmagamento do concreto, ruína governada pela ruptura da barra e ruína governada pela ruptura da barra e esmagamento do concreto, como mostra o Gráfico 10.

**Gráfico 10.** Fator de redução de resistência em função da taxa de armadura.



Fonte: ACI 440.1R - 15 – Adaptado.

Quando  $\rho_f > \rho_{fb}$ , a falha da estrutura é iniciada pelo esmagamento do concreto. Nesse caso, a tensão na armadura de FRP ( $f_f$ ) é dada pela Equação 6.

$$f_f = \left[ \sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu} \right] \leq f_{fu} \quad (6)$$

Com a tensão na barra, é possível calcular o momento resistente nominal, pela Equação 7.

$$M_n = \rho_f f_f \left( 1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2 \quad (7)$$

Quando  $\rho_f < \rho_{fb}$ , a falha da estrutura é governada pela ruptura da barra, deste modo o momento resistente nominal é calculado pela Equação 8, onde  $c_b = \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d$ .

$$M_n = A_f f_{fu} \left( d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) \quad (8)$$

### 2.7.2. Dimensionamento ao cisalhamento

Para o dimensionamento ao cisalhamento, a capacidade do concreto é dada pela Equação 9.

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w (kd) \quad (9)$$

Onde  $k = \sqrt{2 \rho_f \eta_f + (\rho_f \eta_f)^2} - \rho_f \eta_f$ , sendo  $k$  a proporção de profundidade da linha neutra para reforço,  $\eta_f$  é a razão entre o módulo de elasticidade da barra de FRP e o módulo de elasticidade do concreto.

A contribuição dos estribos de FRP posicionados perpendicularmente ao eixo do elemento, é dada pela Equação 10.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} \quad (10)$$

A resistência à tração característica de barras de FRP contendo dobras ( $f_{fb}$ ) pode ser estimada pela Equação 11, onde  $r_b$  é o raio interno de curvatura da barra de FRP e  $d_b$  é o diâmetro da barra.

$$f_{fb} = \left( 0,05 \cdot \frac{r_b}{d_b} + 0,3 \right) \cdot f_{fu} \quad (11)$$

O nível de tensão na armadura de cisalhamento de FRP deve ser limitado para controlar abertura de fissuras de cisalhamento e manter a integridade do concreto, como mostra a Equação 12.

$$f_{fv} = 0,004 E_f \leq f_{fb} \quad (12)$$

Quando utilizados estribos perpendiculares ao eixo do elemento, o espaçamento e a área de armadura de cisalhamento podem ser calculados pela Equação 13, onde  $V_u$  é a força de cisalhamento distribuída na seção.

$$\frac{A_{fv}}{s} = \frac{(V_u - \phi V_c)}{\phi f_{fv} d} \quad (13)$$

### 2.7.3. Flecha

Os valores apresentados na Tabela 12 são baseados em limites de flecha de serviço suposto de  $L/240$  sob a carga total de serviço de taxas de armadura assumidas de  $2,0 \rho_{fb}$  e  $3,0 \rho_{fb}$  para lajes e vigas, respectivamente.

**Tabela 12.** Espessura mínima recomendada de lajes unidirecionais e vigas.

Elemento	Espessura mínima (h)			
	Simplemente apoiada	Uma extremidade contínua	Ambas as extremidades contínuas	Em balanço
Lajes maciças unidirecionais	L/13	L/17	L/22	L/5,5
Vigas	L/10	L/12	L/16	L/4

Fonte: ACI 440.1R-15 – Adaptado.

No caso de uma seção não fissurada, o momento de inércia é igual ao momento de inércia bruto,  $I_g$ . A fissuração ocorre quando o momento máximo sob a ação da carga de serviço ( $M_a$ ) excede o momento de fissuração ( $M_{cr}$ ), causando uma redução na rigidez do elemento. O momento de inércia da seção fissurada ( $I_{cr}$ ) para um elemento retangular é calculado para uma seção fissurada usando uma análise elástica dada pela Equações 14.

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1 - k)^2 \quad (14)$$

A rigidez à flexão global ( $E_{cl}$ ) de um elemento fissurado varia entre  $E_{clg}$  e  $E_{clr}$ , dependendo da magnitude do momento de serviço aplicado e da extensão de fissuração ao longo do elemento.

Bischoff (2005) propôs uma expressão alternativa para o momento de inércia efetivo ( $I_e$ ) que representa igualmente bem os elementos de concreto reforçados com armaduras de aço e de FRP, sem a necessidade de fatores de correção empíricos. A expressão foi modificada, como mostra a Equação 15, para incluir um fator adicional  $\gamma$  para explicar a variação da rigidez ao longo do comprimento do elemento.

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2 \left[1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right]} \leq I_g \text{ onde } M_a \geq M_{cr} \quad (15)$$

O fator  $\gamma$  depende da carga e das condições de contorno e expressa o comprimento das regiões não fissuradas do elemento e a mudança de rigidez nas regiões fissuradas. O fator pode ser tomado como  $\gamma = 1,72 - 0,72 (M_{cr}/M_a)$ , que é o resultado da integração da curvatura ao longo do comprimento de uma viga simplesmente apoiada com uma carga uniformemente distribuída.

O momento de fissuração deve ser calculado conforme a Equação 16, onde  $y_t$  é a distância do eixo do centroide da seção bruta, excluindo-se o reforço, à face tracionada, em mm, e  $\lambda$  é o fator de modificação que reflete a redução das propriedades mecânicas do concreto leve.

$$M_{cr} = \frac{0,62\lambda\sqrt{f_c'}I_g}{y_t} \quad (16)$$

## 2.8. Dimensionamento de vigas armadas com barras de FRP de acordo com a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021)

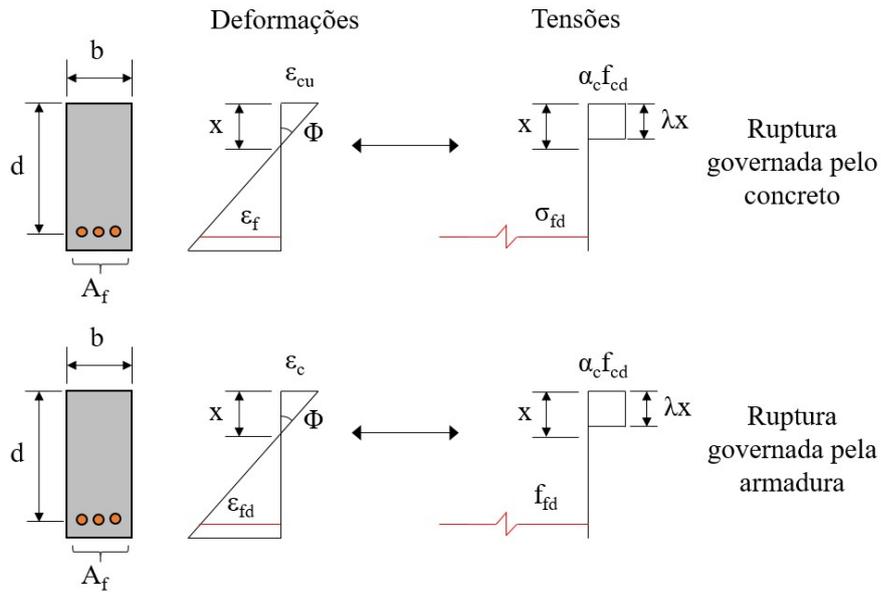
### 2.8.1. Dimensionamento à flexão

Para a realização do dimensionamento à flexão de vigas armadas com barras de FRP, algumas hipóteses são consideradas:

- As seções permanecem planas após a flexão;
- Bloco retangular de tensões no concreto com tensão  $\alpha_c f_{cd}$  e altura  $\lambda x$ , onde  $x$  é a profundidade da linha neutra e  $\alpha_c$  e  $\lambda$  são dados conforme NBR 6118 (2014), para concretos de resistência normal e seções transversais retangulares,  $\alpha_c = 0,85$  e  $\lambda = 0,8$ ; a resistência à tração do concreto deve ser desprezada;
- As tensões na armadura de FRP são proporcionais às deformações e comportamento elástico linear até a ruptura; e a aderência entre o concreto e as barras de FRP é perfeita.

O dimensionamento de estruturas armadas com barras de FRP deve considerar o comportamento frágil das barras. Conforme a Figura 18, são apresentadas duas condições possíveis de dimensionamento, determinando a ruptura do elemento pelo esmagamento do concreto ou por ruptura da barra.

**Figura 18.** Configurações na ruptura de vigas submetidas à flexão.



Fonte: Prática Recomendada (2021).

O modo de ruptura que governa o comportamento depende da relação entre a taxa de armadura  $\rho_f = A_f/bd$  e a taxa de armadura balanceada  $\rho_{fb}$ , que é definida como sendo a taxa de armadura para a qual acontece a transição entre os modos de falha. A taxa de armadura balanceada  $\rho_{fb}$  é definida pela Equação 17:

$$\rho_{fb} = \lambda \alpha_c \frac{f_{cd}}{f_{fd}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fd}} \quad (17)$$

Onde  $\varepsilon_{cu}$  é a deformação última do concreto à compressão.

Para fins de projeto, os valores característicos das resistências são obtidos de forma que haja apenas 5% de probabilidade de não ser atingido dentro de um dado lote do material. A resistência de cálculo para o concreto pode ser obtida da mesma forma que na ABNT NBR 6118 (2014), conforme a Equação 18. Para as barras de FRP e sua interface com o concreto, a resistência de cálculo pode ser obtida conforme a Equação 19.

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_c} \quad (18)$$

$$f_d = C_E \frac{f_k}{\gamma_m} \quad (19)$$

Onde  $f_d$  e  $f_k$  se referem a valores genéricos de resistência de cálculo e característico, respectivamente, e o coeficiente de redução de resistência  $\gamma_c$  para o

concreto é apresentado na NBR 6118 (2014). A Tabela 13 apresenta os valores do coeficiente parcial  $\gamma_m$  para as barras de FRP e sua interface com o concreto.

**Tabela 13.** Coeficientes de redução de resistência  $\gamma_m$  para barras de FRP.

Combinação	$\gamma_m$
ELU Normal	1,30
ELU especial ou de construção	1,20
ELU excepcional	1,20
ELU Fadiga	1,20
ELS	1,00

Fonte: Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

Os fatores de redução ambiental  $C_E$  são apresentados na Tabela 14.

**Tabela 14.** Fator de redução ambiental  $C_E$ .

Condição de exposição	Material	Fator de redução ambiental $C_E$
Interior e sem contato com solo	AFRP	0,9
	CFRP	1,0
	GFRP/BFRP	0,8
Exterior ou em contato com solo	AFRP	0,8
	CFRP	0,9
	GFRP/BFRP	0,7

Fonte: Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

Para os modos de falha apresentados na Figura 18, a profundidade da linha neutra pode ser obtida por meio das Equações 20 e 21:

- Para  $\rho_f \leq \rho_{fb}$ :

$$x = \frac{f_{fd}A_f}{\lambda\alpha_c f_{cd}b} \quad (20)$$

- Para  $\rho_f > \rho_{fb}$ :

$$x = \frac{1}{2b} \frac{\varepsilon_{cu}A_f E_f}{\lambda\alpha_c f_{cd}} \left( -1 + \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda\alpha_c f_{cd}}{\varepsilon_{cu}A_f E_f} bd} \right) \quad (21)$$

Onde  $A_f$  é a área de armadura de FRP na região de tração efetivamente contribuindo para a resistência e  $b$  é a largura da viga. A tensão na armadura pode ser obtida por meio das Equações 22 e 23:

- Para  $\rho_f \leq \rho_{fb}$ :

$$\sigma_{fd} = f_{fd} \quad (22)$$

- Para  $\rho_f > \rho_{fb}$ :

$$\sigma_{fd} = \frac{xb\alpha_c\lambda f_{cd}}{A_f} \quad (23)$$

O momento resistente é obtido pela Equação 24.

$$M_{Rd} = \sigma_{fd}A_f \left( d - \frac{\lambda x}{2} \right) \quad (24)$$

### 2.8.2. Dimensionamento ao cisalhamento

Para o dimensionamento ao cisalhamento, as hipóteses a serem consideradas são:

- Modelo de treliça com bielas de compressão inclinadas de  $\theta = 45$  graus (pouca adaptação plástica);
- Contribuição do concreto apenas na zona comprimida (linha neutra calculada pelo estágio II), dada a flexibilidade das armaduras longitudinal e transversal,
- As parcelas de força cortante transferidas por engrenamento dos agregados e efeito de pino são menores; estribos orientados perpendicularmente ao eixo da viga.

A verificação de falha por compressão diagonal deve ser feita determinando-se o cortante resistente  $V_{Rd2}$ , segundo o Modelo I da NBR 6118. A resistência à ruptura por tração da armadura transversal deve ser determinada segundo a Equação 25.

$$V_{Rd3} = V_c + V_f \quad (25)$$

Onde:

$$V_c = 0,6f_{ctd}bx_{II} \quad (26)$$

$$V_f = 0,9df_{fbd} \left( \frac{A_{ft}}{s} \right)_v \quad (27)$$

Nas equações anteriormente apresentadas,  $x_{II}$  é a posição da linha neutra no estágio II,  $f_{fbd} = f_{fbk}/\gamma_m$  é a resistência à tração do estribo considerando a redução

devido à dobra e  $(A_{ft/s})_v$  é a área de armadura transversal por unidade de comprimento do elemento estrutural para resistência à cortante.

A resistência à tração característica de barras contendo dobras pode ser obtida pela Equação 28.

$$f_{fbk} = \left(0,05 \frac{r_b}{\phi} + 0,3\right) f_{fk} \quad (28)$$

Onde  $r_b$  é o raio de dobra e  $\phi$  é o diâmetro nominal da barra. O comportamento pode ser assumido como linear elástico.

Por ocasião do uso de modelo de treliça, a força de tração na armadura longitudinal deve ser devidamente corrigida. De forma conservadora, pode-se assumir decalagem do diagrama de momentos ou de força de tração de  $a\ell = d$ .

A armadura transversal composta por estribos de FRP em elementos sujeitos à cortante deve ser superior ao seguinte valor mínimo, obtido da Equação 29. A armadura transversal deve ter diâmetro igual ou superior a 5 mm e inferior a 1/10 da largura da seção.

$$\left(\frac{A_{ft}}{s}\right)_{v,min} = 0,2 \frac{f_{ctm}}{0,004 E_f} \quad (29)$$

### 2.8.3. ELS de Deformação excessiva

A flecha imediata de vigas de concreto armado com barras de FRP pode ser determinada considerando rigidez equivalente a partir da equação de Branson modificada (Equação 30).

$$(EI)_{eq,t0} = E_{cs} \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a}\right)^3 \beta_d I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a}\right)^3\right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c \quad (30)$$

Onde  $M_r$  é o momento de fissuração na seção crítica determinado conforme NBR 6118 (2014),  $M_a$  é o momento solicitante na seção crítica,  $I_c$  é o momento de inércia da seção bruta de concreto,  $I_{II}$  é o momento de inércia no estágio II e  $\beta_d$  é um coeficiente redutor, igual a 0,75.

## 2.9. Dimensionamento no estado limite último de elementos lineares com CRF sujeitos à força cortante – ABNT NBR 16935 (2021)

### 2.9.1. Elementos lineares com CRF, com armadura longitudinal e sem armadura transversal

Ao utilizar o CRF em elementos estruturais sem armadura transversal, a resistência do elemento em uma determinada seção transversal deve atender à seguinte condição:

$$V_{sd} \leq V_{Rd,F} \quad (31)$$

$$V_{Rd,F} = \left\{ \frac{0,18}{\gamma_c} k \left[ 100 \rho_1 \left( 1 + 7,5 \frac{f_{Ftuk}}{f_{ctk}} \right) f_{ck} \right]^{1/3} + 0,15 \sigma_{cp} \right\} b_w d \geq V_{Rd,Fmin} \quad (32)$$

Onde:  $\gamma_c$  é o coeficiente de ponderação do CRF;  $d$  é a altura útil da seção transversal, expressa em milímetros (mm);  $b_w$  é a menor largura da seção transversal na zona de tração, em milímetros (mm);  $f_{Ftuk}$  é a resistência característica à tração direta do CRF, valor último, considerando  $w_u = 1,5$  mm, expressa em MPa;  $f_{ctk}$  é a resistência característica do concreto à tração direta, expressa em MPa;  $f_{ck}$  é a resistência característica à compressão do concreto, em MPa;  $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$ ;  $\rho_1 = A_{sl}/(b_w d)$  sendo  $\rho_1$  a taxa de armadura longitudinal,  $A_{sl}$  a área da seção transversal da armadura que se estende além da seção considerada ( $\geq b d + d$ );  $\sigma_{cp} = N_{ed}/A_c \leq 0,2 f_{cd}$ , sendo  $\sigma_{cp}$  a tensão média na seção transversal de concreto ( $A_c$ ) por ação de força axial ( $N_{ed}$ ) devida ao carregamento ou a ações de pré-tensão ( $N_{Fd} > 0$  para compressão);  $V_{Rd,min} = (v_{min} + 0,15 \sigma_{cp}) b_w d$ ;  $v_{min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$ .

O valor de  $V_{Rd,Fmin}$  é limitado superiormente pelo valor obtido pela Equação 33.

$$V_{Rd,max} = k_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} b_w z \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta} \quad (33)$$

Onde:  $k_c = 0,5 (30/f_{ck})^{1/3} \leq 0,5$

### 2.9.2. Elementos lineares com CRF, com armadura longitudinal e com armadura transversal

A resistência do elemento estrutural, em uma determinada seção transversal deve atender à seguinte condição:

$$V_{sd} \leq V_{Rd} = V_{Rd,F} + V_{sw} \quad (34)$$

Onde:  $V_{sw}$  é calculado de acordo com a ABNT NBR 6118.

### 2.9.3. Armadura mínima de cisalhamento

A armadura mínima de cisalhamento convencional (estribos), conforme prevista na ABNT NBR 6118, pode ser dispensada quando for utilizado o CRF e a seguinte condição for atendida:

$$f_{Ftuk} \geq 0,08\sqrt{f_{ck}} \quad (35)$$

Sendo:

$$F_{Ftu} = f_{Fts} - \frac{w_u}{CMOD_3} (f_{Fts} - 0,5f_{R3} + 0,2f_{R1}) \geq 0 \quad (36)$$

Onde:  $f_{Ftuk}$  é a resistência característica à tração direta do CRF, valor último, considerando  $w_u = 1,5$  mm; e  $f_{ck}$  é a resistência característica à compressão do concreto.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

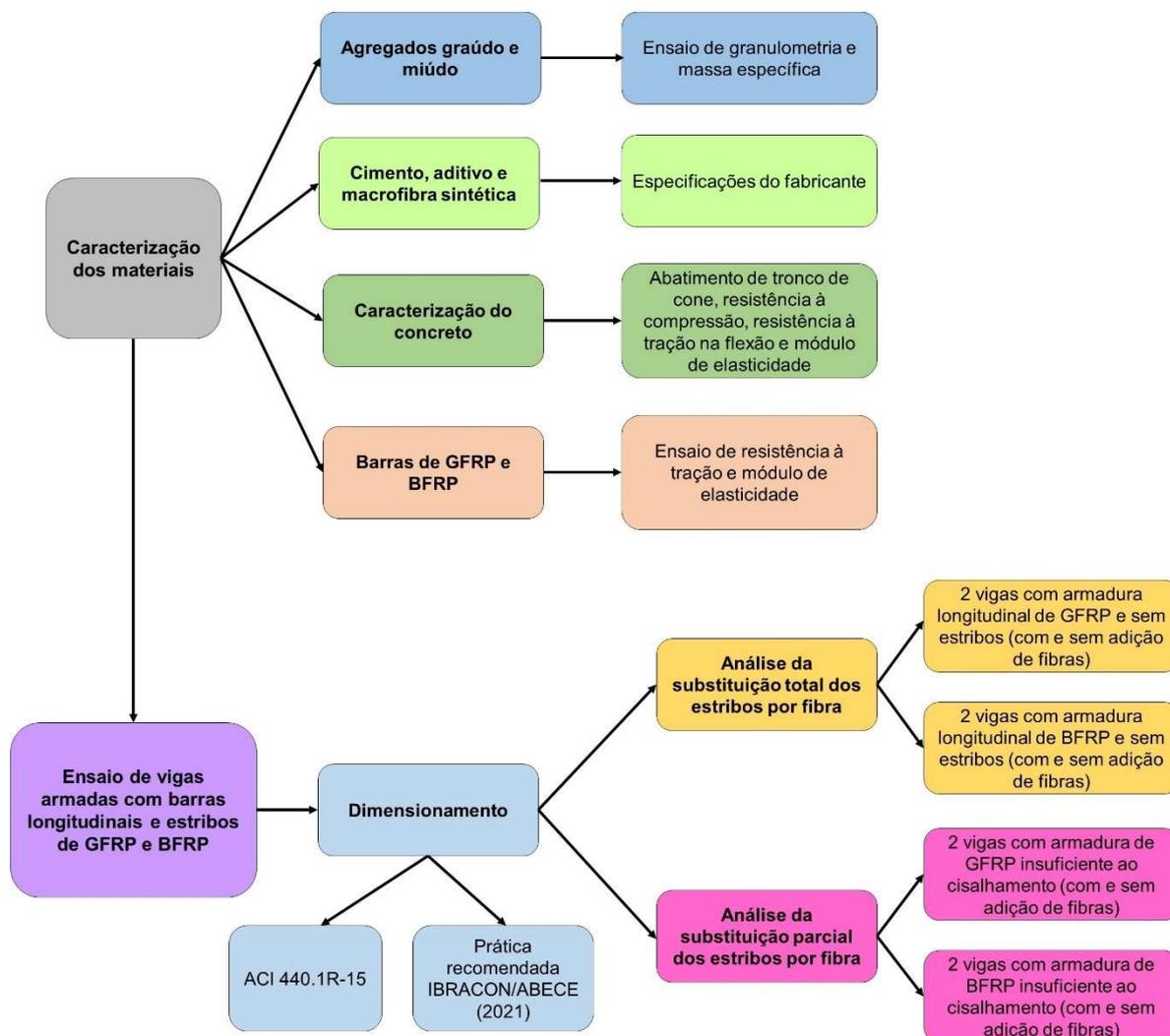
Este capítulo descreve o programa experimental desenvolvido para avaliar a substituição parcial e total da armadura de cisalhamento por macrofibra sintética, em vigas de concreto armado com barras de GFRP e BFRP, submetidas à flexão no ensaio a quatro pontos.

O estudo foi dividido em duas etapas: caracterização dos materiais e ensaio de vigas armadas com barras de GFRP ou BFRP. Para a etapa inicial, foram caracterizados os agregados graúdo e miúdo, por meio dos ensaios de granulometria e massa específica, e posteriormente, a caracterização do concreto nos estados fresco e endurecido, através dos ensaios de abatimento de tronco de cone, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade. O ensaio de resistência à tração na flexão, segundo a ABNT NBR 16940, foi feito somente para caracterizar o concreto com fibra. Também foi caracterizado o comportamento mecânico das barras de GFRP e BFRP, por meio do ensaio de resistência à tração e módulo de elasticidade.

Para a segunda etapa foram ensaiadas 8 vigas, sendo 4 vigas armadas com barras de GFRP e 4 vigas armadas com barras de BFRP. Para cada material, foram ensaiadas 2 vigas com armadura insuficiente ao cisalhamento (com e sem adição de fibra) e 2 vigas sem armadura transversal (com e sem adição de fibra). A adição de 1% de macrofibra sintética em volume de concreto tem o objetivo de diminuir a fissuração do concreto e também contribuir na resistência ao cisalhamento do elemento estrutural. O dimensionamento das vigas armadas com barras poliméricas seguiu as orientações da norma ACI 440.1R-15 e da Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

As etapas desta pesquisa são apresentadas na Figura 19.

**Figura 19.** Etapas da pesquisa.



### 3.1. Caracterização dos materiais

#### 3.1.1. Caracterização dos agregados graúdo e miúdo

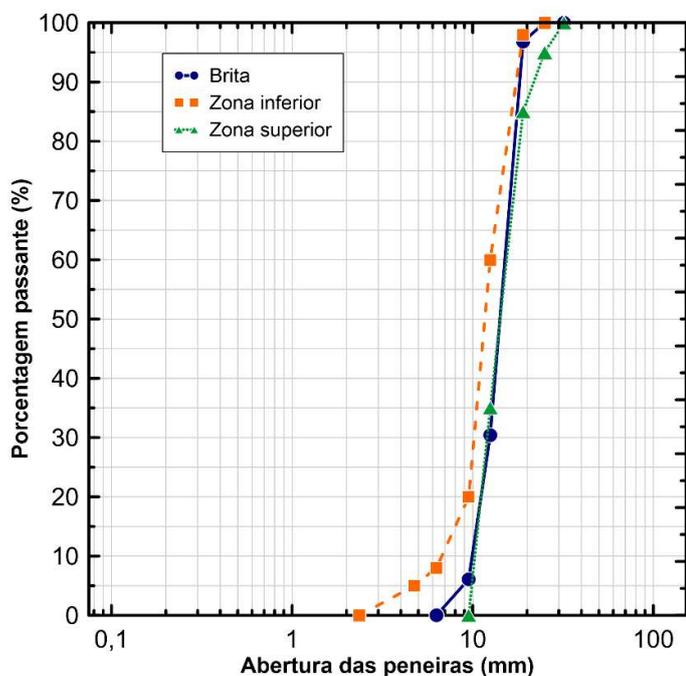
A caracterização dos agregados foi realizada de acordo com as normas apresentadas na Tabela 15.

**Tabela 15.** Propriedades dos agregados analisadas.

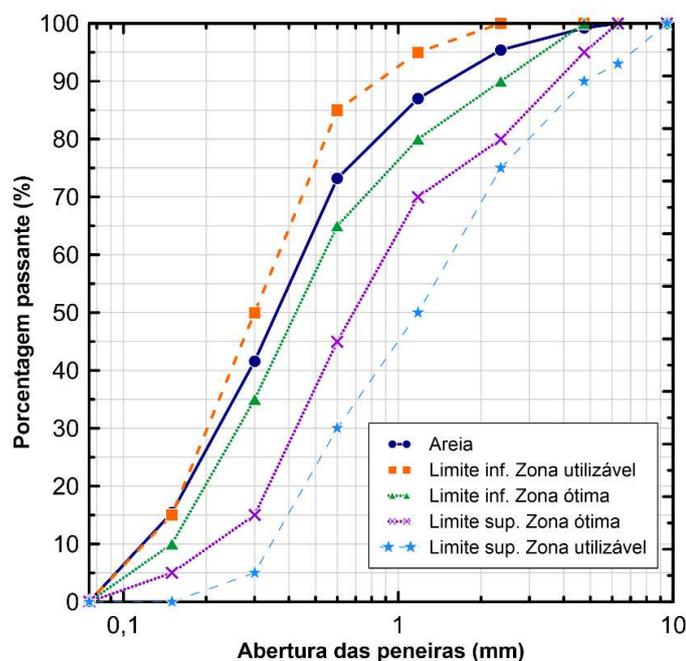
Propriedades	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Dimensão máxima do agregado e Módulo de finura	NBR 16916 (2021) e NBR 7211 (2019)	NBR NM 248 (2003) e NBR 7211 (2019)
Massa específica	NBR 16916 (2021)	NBR 16917 (2021)

O ensaio de granulometria da brita e da areia seguiu as orientações das normas NBR NM 248 (2003) e NBR 7211 (2019), respectivamente. Os resultados são apresentados junto aos limites inferiores e superiores de norma, nos Gráficos 11 e 12.

**Gráfico 11.** Curva granulométrica da brita.



**Gráfico 12.** Curva granulométrica da areia.



A brita utilizada neste trabalho possui dimensão máxima de 19 mm, e módulo de finura de 6,99.

A areia utilizada possui dimensão máxima característica de 4,75 mm e módulo de finura de 1,88. Deste modo, o módulo de finura do agregado miúdo está dentro da zona utilizável inferior (1,55 a 2,20), conforme apresentado na NBR 7211 (2019).

A determinação da massa específica da brita seguiu as orientações da norma NBR 16917 (2021), obtendo-se o valor de 2,82 g/cm<sup>3</sup>, e a determinação da massa específica da areia foi obtida segundo a norma NBR 16916 (2021), com o valor de 2,61 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.1.2. Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi do tipo CPV-ARI, de massa específica de 2,99 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.1.3. Aditivo

Para a produção do concreto foi utilizado o aditivo superplastificante à base de policarboxilato, o ADVA CAST 525 (foi desenvolvido para dar maior trabalhabilidade sem causar a segregação do concreto). As propriedades do aditivo são apresentadas na Tabela 16.

**Tabela 16.** Propriedades do aditivo superplastificante.

Nome	ADVA CAST 525
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	1,040 – 1,060
Aspecto	Líquido
Cor	Alaranjado
Dosagem (% sobre a massa de cimento)	0,40 a 1,2%

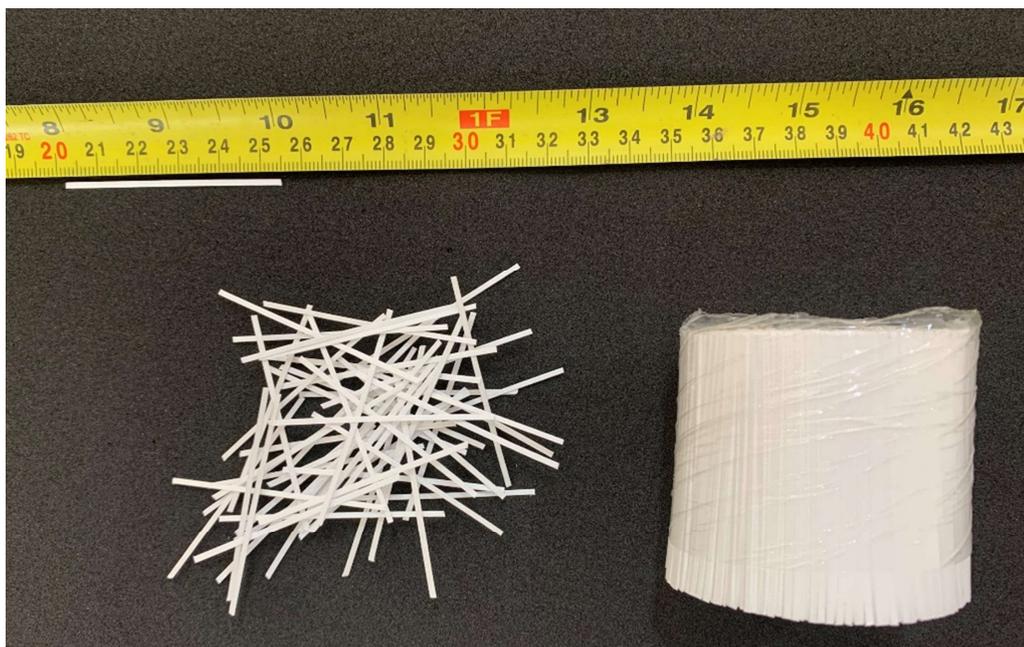
Fonte: *GCP Applied Technologies Inc* (2021).

As barras de aço utilizadas como porta estribo e armadura construtiva são do tipo CA-60, com tensão de escoamento de 60 kN/cm<sup>2</sup>.

### 3.1.4. Fibras descontínuas

Nesta pesquisa foi utilizada a macrofibra de polipropileno KraTos Macro. A fibra é apresentada na Figura 20, e suas propriedades na Tabela 17.

**Figura 20.** Macrofibra de polipropileno KraTos Macro.



**Tabela 17.** Propriedades da macrofibra KraTos Macro fornecidas pelo fabricante.

KraTos Macro	Características e propriedades
Classe da fibra	EN 14889-2 Classe II
Material	Polipropileno
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	0,91
Comprimento (mm)	54-40
Resistência à tração (MPa)	550
Resistência aos álcalis	Excelente
Resistência à corrosão	Excelente
Temperatura de fusão (°C)	160

Fonte: KORDSA (2021).

### 3.2. Caracterização do concreto com e sem fibra

O traço unitário em massa utilizado para o concreto foi de 1:2,02:2,5:0,5. Sua dosagem se encontra na Tabela 18 e apresenta a quantidade de material consumido para 1m<sup>3</sup> de concreto com e sem adição de fibra.

**Tabela 18.** Dosagem dos concretos com e sem adição de fibra.

Concreto	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Água (Kg/m <sup>3</sup> )	Agregados (Kg/m <sup>3</sup> )		Aditivo (Kg/m <sup>3</sup> )	Fibra (kg/m <sup>3</sup> )
			Areia	Brita		
Sem fibra	400,8	200,4	809,6	1002,0	-	-
Com fibra	396,8	198,4	801,6	992,0	-	9,1

O processo de mistura dos concretos com fibras foi realizado da seguinte maneira:

- 1) Adição de todo o agregado graúdo seco e de 1/3 do volume de água. Tempo de mistura: 2 minutos;
- 2) Adição de todo o cimento e de 1/3 do volume de água. Tempo de mistura: 2 minutos;
- 3) Adição de todo o agregado miúdo, do restante da água e de 1/2 das fibras de maneira uniforme. Tempo de mistura: 2 minutos;
- 4) Adição do aditivo. Tempo de mistura: 5 minutos;
- 5) Adição do restante das fibras de maneira uniforme. Tempo de mistura: 3 minutos.

As concretagens foram executadas em dois dias. A Tabela 19 apresenta os ensaios realizados para a caracterização dos concretos com e sem adição de fibras.

**Tabela 19.** Relação de corpos de prova produzidos para cada ensaio, para o concreto com e sem adição de fibra, em um dia de moldagem.

ENSAIO	NORMA	Nº. DE CORPOS DE PROVA	TIPO DE CORPO DE PROVA
Consistência pelo abatimento de tronco de cone	NBR 16889/2020	-	-
Resistência à compressão do concreto	NBR 5739/2018	5	Cilíndrico (10 x 20 cm)
Resistência à tração por flexão do concreto	NBR 12142/2010	5	Prismático (10 x 10 x 40 cm)
Módulo de elasticidade do concreto	NBR 8522/2017	5	Cilíndrico (10 x 20 cm)
Resistência à tração por flexão (apenas para o concreto com fibra)	NBR 16940/2021	4	Prismático (15 x 15 x 55 cm)

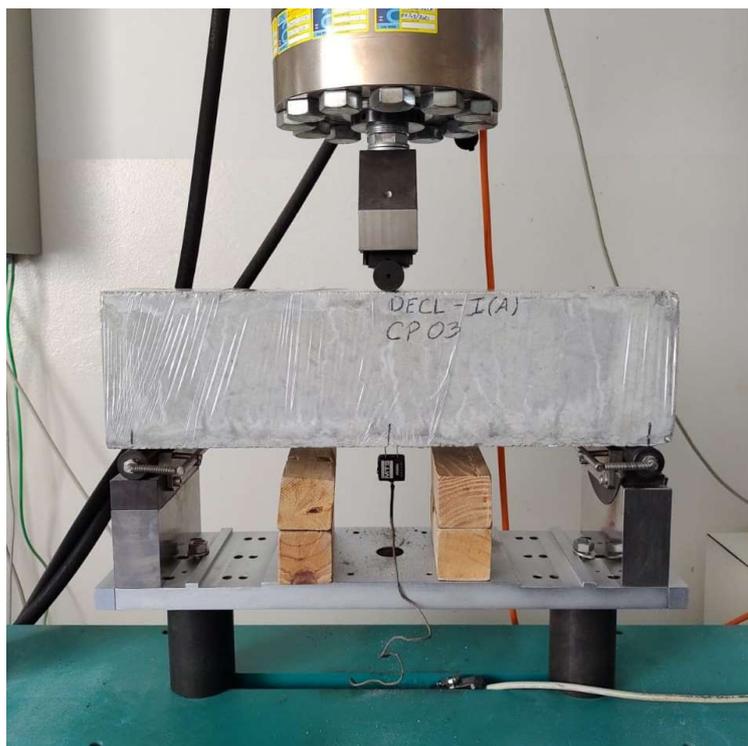
### 3.2.1. Ensaio de resistência à tração por flexão (ABNT NBR 16940)

O ensaio de resistência à tração por flexão para a obtenção do limite de proporcionalidade e residual, conforme a ABNT NBR 16940, foi realizado em corpo de prova com dimensões de 15 cm x 15 cm x 55 cm, com um entalhe no centro de 5mm de espessura e 25 mm de altura. Nos ensaios de tração por flexão para obtenção das resistências à tração ( $f_L$ ) e residuais ( $f_R$ ), o vão de ensaio foi de 500 mm.

O equipamento utilizado foi uma prensa dinâmica INTERMETRIC IM750SRV. A taxa de aumento da medida da abertura da fissura (CMOD) foi constante de 0,05 mm/min até CMOD=0,1 mm. A partir de CMOD=0,1 mm a taxa de aumento do CMOD foi constante de 0,20 mm/min.

O esquema do ensaio é apresentado na Figura 21.

**Figura 21.** Esquema do ensaio de tração por flexão (ABNT NBR 16940).



### 3.3. Caracterização das barras de GFRP e BFRP

As barras de GFRP e BFRP utilizadas nesse trabalho foram fornecidas pela empresa Haizer Group. Para a confecção das barras foi empregado o processo de pultrusão de fibras e resinas epóxis (matriz polimérica, com endurecimento e pigmentação). As propriedades disponibilizadas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 20.

**Tabela 20.** Propriedades das barras de GFRP e BFRP fornecidas pelo fabricante.

Característica	Vergalhão de GFRP e BFRP
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,25 a 2,10
Limite de resistência à tração (MPa)	800 a 1300
Alongamento relativo (%)	2,2 a 2,7
Módulo de elasticidade (GPa)	50 a 67
Limite de resistência transversal (MPa)	150 a 180
Condutibilidade térmica	Não condutor
Resistência à corrosão	Não corrosivo

Fonte: Haizer Group (2020).

Para a caracterização das barras de GFRP e BFRP foi verificada, também em laboratório, a resistência à tração e módulo de elasticidade. Os diâmetros nominais analisados foram de 6 mm, 8 mm e 10 mm.

### 3.3.1. Ensaio de resistência à tração

O ensaio de resistência à tração das barras de GFRP e BFRP foi realizado com base na norma americana ASTM D7205/D7205M-06 (Revisada em 2016). Foram ensaiados cinco corpos de prova para cada diâmetro de barra.

Para a execução do ensaio de resistência à tração, foi necessário calcular o diâmetro efetivo das barras de GFRP e BFRP, de acordo com a norma ASTM D7205/D7205M-06 (Revisada em 2016). O diâmetro efetivo ( $d$ ) é obtido com o uso da Equação 37.

$$d = 2 \sqrt{(A/\pi)} \quad (37)$$

Onde:

$A$  = é a área nominal da seção transversal da barra, que corresponde ao volume dividido pelo comprimento médio da amostra.

O cálculo do desvio padrão ( $s$ ) é feito por meio da Equação 38, enquanto que o coeficiente de variação (CV) é obtido da Equação 39.

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (38)$$

Onde  $x_i$  = dado da série;  $\bar{x}$  = média aritmética da série;  $n$  = número de amostras.

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} 100 \quad (39)$$

A Tabela 21 apresenta os resultados do ensaio de diâmetro efetivo das barras de GFRP e BFRP.

**Tabela 21.** Resultado do ensaio de diâmetro efetivo das barras de GFRP e BFRP.

Material	Diâmetro nominal (mm)	Diâmetro efetivo médio (mm)	Desvio padrão (mm)	Coeficiente de variação	Área efetiva (mm <sup>2</sup> )	Limites de área efetiva (mm <sup>2</sup> ) Prática Recomendada (2021)	
						Mínimo	Máximo
GFRP	6,0	6,44	0,20	3,0	32,57	26,5	48,6
	8,0	7,60	0,25	3,3	45,36	47,3	80,0
	10,0	10,50	0,24	2,3	86,59	74,1	115,1
BFRP	6,0	6,50	0,08	1,0	33,18	26,5	48,6
	8,0	7,80	0,006	0,1	47,78	47,3	80,0
	10,0	10,10	0,08	0,8	80,12	74,1	115,1

A resistência à tração das barras de FRP foi calculada de acordo com a Equação 40 (ASTM D7205/D7205M-06, revisada em 2016).

$$F_{tu} = \frac{P_{max}}{A} \quad (40)$$

Onde:

$F_{tu}$  = Resistência à tração (MPa);

$P_{max}$  = Força máxima antes da ruptura (N);

$A$  = Área da seção transversal da barra (mm<sup>2</sup>).

Ao calcular a área efetiva da seção transversal das barras de GFRP e BFRP, todas se mostraram dentro do limite estabelecido pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), exceto pela barra de 8 mm de GFRP, que apresentou área efetiva inferior ao mínimo exigido em 4,1%.

O módulo de elasticidade das barras de FRP foi calculado segundo a norma ASTM D7205/D7205M-06 (Revisada em 2016), conforme a Equação 41. Para este cálculo, foi considerada a faixa de deformação recomendada, de 0,001 a 0,003.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (41)$$

Onde:

$E$  = módulo de elasticidade (MPa);

$\Delta\sigma$  = diferença de resistência à tração entre os pontos de deformação inicial e final (MPa);

$\Delta\varepsilon$  = diferença na deformação média entre o começo e o fim da faixa de deformação selecionada.

Diferentemente das barras de aço, as barras de FRP necessitam de ancoragem em suas extremidades para evitar que as garras da máquina de ensaio as esmaguem. Por esse motivo, as barras de FRP foram ancoradas com tubos metálicos do tipo schedule 40 com 1 polegada de diâmetro externo e 25 cm de comprimento. Para o preenchimento dos tubos, inicialmente optou-se por utilizar resina epóxi, pois pretendia-se reaproveitar os tubos para outros ensaios. Porém, devido à resina não ter apresentado boa trabalhabilidade, houve a formação de vazios no interior dos tubos, o que acarretou o escorregamento da barra durante o ensaio, inviabilizando a utilização desse material (Figura 22).

**Figura 22.** Resina epóxi utilizada como preenchimento dos tubos metálicos e a presença de vazios no interior do tubo.



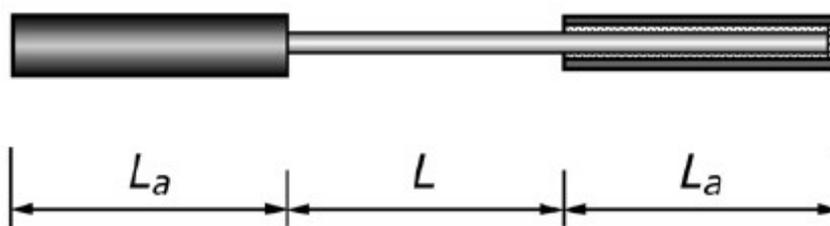
Então, optou-se pela argamassa expansiva, que é empregada para demolir rochas (Figura 23). A argamassa apresentou boa trabalhabilidade e também bom desempenho durante os ensaios, não havendo escorregamento da barra. Contudo, os tubos não puderam ser reaproveitados. Para a confecção da argamassa expansiva, utilizou-se a proporção de 1500 g de água para 5000 g do material pulverulento.

**Figura 23.** Argamassa expansiva utilizada para preenchimento dos tubos metálicos.



O ensaio foi realizado na prensa hidráulica Emic DL30000F. A Figura 24 apresenta a configuração do corpo de prova, onde  $L_a$  é o comprimento de ancoragem e  $L$  é o comprimento livre. A Tabela 22 exhibe as dimensões utilizadas para cada diâmetro ensaiado.

**Figura 24.** Dimensões do corpo de prova para o ensaio de resistência à tração de barras de FRP.



Fonte: ASTM D7205/D7205M-06 (Revisada em 2016).

**Tabela 22.** Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de resistência à tração das barras de FRP.

Diâmetro nominal da barra (mm)	Diâmetro externo do tubo de aço (pol.)	Comprimento do tubo de aço, $L_a$ (mm)	Comprimento livre, $L$ (mm)	Comprimento total do corpo de prova (mm)
6,0	1 ¼	250	340	840
8,0	1 ¼	250	420	920
10,0	1 ¼	250	500	1000

A Figura 25 apresenta o aparato utilizado no processo de ancoragem das barras.

**Figura 25.** Aparato utilizado no processo de confecção dos corpos de prova a serem utilizados no ensaio de tração.



Durante a moldagem, a argamassa expansiva se encontrava no estado líquido, e foi necessário empregar tampas na parte inferior dos tubos para evitar seu vazamento. Na parte superior, a tampa teve a função de manter a barra alinhada no interior do tubo.

Após o posicionamento do corpo de prova no equipamento, o extensômetro foi colocado no centro do comprimento livre da barra, como mostra a Figura 26. O modelo do extensômetro utilizado foi o EE-GL-10 N. 203201, de base variável e deslocamento de 10 mm. A velocidade do ensaio adotada foi de 3 mm/min, e o critério de parada foi o rompimento da barra.

**Figura 26.** Posicionamento do corpo de prova e do extensômetro para a realização do ensaio de resistência à tração.



Por meio do ensaio obtiveram-se os valores de resistência à tração, deslocamento e módulo de elasticidade da barra. O ensaio é validado quando a barra apresentar ruptura no comprimento livre, que diz respeito à posição fora da região de ancoragem, tal como apresentado na Figura 27.

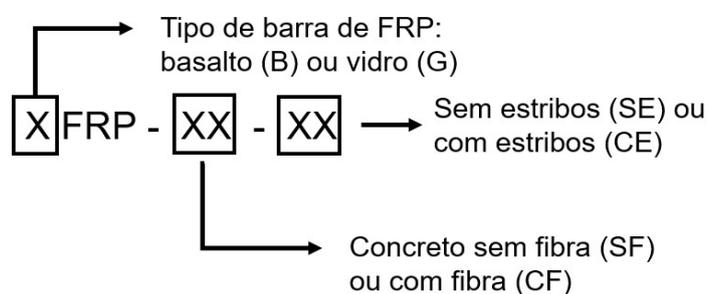
**Figura 27.** Ruptura da barra fora da região de ancoragem para validação do ensaio de resistência à tração.



### 3.4. Substituição parcial e total da armadura de cisalhamento por fibra em vigas de concreto armado com barras de GFRP e BFRP

Para a identificação das vigas armadas ensaiadas foi criada uma nomenclatura, conforme a Figura 28, em que é indicado o material da armadura longitudinal e transversal (GFRP e BFRP), o tipo de concreto (com e sem adição de fibra) e a presença (c/e) ou ausência (s/e) dos estribos. Como por exemplo: a viga GFRP-CF-SE é uma viga armada com barras longitudinais de GFRP, concreto com adição de fibras e sem armadura transversal.

**Figura 28.** Nomenclatura das vigas.



O dimensionamento das vigas armadas com barras de GFRP ou BFRP foi realizado a partir da definição das dimensões do elemento estrutural, da classe de resistência do concreto (estimada em 40 MPa) e do arranjo de armadura longitudinal, composto por cinco barras de 10 mm de diâmetro.

O arranjo de armaduras foi verificado por meio do dimensionamento orientado pela norma ACI 440.1R-15 e da Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), considerando os valores característicos das propriedades dos materiais, ou seja, sem coeficientes de ponderação. Então, foram encontrados dois valores de momentos nominais, e a partir deles, dois valores de cortantes nominais.

Para a definição da armadura insuficiente ao cisalhamento, consideraram-se as cortantes nominais encontradas como sendo as cortantes solicitantes, e a partir delas, obtiveram-se os respectivos espaçamentos máximos entre estribos. Com isso, determinou-se o espaçamento da armadura transversal para induzir a ruptura por cisalhamento do elemento estrutural. O Apêndice A apresenta o memorial de cálculo dos dimensionamentos descritos anteriormente.

A Tabela 23 apresenta os principais dados sobre os dimensionamentos, considerando os valores característicos.

**Tabela 23.** Dimensionamento das vigas de acordo com a ACI 440.1R-15 e Prática Recomendada (2021).

ID viga	$A_f$ (cm <sup>2</sup> )	$A_{fv/s,adot}$ (cm <sup>2</sup> /cm)	ACI 440.1R-15				Prática Recomendada (2021)			
			$\rho_f/\rho_{fb}$	$V_n$ (kN)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	$A_{fv/s,adot}/A_{fv/s}$	$\rho_f/\rho_{fb}$	$V_{rd3}$ (kN)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	$A_{fv/s,adot}/A_{fv/s}$
GFRP-SF-SE		-	3,00	82,20	7,49	-	2,51	89,36	9,75	-
GFRP-SF-CE	4,33	0,043	3,00	82,20	7,49	0,36	2,51	89,36	9,75	0,43
GFRP-CF-SE		-	3,00	82,20	7,49	-	2,51	89,36	9,75	-
GFRP-CF-CE		0,043	3,00	82,20	7,49	0,36	2,51	89,36	9,75	0,43
BFRP-SF-SE		-	2,47	80,34	7,86	-	2,08	87,39	12,29	-
BFRP-SF-CE	4,01	0,046	2,47	80,34	7,86	0,38	2,08	87,39	12,29	0,59
BFRP-CF-SE		-	2,47	80,34	7,86	-	2,08	87,39	12,29	-
BFRP-CF-CE		0,046	2,47	80,34	7,86	0,38	2,08	87,39	12,29	0,59

$A_f$  = área de armadura de FRP na região de tração;

$A_{fv/s,adot}$  = área de armadura transversal por unidade de comprimento do elemento estrutural para resistência ao cortante adotada para as vigas;

$\rho_f/\rho_{fb}$  = relação entre a taxa de armadura longitudinal e a taxa de armadura balanceada;

$V_n$  = cortante nominal

$S_{m\acute{a}x}$  = espaçamento máximo entre estribos;

$A_{fv/s}$  = área de armadura transversal por unidade de comprimento do elemento estrutural para resistência ao cortante;

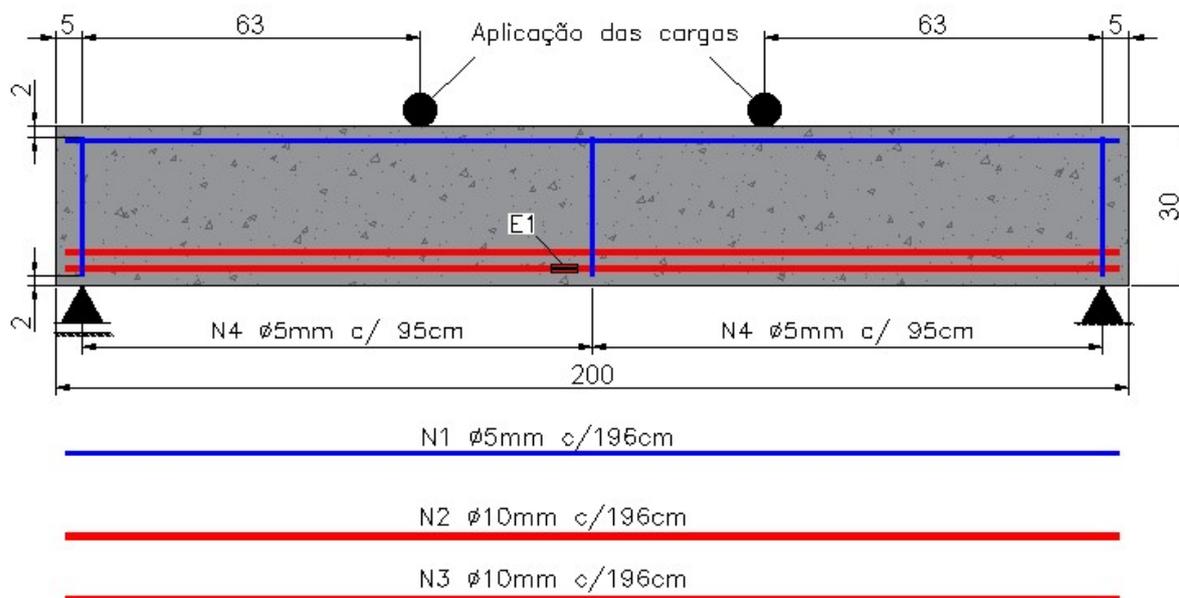
$V_{Rd3}$  = força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal.

As vigas possuem seção transversal de 15 cm por 30 cm, comprimento de 200 cm e vão livre de 190 cm, sendo que ambas as cargas concentradas são aplicadas a 63 cm de cada apoio. A relação entre a altura útil das vigas e o vão de cisalhamento ( $a/d$ ) utilizada foi de aproximadamente 2,5, para garantir a ruptura por cisalhamento.

As Figuras 29 e 30 apresentam as configurações das armaduras sem e com estribos, respectivamente, para as vigas armadas com barras longitudinais e estribos de GFRP ou BFRP.

A armadura longitudinal é composta por cinco barras de 10 mm (N2 e N3) de BFRP ou GFRP, e porta estribos compostos por duas barras de aço de 5,0 mm de diâmetro (N1). Os estribos de aço de 5 mm de diâmetro (N4), espaçados a 95 mm, foram utilizados apenas como armadura construtiva para garantir o posicionamento das barras longitudinais na forma de moldagem.

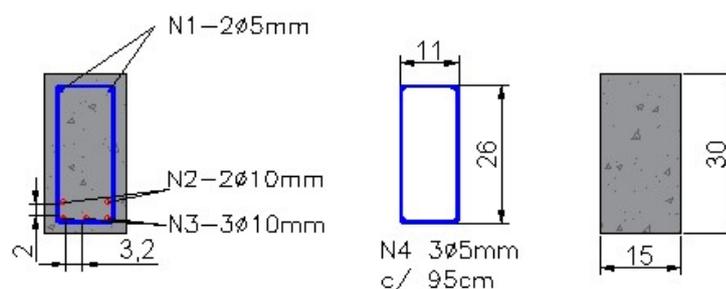
**Figura 29.** Detalhamento da armadura sem estribos de FRP.



Unidade em cm.

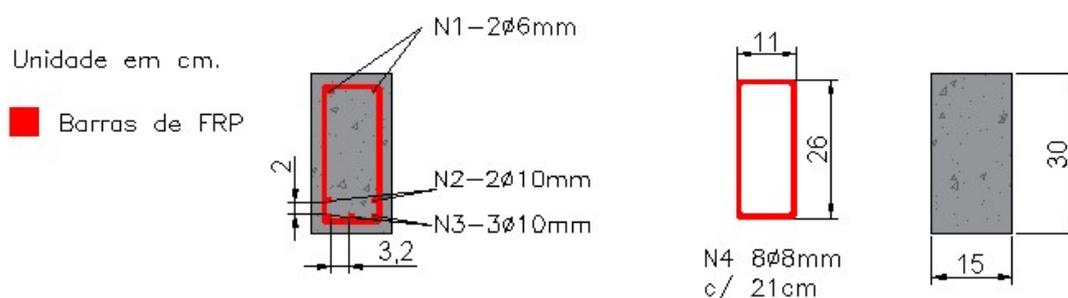
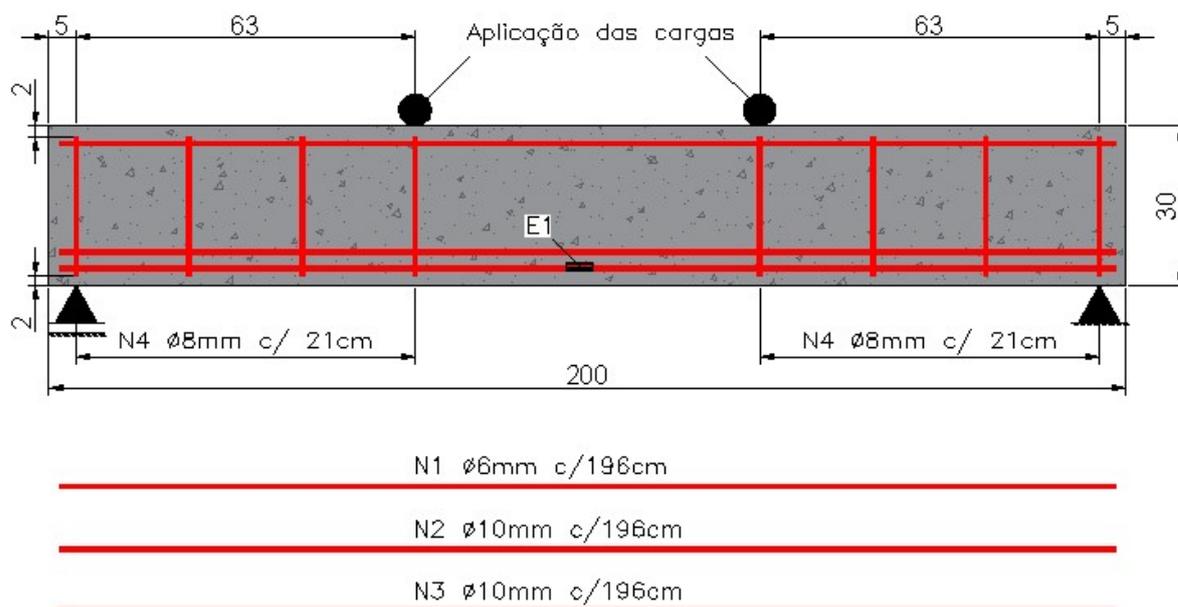
■ Barras de FRP

■ Barras de aço



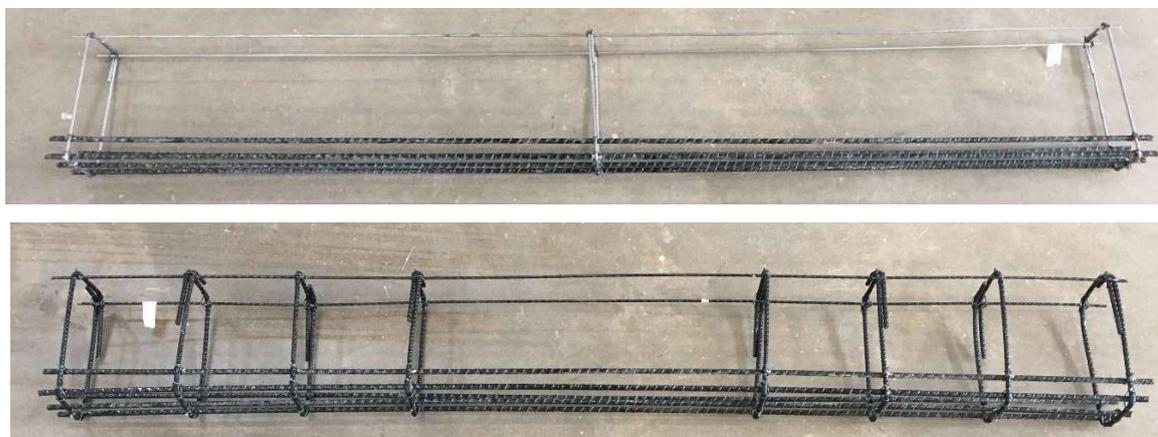
A Figura 30 apresenta a configuração da armadura com estribos. A armadura longitudinal é composta por cinco barras de 10 mm (N2 e N3), porta estribos compostos por duas barras de 6,0 mm de diâmetro (N1), de GFRP ou BFRP. A armadura transversal é constituída de 8 estribos de 8,0 mm de diâmetro (N4) de GFRP ou BFRP, espaçados a 21 cm. O trecho entre pontos de aplicação das cargas não apresenta armadura transversal.

**Figura 30.** Detalhamento da armadura com estribos de GFRP e BFRP.



A Figura 31 apresenta os arranjos de armaduras já montados.

**Figura 31.** Armaduras das vigas



A sigla E1 indica os extensômetros aplicados nas duas barras longitudinais das extremidades, de modo que os extensômetros ficaram localizados o mais próximo do centro do vão da viga.

Os extensômetros utilizados na armadura longitudinal são do modelo PA-06-125BA-120-L (Figura 32)

**Figura 32.** Extensômetro aplicado na armadura longitudinal.



Para a fixação dos extensômetros, inicialmente foi necessário lixar a região de contato, para retirar a resina. Após lixada, a região de contato foi higienizada com álcool e posteriormente o extensômetro foi fixado com supercola, como pode ser observado nas Figuras 33 e 34.

**Figura 33.** Região já lixada para aplicação do extensômetro.



**Figura 34.** Extensômetro fixado na barra.



A Figura 35 apresenta os extensômetros já conectados ao cabo manga de seis vias e prontos para serem utilizados.

**Figura 35.** Extensômetros conectados ao cabo de leitura.



Os extensômetros foram posicionados nas armaduras longitudinais para medições das deformações utilizando-se o sistema de aquisição de dados Quantum X (DAQ), da HBM (Figura 36). A leitura dos resultados obtidos dos extensômetros e do transdutor de deslocamento foi feita por meio do programa CatmanEasy.

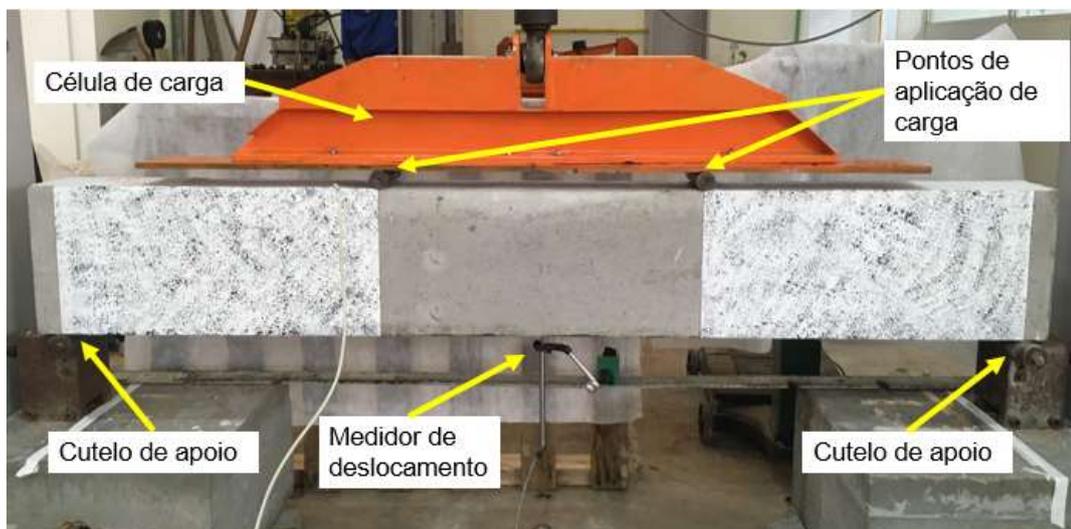
**Figura 36.** Sistema de aquisição de dados Quantum X (DAQ), HBM.



Os ensaios foram realizados em um pórtico com capacidade de carga de 50 toneladas, situado no Laboratório de Materiais da PUC-Campinas. O transdutor de deslocamento utilizado para medição da flecha é do modelo WA-50mm-T, da HBM. O

esquema do ensaio é apresentado na Figura 37, onde é observado o posicionamento da viga e da instrumentação utilizada.

**Figura 37.** Esquema do ensaio de flexão a quatro pontos.



Para a realização da cura do concreto, as vigas foram mantidas enformadas durante os 28 dias. A parte superior das vigas foi coberta por uma manta geotêxtil, que foi umedecida ao longo dos dias, e por um plástico, para impedir o contato do concreto com o ambiente e manter a umidade no interior da fôrma, conforme mostra a Figura 38.

**Figura 38.** Método empregado para a cura das vigas.



### 3.4.1. Correlação de imagem digital

A técnica de correlação de imagem digital (CID) consiste no registro e rastreamento de imagens de superfícies de interesse, que necessitam ser previamente preparadas de modo a apresentarem um conjunto padrão de pontos espaçados aleatoriamente. A partir da imagem da superfície no ponto inicial de ensaio (imagem de referência), e da imagem para uma determinada situação de carregamento e deformação de interesse, é feita a comparação entre as imagens, analisando a mudança de posicionamento do conjunto de pontos, e assim determina-se o campo de deslocamento e deformação na região desejada (REZENDE, 2020).

Neste trabalho, a técnica CID foi utilizada para medir a abertura das fissuras presentes nas vigas ensaiadas. Devido às vigas terem sido dimensionadas para romperem por cisalhamento, as áreas de interesse analisadas correspondem às superfícies delimitadas pelos cutelos de apoio e os pontos de aplicação de carga, totalizando duas áreas de 30cm x 63cm.

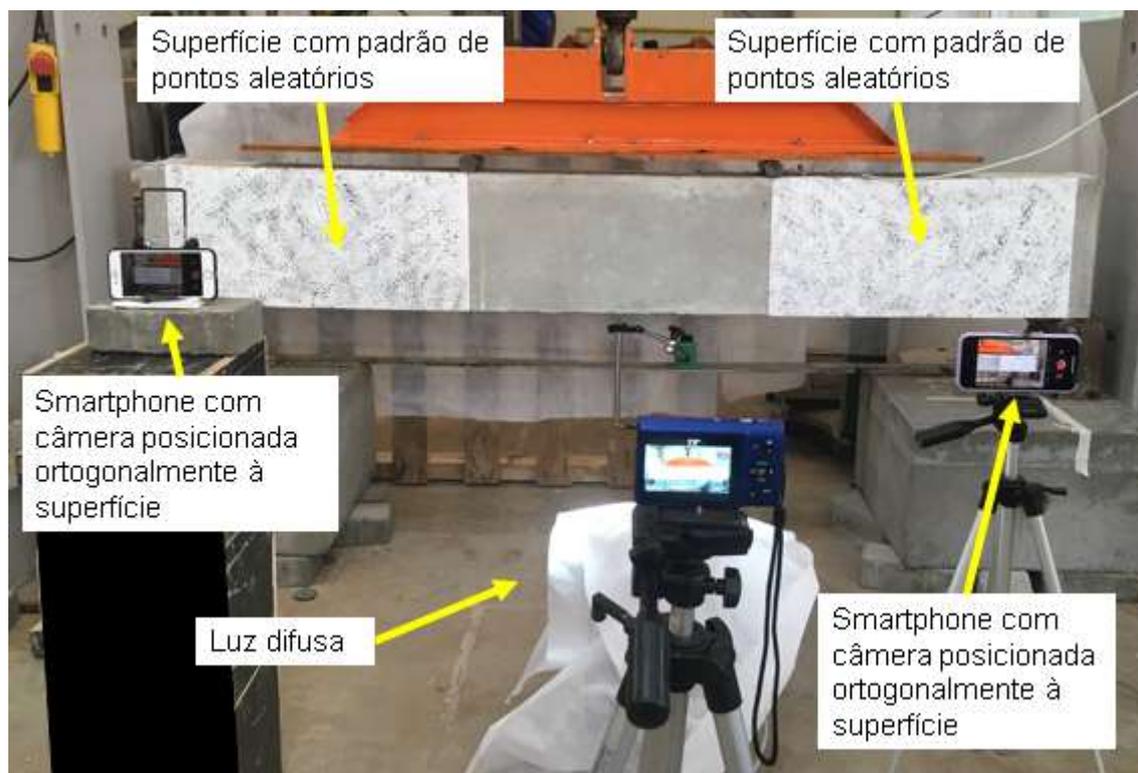
A preparação da superfície de interesse foi confeccionada por meio da pintura de toda a área com tinta branca fosca, e posteriormente, os pontos pretos foram feitos com tinta preta fosca, utilizando-se uma escova em formato de espiral.

Os celulares empregados para registrar as fotos possuem câmera de 12MP de resolução. Para o controle da velocidade de captura das fotos, utilizou-se o aplicativo *Lens Buddy*, e definiu-se o intervalo de captura entre as fotos como sendo de 5 segundos. Para a realização da análise de correlação de imagens foi utilizado o software *GOM Correlate*.

Para garantir a adequada aquisição de dados, alguns cuidados foram tomados, como o controle da exposição da superfície à luz, por meio de um refletor coberto por tecido TNT que promoveu a luz difusa necessária, e também o posicionamento da câmera ortogonalmente à superfície de análise.

A Figura 39 apresenta o posicionamento dos equipamentos para obtenção das imagens durante o ensaio.

**Figura 39.** Posicionamento dos equipamentos para aplicação da técnica CID.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o programa experimental, foram realizados os ensaios de caracterização das barras de GFRP e BFRP (resistência à tração, módulo de elasticidade e tensão de aderência), caracterização do concreto (resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração na flexão) e flexão a quatro pontos de vigas de concreto armado com barras de GFRP e BFRP.

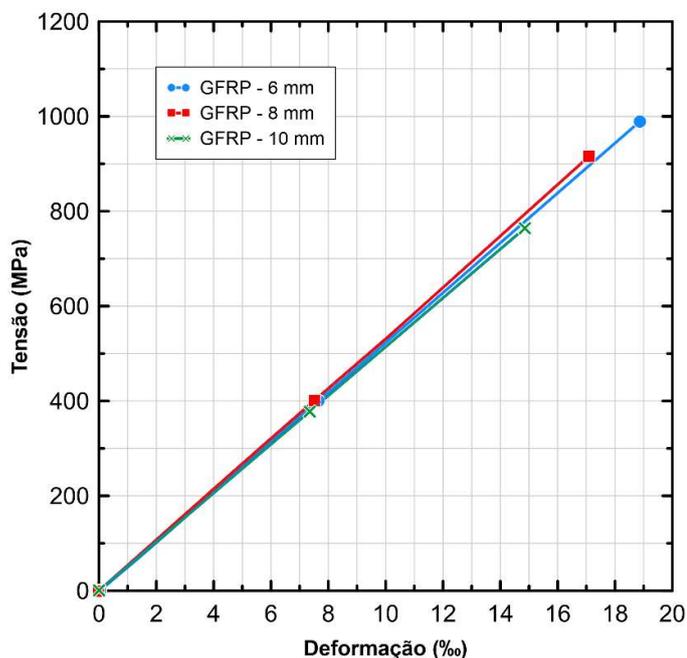
Para os ensaios de caracterização das barras de FRP e do concreto foi realizada uma análise estatística dos dados, por meio da aplicação do critério de Chauvenet, para eliminar os dados espúrios e a análise de variância ANOVA, observando o p-valor. O p-valor pequeno ( $\leq 5\%$ ) indica uma forte evidência para rejeição da hipótese verificada. Os resultados dos ensaios apresentados a seguir foram obtidos aos 28 dias de idade.

### 4.1. Caracterização das barras de GFRP e BFRP

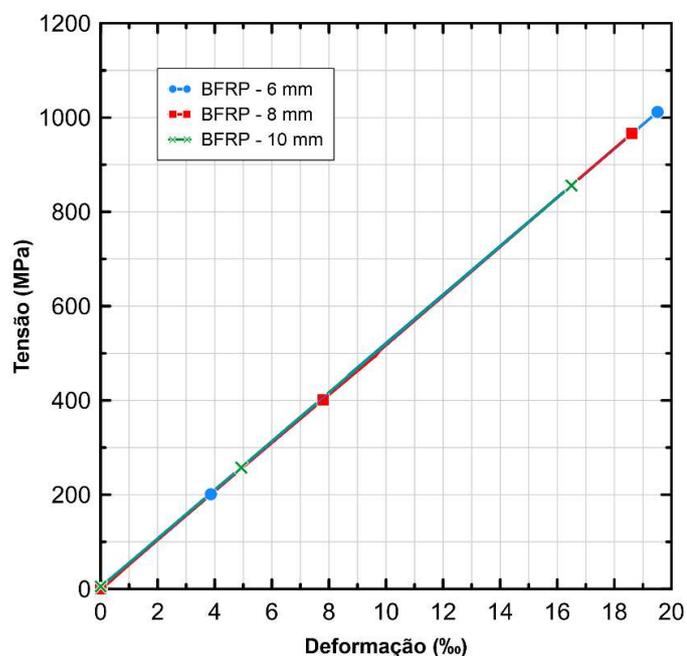
#### 4.1.1. Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração das barras de GFRP e BFRP foi realizado de acordo com a norma ASTM D7205/D7205M-06 (Revisada em 2016). Os Gráficos 13 e 14 apresentam as curvas médias de resistência à tração *versus* deformação das barras de GFRP e BFRP, respectivamente. Ao observar os gráficos, nota-se o comportamento elástico-linear das barras até a ruptura, que é considerado uma característica dos materiais frágeis.

**Gráfico 13.** Comparação entre as curvas de tensão *versus* deformação referentes ao ensaio de resistência à tração das barras de GFRP, para diferentes diâmetros.



**Gráfico 14.** Comparação entre as curvas de tensão *versus* deformação referentes ao ensaio de resistência à tração das barras de BFRP, para diferentes diâmetros.



Os resultados do ensaio para as barras de GFRP e BFRP são apresentados na Tabela 24.

**Tabela 24.** Resultado do ensaio de resistência à tração das barras de GFRP e BFRP.

Material	Diâmetro nominal (mm)	Diâmetro efetivo (mm)	Resistência média à tração (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
GFRP	6,0	6,44	1033,036	46,732	4,524
	8,0	7,60	1085,670	82,146	7,566
	10,0	10,50	997,105	14,985	1,503
BFRP	6,0	6,50	1039,367	6,338	0,610
	8,0	7,80	1013,597	10,776	1,063
	10,0	10,10	1012,920	36,699	3,623

Com a análise de variância (ANOVA) pôde-se observar que os valores médios de resistência à tração para as barras de diferentes diâmetros, quando comparadas, não apresentaram diferenças significativas. Assim como Benmokrane *et al.* (2017) constataram para barras de GFRP, pôde-se concluir que o aumento do diâmetro das barras de GFRP e BFRP não influenciou na resistência à tração.

Todos os diâmetros das barras de GFRP e BFRP avaliadas apresentaram resistência média à tração superior ao mínimo exigido na Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) e fornecido pelo fabricante, que é de 800 MPa.

#### 4.1.2. Módulo de elasticidade

Os valores de módulo de elasticidade das barras de GFRP e BFRP foram obtidos por meio do ensaio de resistência à tração, com base na norma ASTM D7205/D7205M-06 (Revisada em 2016). A Tabela 25 apresenta os resultados médios calculados.

**Tabela 25.** Resultado do ensaio de módulo de elasticidade para as barras de GFRP e BFRP.

Material	Diâmetro nominal (mm)	Diâmetro efetivo (mm)	Módulo de elasticidade médio (GPa)	Desvio padrão (GPa)	Coefficiente de variação (%)
GFRP	6,0	6,44	52,077	0,801	1,538
	8,0	7,60	53,424	0,961	1,800
	10,0	10,50	51,713	4,319	8,353
BFRP	6,0	6,50	52,184	1,460	2,798
	8,0	7,80	52,277	3,131	5,989
	10,0	10,10	52,588	2,466	4,689

Em relação às barras de GFRP e BFRP, não houve diferença significativa entre os valores de módulo de elasticidade para todos os diâmetros analisados. A partir deste resultado, pôde-se concluir que o aumento do diâmetro das barras de GFRP e BFRP não influenciou no módulo de elasticidade das barras. De acordo com Kocaoz *et al.* (2005) e Benmokrane *et al.* (2017), o módulo de elasticidade não é afetado significativamente pela área da seção transversal da barra, mas sim pela porcentagem de fibra contida na barra.

Todos os diâmetros das barras que foram analisadas, dos materiais GFRP e BFRP, apresentaram módulo de elasticidade médio superior ao valor mínimo exigido na Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) e fornecido pelo fabricante, que é de 50 GPa, e superior à 44,8 GPa, que é o valor mínimo exigido pela ASTM D7957/D7957M-17.

## 4.2. Caracterização do concreto

Para a moldagem das vigas foram necessários dois dias de concretagem. No primeiro dia, foram concretadas as vigas armadas com barras de GFRP, com e sem fibras (os concretos serão nomeados: Concreto<sub>GFRP-CF</sub> e Concreto<sub>GFRP-SF</sub>), além dos corpos de prova para a caracterização do concreto. Já no segundo dia, foram concretadas as vigas armadas com barras de BFRP, com e sem fibra (os concretos serão nomeados: Concreto<sub>BFRP-CF</sub> e Concreto<sub>BFRP-SF</sub>), assim como os corpos de prova para a caracterização do concreto. Para a caracterização, foram realizados os ensaios de consistência pelo abatimento de tronco de cone, resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração por flexão de acordo com a ABNT NBR 12142 (2010) e resistência à tração por flexão segundo a ABNT NBR 16940 (2021).

### 4.2.1. Consistência pelo abatimento de tronco de cone (ABNT NBR 16889)

A Tabela 26 e as Figuras 40 e 41 apresentam o resultado de consistência para cada concreto produzido.

**Tabela 26.** Resultado ensaio de consistência.

Concreto	Aditivo (%)	Slump (mm)
Concreto <sub>GFRP-SF</sub>	-	180
Concreto <sub>GFRP-CF</sub>	0,3	140
Concreto <sub>BFRP-SF</sub>	-	200
Concreto <sub>BFRP-CF</sub>	0,2	140

**Figura 40.** Resultado do ensaio de consistência para os concretos Concreto<sub>GFRP-SF</sub> e Concreto<sub>GFRP-CF</sub>.



**Figura 41.** Resultado do ensaio de consistência para os concretos Concreto<sub>BFRP-SF</sub> e Concreto<sub>BFRP-CF</sub>.



#### **4.2.2. Resistência à compressão (ABNT NBR 5739), Módulo de elasticidade (ABNT NBR 8522) e Resistência à tração por flexão (ABNT NBR 12142)**

A Tabela 27 indica os resultados dos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração por flexão para cada concreto.

**Tabela 27.** Resultados dos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração na flexão dos concretos.

	$f_{c,m}$ Resistência à compressão média (MPa)	$E_{ci,m}$ Módulo de elasticidade médio (GPa)	$f_{t,m}$ Resistência à tração na flexão média (MPa)
Concreto <sub>GFRP-SF</sub>	49,20	34,22	5,83
Desvio padrão	1,35	0,65	0,68
CV (%)	2,75	1,90	11,75
Concreto <sub>GFRP-CF</sub>	45,25	30,98	5,60
Desvio padrão	4,56	1,40	1,16
CV (%)	10,08	4,53	20,64
Concreto <sub>BFRP-SF</sub>	42,37	32,72	5,93
Desvio padrão	4,44	1,47	0,49
CV (%)	10,47	4,49	8,25
Concreto <sub>BFRP-CF</sub>	36,39	30,59	5,64
Desvio padrão	3,72	1,15	0,40
CV (%)	10,22	3,75	7,13

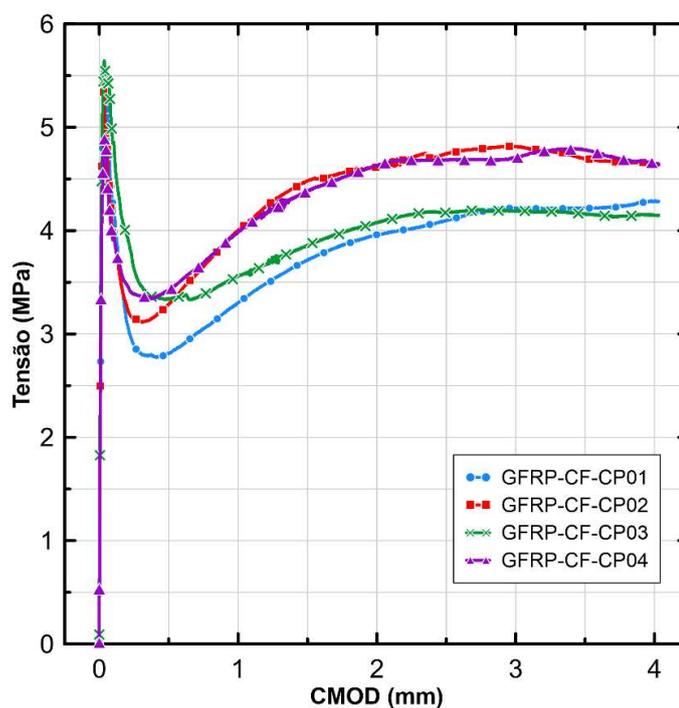
A partir da análise de variância (ANOVA), pôde-se observar que a adição de macrofibras de polipropileno no teor de 1% em volume de concreto, afetou a resistência à compressão média do Concreto<sub>BFRP-CF</sub>, que gerou uma redução de 14% em relação ao Concreto<sub>BFRP-SF</sub>. Também foi identificada uma diferença no módulo de elasticidade médio do Concreto<sub>GFRP-CF</sub>, que apresentou redução de 9,5% em relação ao Concreto<sub>GFRP-SF</sub>. Sobre a resistência à tração na flexão, a adição de fibras não afetou de maneira significativa os resultados dos concretos.

#### 4.2.3. Resistência à tração por flexão (ABNT NBR 16940)

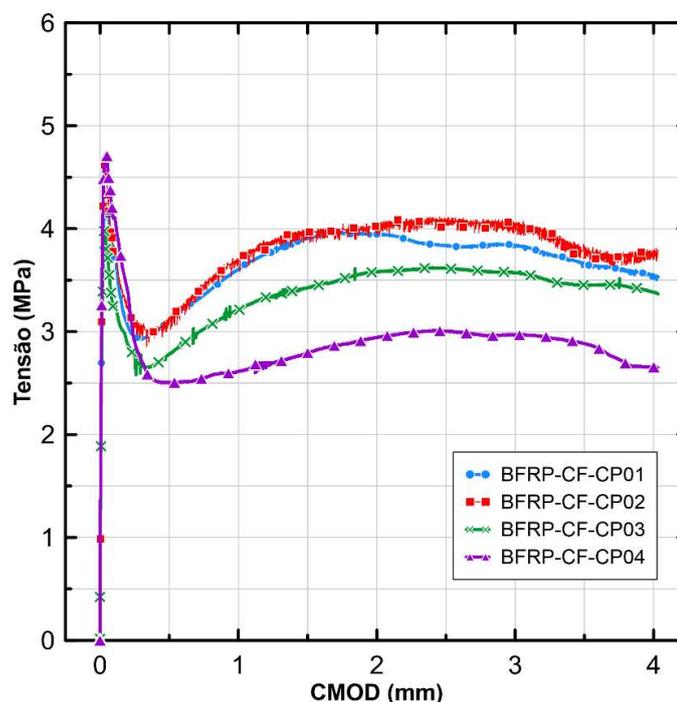
A Tabela 28 apresenta o resultado de resistência à tração por flexão para cada concreto com fibra produzido, enquanto os Gráficos 15 e 16 apresentam as curvas obtidas para cada concreto.

**Tabela 28.** Resultado do ensaio de resistência à tração na flexão.

Resistência à tração por flexão (MPa)							
Concreto <sub>GFRP-CF</sub>							
	$f_L$	$f_{R1}$	$f_{R2}$	$f_{R3}$	$f_{R4}$	$f_{R1}/f_L$	$f_{R3}/f_{R1}$
Média (MPa)	5,37	3,21	4,09	4,41	4,48	0,60	1,38
Desvio padrão (MPa)	0,32	0,27	0,38	0,34	0,33		
CV (%)	6,00	8,52	9,40	7,59	7,38		
Concreto <sub>BFRP-CF</sub>							
	$f_L$	$f_{R1}$	$f_{R2}$	$f_{R3}$	$f_{R4}$	$f_{R1}/f_L$	$f_{R3}/f_{R1}$
Média (MPa)	4,40	2,86	3,50	3,64	3,48	0,65	1,27
Desvio padrão (MPa)	0,36	0,28	0,54	0,46	0,41		
CV (%)	8,15	9,68	15,39	12,62	11,85		

**Gráfico 15.** Resultado do ensaio de resistência à tração por flexão do Concreto<sub>GFRP-CF</sub>.

**Gráfico 16.** Resultado do ensaio de resistência à tração por flexão do Concreto<sub>BFRP-CF</sub>.



A partir dos gráficos é possível notar que a adição de macrofibras de polipropileno no teor de 1% em volume de concreto proporcionou comportamento de *softening* para ambos os concretos. Após atingir o limite de resistência à tração do concreto, ocorreu a formação de fissuras na região do entalhe, diminuindo a capacidade resistente à tração do concreto, de forma a apresentar valores de resistência inferiores à resistência no limite de proporcionalidade. Porém, devido à adição das fibras de polipropileno, houve incremento significativo de resistência à tração pós-fissuração.

A presença das fibras proporcionou resistência residual à tração suficiente para o concreto atender aos requisitos da norma ABNT NBR 16935 (2021), para utilização como alternativa de substituição total ou parcial da armadura convencional em estruturas de concreto ( $f_{R1k}/f_{Lk} \geq 0,40$  e  $f_{R3k}/f_{R1k} \geq 0,50$ ).

As Figuras 42 e 43 apresentam a seção transversal dos corpos de prova do Concreto<sub>GFRP</sub> que tiveram menor (CP01) e maior (CP02) resistência residual à tração.

**Figura 42.** Seção transversal CP01 Concreto<sub>GFRP</sub>.



**Figura 43.** Seção transversal CP02 Concreto<sub>GFRP</sub>



A partir das imagens, é possível perceber a homogeneidade da distribuição das fibras ao longo de ambas as seções transversais, resultando em pequena variação dos resultados e melhor aproveitamento das fibras.

As Figuras 44 e 45 exibem a seção transversal dos corpos de prova do Concreto<sub>BFRP</sub> que apresentaram maior (CP02) e menor resistência (CP04).

**Figura 44.** Seção transversal CP02 Concreto<sub>BFRP</sub>.



**Figura 45.** Seção transversal CP04 Concreto<sub>BFRP</sub>.

Ao comparar as duas figuras, observa-se que a distribuição de fibras ao longo da seção do CP04 se deu de maneira heterogênea, com mais espaços vazios em relação à seção do CP02. Também se nota maior quantidade de fibras na seção do CP02, que em conjunto com a melhor distribuição, apresentou melhores resultados de resistência.

#### 4.3. Flexão a quatro pontos de vigas de concreto armado com barras de GFRP e BFRP.

A Tabela 29 apresenta o resultado dos ensaios das vigas armadas com barras de GFRP e BFRP.

**Tabela 29.** Resultados dos ensaios com vigas armadas com barras de GFRP e BFRP.

ID viga	$A_{ft}/s$ ( $\text{cm}^2/\text{cm}$ )	Carga última (kN)	$V_n$ experimental (kN)	Flecha máxima (mm)	Modo de ruptura
GFRP-SF-SE	-	70,23	35,11	10,66	Cisalhamento – ruptura diagonal
GFRP-SF-CE	0,043	167,50	83,75	29,84	Cisalhamento – ruptura do estribo
GFRP-CF-SE	-	125,39	62,68	18,89	Cisalhamento – ruptura diagonal
GFRP-CF-CE	0,043	198,92	99,46	35,95	Flexão por esmagamento do concreto
BFRP-SF-SE	-	66,08	33,04	13,25	Cisalhamento – ruptura diagonal
BFRP-SF-CE	0,046	145,10	72,55	33,42	Cisalhamento – ruptura do estribo
BFRP-CF-SE	-	105,98	52,99	17,20	Cisalhamento – ruptura diagonal
BFRP-CF-CE	0,046	178,19	89,10	43,58	Flexão por esmagamento do concreto

Com relação à carga última resistida pelas vigas, ao comparar as vigas sem estribos e com ou sem adição de fibras, GFRP-SF-SE e GFRP-CF-SE, nota-se que a adição de fibras descontínuas gerou um aumento da capacidade de carga de 78,5%. Já para as vigas com estribos e com e sem adição de fibras, GFRP-SF-CE e GFRP-CF-CE, as fibras aumentaram em 18,8% a capacidade de carga.

Sobre as vigas armadas com barras de BFRP, a viga BFRP-CF-SE apresentou aumento de capacidade de carga de 60,4% em relação à viga BFRP-SF-SE. A adição de fibras também proporcionou aumento de capacidade de carga para a viga BFRP-CF-CE, de 22,8% em relação à viga BFRP-SF-CE.

A respeito do modo de ruptura das vigas de concreto, nas Figuras 46 e 47 são apresentadas as vigas GFRP-SF-SE e BFRP-SF-SE, respectivamente. Como esperado, ambas as vigas exibiram ruptura frágil por cisalhamento, pela ausência de armadura transversal.

**Figura 46.** Modo de ruptura da viga GFRP-SF-SE.



**Figura 47.** Modo de ruptura da viga BFRP-SF-SE.

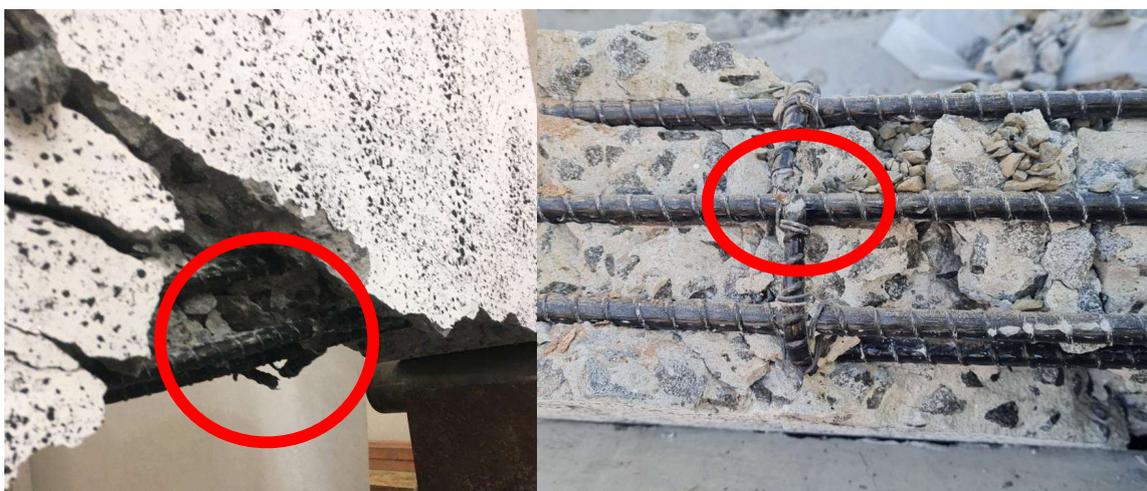


A Figura 48 exibe a deformação da viga GFRP-SF-CE, que apresentou ruptura por força cortante-tração com a ruptura do estribo, conforme mostra a Figura 49.

**Figura 48.** Modo de ruptura da viga GFRP-SF-CE.



**Figura 49.** Ruptura do estribo.



Em relação às vigas de concreto armado com barras de BFRP, a Figura 50 apresenta a deformação da viga BFRP-SF-CE. A ruptura ocorreu por força cortante-tração, com a ruptura do estribo (Figura 51). Devido à deformação excessiva da viga e dos estribos, a barra central da armadura longitudinal também se rompeu, como mostra a Figura 51.

**Figura 50.** Modo de ruptura da viga BFRP-SF-CE.



**Figura 51.** Ruptura do estribo.



As Figuras 52 e 53 apresentam a deformação das vigas GFRP-CF-SE e BFRP-CF-SE, respectivamente. Ambas as vigas apresentaram ruptura por cisalhamento, indicando que a substituição total dos estribos por macrofibras de polipropileno não foi suficiente para alterar o modo de ruptura frágil da estrutura por cisalhamento.

**Figura 52.** Modo de ruptura da viga GFRP-CF-SE.



**Figura 53.** Modo de ruptura da viga BFRP-CF-SE.



As Figuras 54 e 55 apresentam o modo de ruptura das vigas GFRP-CF-CE e BFRP-CF-CE, respectivamente. Ambas as vigas apresentaram ruptura à flexão por esmagamento do concreto. Esse resultado mostra que a substituição de parte dos

estribos por macrofibra de polipropileno promoveu a mudança do modo de ruptura frágil por cisalhamento, para um modo de ruptura pseudo-dúctil com o esmagamento do concreto.

**Figura 54.** Modo de ruptura da viga GFRP-CF-CE.

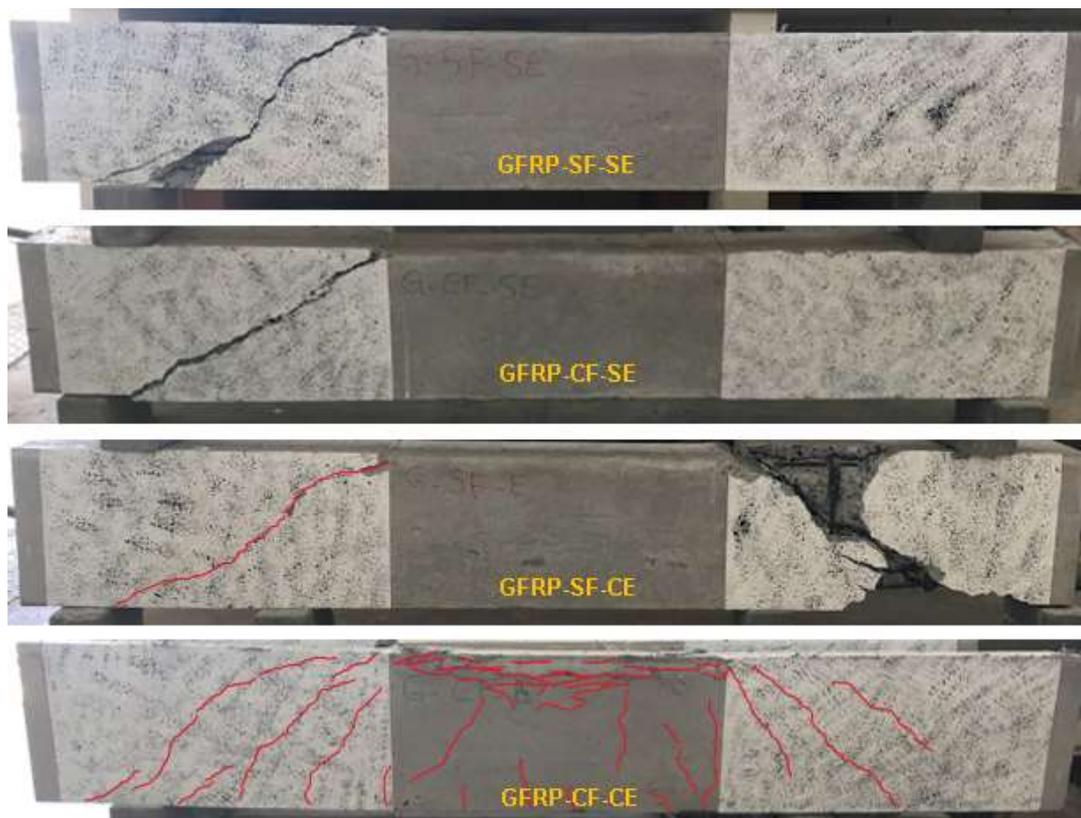


**Figura 55.** Modo de ruptura da viga BFRP-CF-CE.

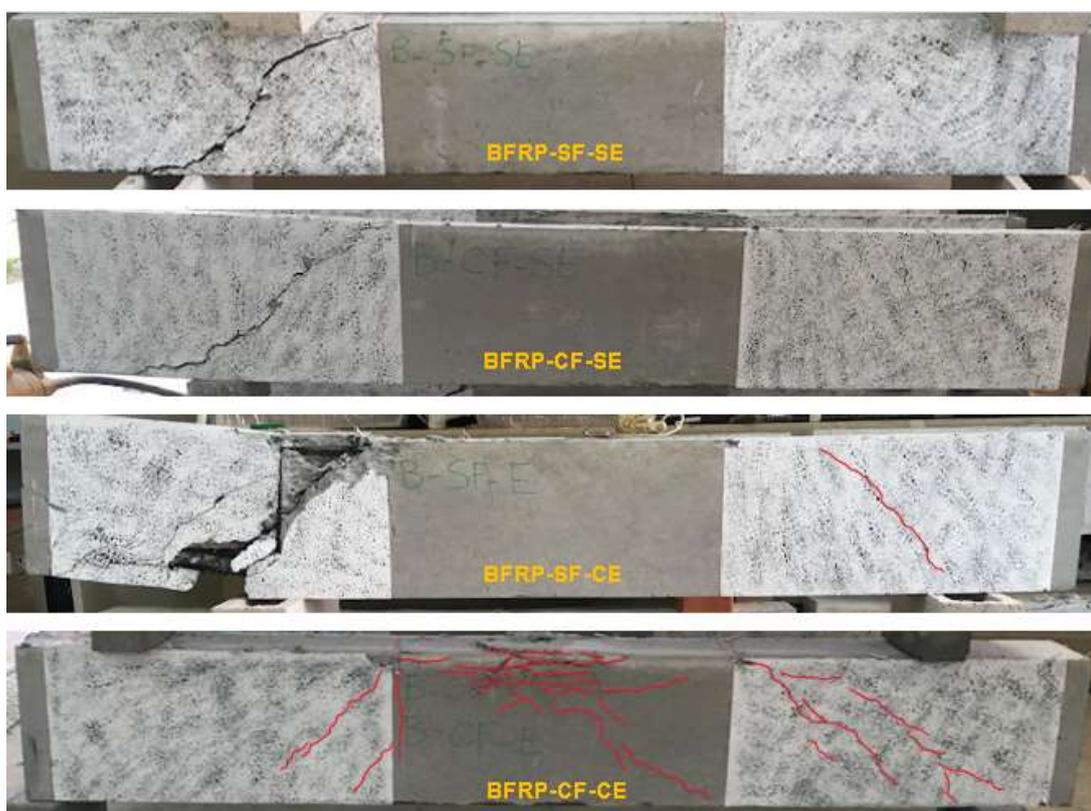


As Figuras 56 e 57 apresentam a comparação dos modos de ruptura das vigas armadas com barras de GFRP e BFRP, respectivamente. As vigas armadas com barras de BFRP apresentaram o mesmo comportamento das vigas armadas com GFRP. Quando comparadas às vigas sem estribos, com e sem adição de fibras, observa-se que a adição das fibras não foi suficiente para alterar o modo de ruptura frágil por cisalhamento. Por outro lado, ao se comparar as vigas com estribos, com e sem adição de fibras, é possível identificar o efeito das fibras na mudança do modo de ruptura frágil por cisalhamento, para ruptura pseudo-dúctil à flexão por esmagamento do concreto.

**Figura 56.** Comparação dos modos de ruptura das vigas armadas com barras de GFRP

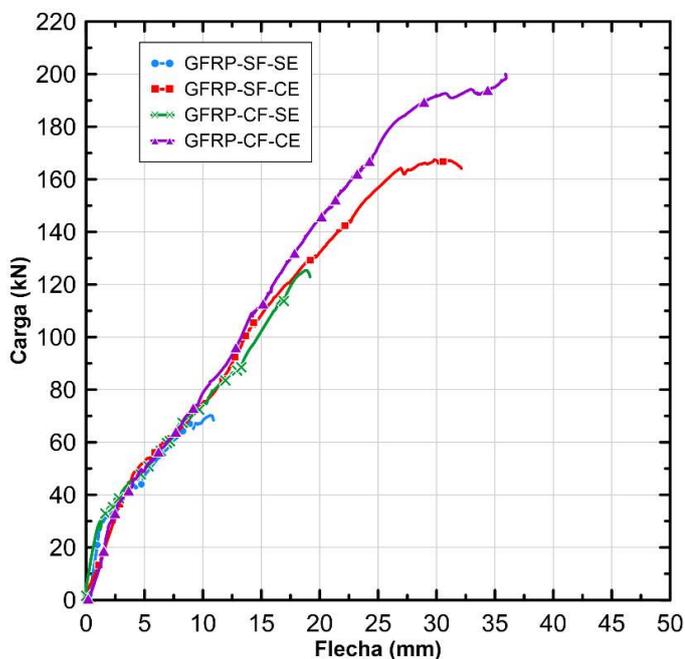


**Figura 57.** Comparação dos modos de ruptura das vigas armadas com barras de BFRP.

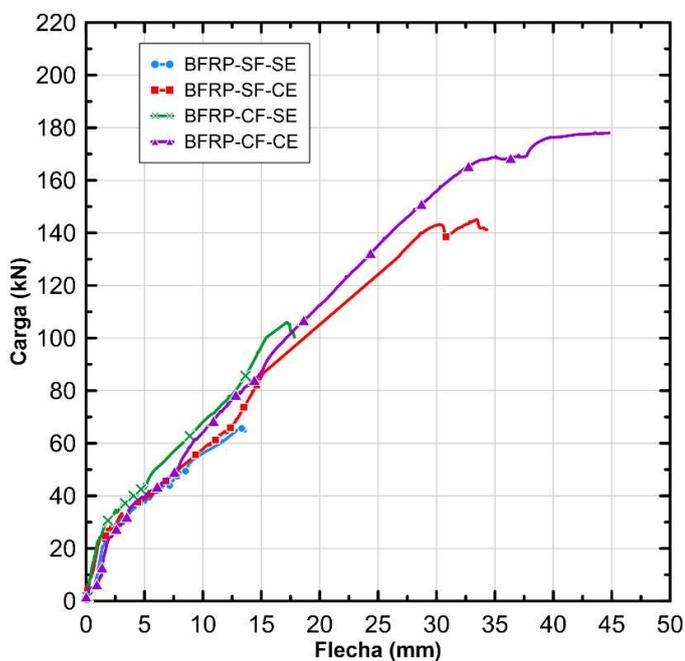


Os Gráficos 17 e 18 apresentam as curvas de Carga *versus* Flecha das vigas armadas com barras de GFRP e BFRP, respectivamente.

**Gráfico 17.** Carga x Flecha das vigas armadas com GFRP.



**Gráfico 18.** Carga x Flecha das vigas armadas com BFRP.



Assim como foi observado por Said *et al.* (2016), as vigas armadas com barras de GFRP e BFRP sem estribos apresentaram comportamento bilinear até a ruptura. Isso é resultado das propriedades mecânicas das barras de FRP, que exibem comportamento elástico linear até a sua ruptura, quando submetidas à tração.

Ao analisar as vigas GFRP-SF-CE e BFRP-SF-CE e as vigas GFRP-CF-CE e BFRP-CF-CE, todas elas apresentaram comportamento trilinear, de modo que a presença das fibras e dos estribos, com espaçamento excessivo, proporcionou maior ductilidade às vigas, podendo ser observado um aumento da deformação ao final do segundo estágio.

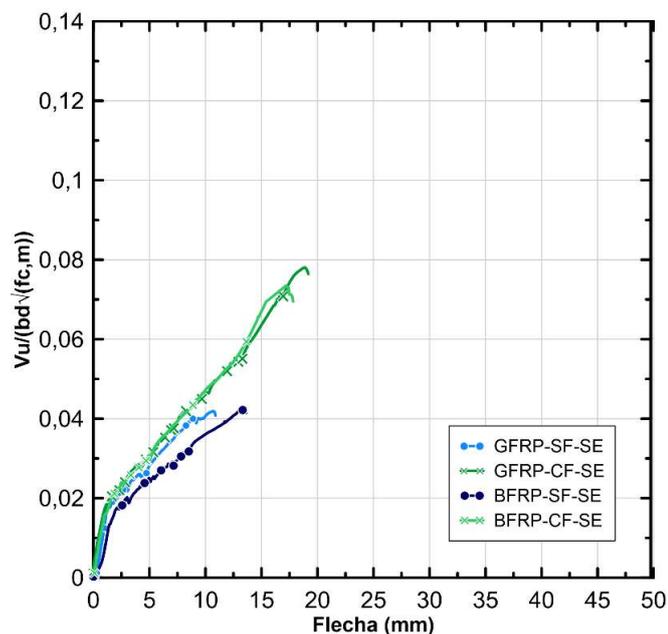
Para eliminar a variação da resistência à compressão do concreto, as cargas de cisalhamento obtidas dos ensaios experimentais foram normalizadas de acordo com a seguinte equação:  $\frac{V}{bd\sqrt{f_{c,m}}}$ , onde V é a carga de cisalhamento obtida no ensaio, b é a largura da viga, d é a altura útil da viga e  $f_{c,m}$  é a resistência à compressão média do concreto. A Tabela 30 apresenta os resultados de resistência ao cisalhamento normalizada para as vigas ensaiadas, e os Gráficos 19 e 20, apresentam as curvas de carga de cisalhamento normalizada *versus* deslocamento.

**Tabela 30.** Resultados de resistência ao cisalhamento normalizada.

ID viga	$f_{c,m}^*$ (MPa)	$V_U$ experimental (kN)	$\frac{V}{bd\sqrt{f_{c,m}}}$
GFRP-SF-SE	49,20	35,11	0,042
GFRP-SF-CE	49,20	83,75	0,100
GFRP-CF-SE	45,25	62,68	0,078
GFRP-CF-CE	45,25	100,01	0,124
BFRP-SF-SE	42,37	33,05	0,042
BFRP-SF-CE	42,37	72,56	0,093
BFRP-CF-SE	36,39	52,98	0,073
BFRP-CF-CE	36,39	89,08	0,124

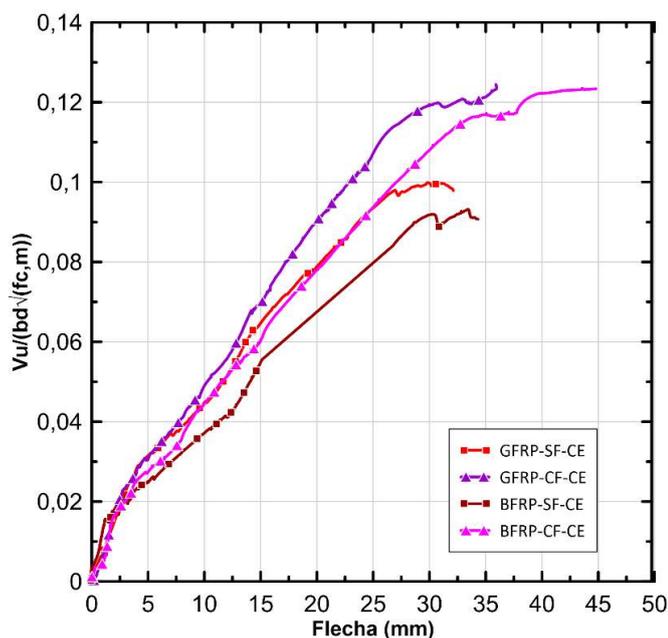
\* $f_{c,m}$  = resistência à compressão média do concreto

**Gráfico 19.** Curvas experimentais de carga de cisalhamento normalizada x deslocamento das vigas sem estribos.



Ao se comparar as vigas de GFRP e BFRP sem estribos e sem adição de fibras, é possível observar maior rigidez ao deslocamento da viga armada com GFRP, enquanto que para as vigas sem estribos e com adição de fibras, não houve diferença na rigidez ao deslocamento. A comparação também ilustra a proximidade dos resultados experimentais independentemente do tipo de barra utilizada como armadura.

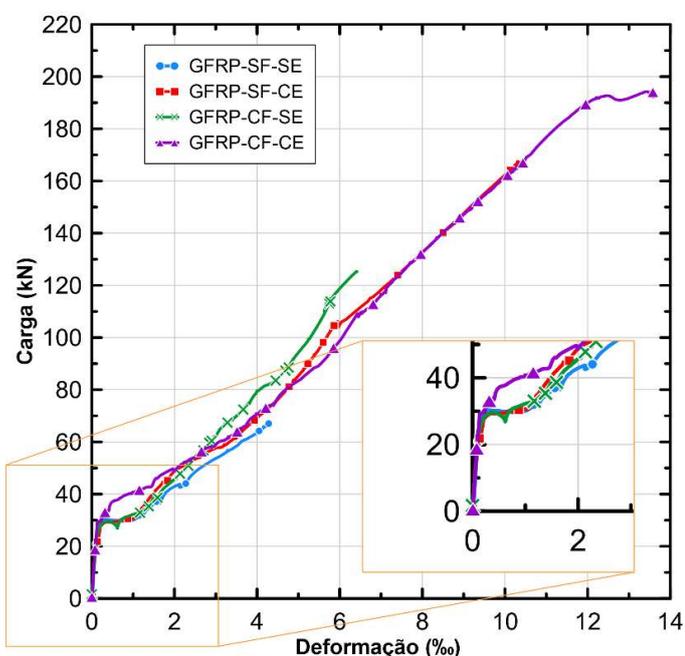
**Gráfico 20.** Curvas experimentais de carga de cisalhamento normalizada x deslocamento das vigas com estribos.



Por meio do Gráfico 20 é possível observar que as vigas armadas com barras longitudinais e estribos de GFRP (GFRP-SF-CE e GFRP-CF-CE) apresentaram maior rigidez ao deslocamento quando comparadas com as vigas armadas com barras longitudinais e estribos de BFRP (BFRP-SF-CE e BFRP-CF-CE).

Para a medição da deformação da armadura, foram fixados extensômetros nas duas barras longitudinais das extremidades, e assim feita a leitura da deformação em função da carga aplicada. O Gráfico 21 apresenta a deformação das barras longitudinais encontrada para as vigas armadas com GFRP.

**Gráfico 21.** Carga x Deformação específica da armadura longitudinal das vigas de GFRP.



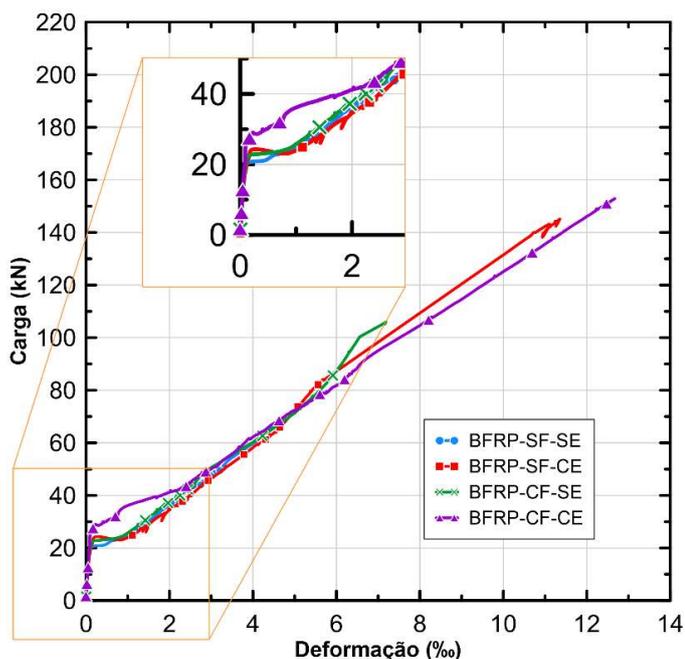
Todas as barras apresentaram o mesmo comportamento ao longo do ensaio. Observa-se um primeiro estágio, em que o concreto é o principal responsável por resistir aos esforços internos, enquanto que ao se ultrapassar cerca de 30 kN, a armadura passa a ser mais solicitada. Este comportamento também foi observado por Said *et al.* (2016), Tomlinson e Fam (2015), Abed & Alhafiz (2019), Huang *et al.* (2020), Junaid *et al.* (2019) e El-Nemr *et al.* (2018).

Inicialmente, a curva de deformação apresenta inclinação acentuada, sem acréscimo significativo de deformação, representando a condição do concreto sem fissura. Neste ponto, o concreto se encontra resistindo às tensões de tração. Após a fissuração, a seção resistente do concreto diminui e as barras longitudinais são cada

vez mais solicitadas, de modo que é possível observar mudança na inclinação da curva de deformação, que se mantém linear até a ruptura da estrutura.

O Gráfico 22 mostra a deformação da armadura longitudinal das vigas armadas com barra de BFRP.

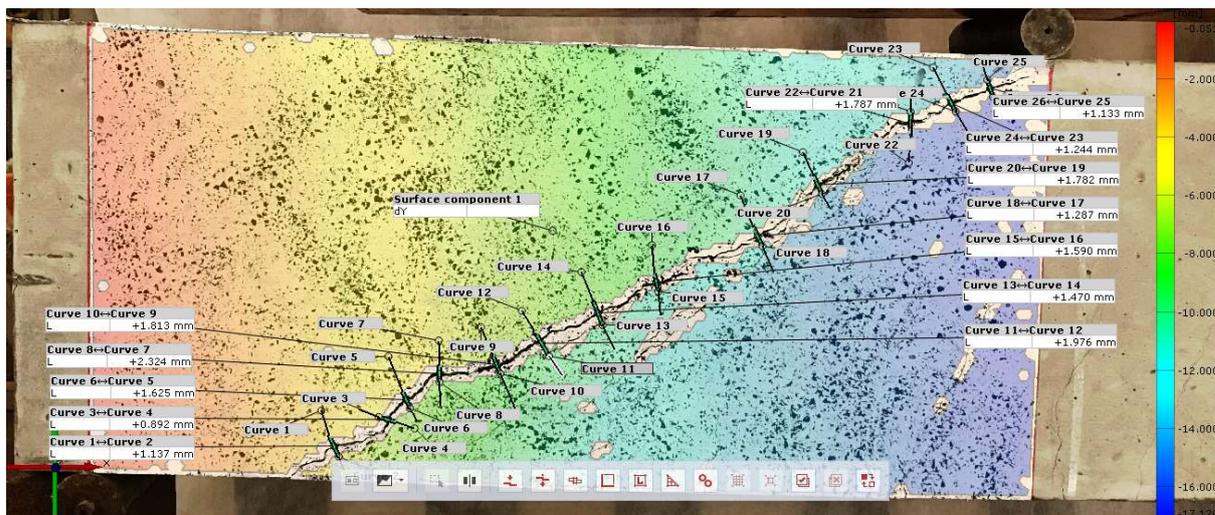
**Gráfico 22.** Carga x Deformação específica da armadura longitudinal das vigas de BFRP.



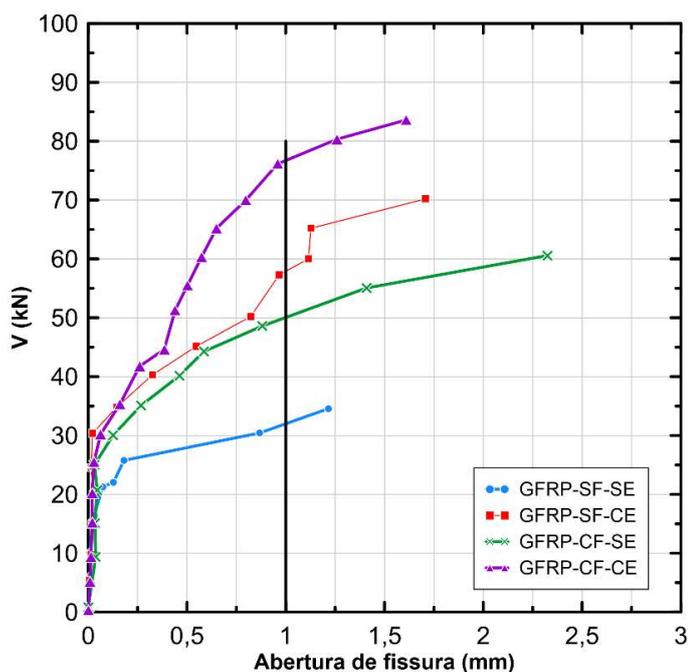
Em relação à deformação das barras longitudinais das vigas de BFRP, é possível observar o mesmo comportamento apresentado pelas barras das vigas armadas com GFRP. Em um primeiro estágio, o concreto é o principal responsável por resistir aos esforços internos da viga, enquanto que ao se ultrapassar a carga de cerca de 25 kN, o concreto começa a fissurar e em seguida a armadura passa a ser mais solicitada, mantendo-se comportamento linear até o final do ensaio.

As curvas de carga x abertura de fissura foram obtidas por meio da análise de correlação de imagem digital, como mostra a Figura 58. Os Gráficos 23 e 24 apresentam os resultados das vigas armadas com barras de GFRP e BFRP, respectivamente.

**Figura 58.** Leitura de abertura de fissura por meio da técnica de correlação de imagem digital (CID).



**Gráfico 23.** Gráfico Carga cortante x Abertura de fissura para as vigas armadas com barras de GFRP.



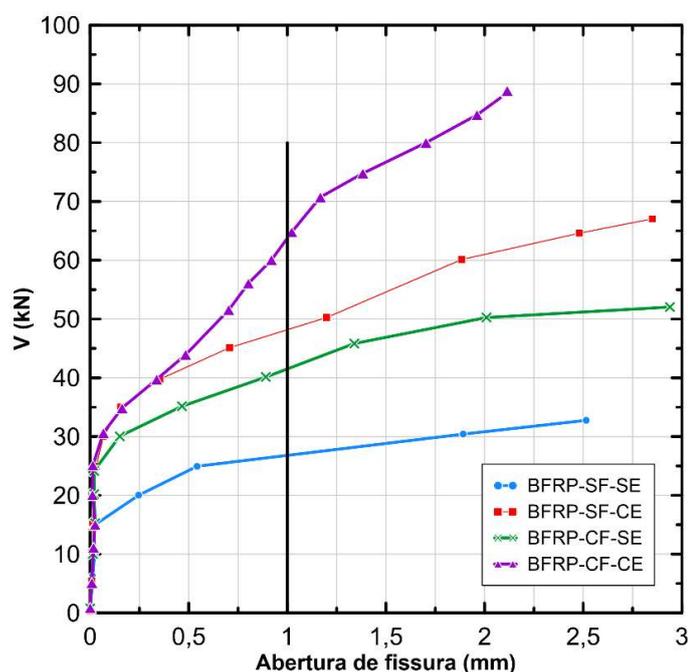
Por análise gráfica, é possível observar que a adição de fibras e a inserção de estribos proporcionou uma diminuição da abertura de fissura para uma mesma carga.

Por exemplo, para a abertura de 1 mm, as cargas resistidas pelas vigas foram:

- De 32 kN para GFRP-SF-SE e 50 kN para GFRP-CF-SE, mostrando um aumento de 56%;

- Para a viga GFRP-SF-CE, a capacidade de carga foi de 57,5 kN, enquanto que a viga GFRP-CF-CE atingiu 76,5 kN, indicando um aumento de 33%;
- Ao se comparar as vigas GFRP-SF-SE (32 kN) e GFRP-SF-CE (57,5 kN), observa-se que os estribos contribuíram com 80% na capacidade de carga para abertura de 1 mm.

**Gráfico 24.** Gráfico Carga cortante x Abertura de fissura para as vigas armadas com barras de GFRP.



Com relação às vigas armadas com barras de BFRP, foi observado comportamento semelhante. Para a abertura de 1 mm, as cargas resistidas pelas vigas foram:

- De 27 kN para BFRP-SF-SE e 41,5 kN para BFRP-CF-SE, mostrando um aumento de 54%;
- Para a viga BFRP-SF-CE, a capacidade de carga aproximada foi de 48 kN, enquanto que a viga BFRP-CF-CE atingiu 63,5 kN, indicando um aumento de 32%;
- Ao se comparar as vigas BFRP-SF-SE (27 kN) e BFRP-SF-CE (48 kN), observa-se que os estribos contribuíram com 78% na capacidade de carga.

#### 4.4. Comparação entre resultados teóricos e experimentais

Na Tabela 31 são comparados os resultados experimentais com os cálculos de cortante resistente de acordo com as normas ACI 440.1R-15 e a ABNT NBR 16935 (2021), considerando-se os arranjos de armadura adotados (estribos espaçados a 21 cm) e os valores médios das propriedades das barras e dos concretos obtidos na caracterização dos materiais.

**Tabela 31.** Comparação dos resultados experimentais e do cálculo de cortante resistente de acordo com a ACI 440.1R-15 e a norma ABNT NBR 16935 (2021).

ID viga	ACI 440.1R-15		ABNT NBR 16935 (2021)	$V_n$ (kN)	$V_{u, exp}$	$V_{u, exp}/V_n$
	$V_c$ (kN)	$V_f$ (kN)	$V_{Rd,F}$ (kN)			
GFRP-SF-SE	18,92	-	-	18,92	35,11	1,86
GFRP-SF-CE	18,92	23,25	-	42,17	83,75	1,99
GFRP-CF-SE	-	-	75,49	75,49	62,68	0,83
GFRP-CF-CE	-	23,25	75,49	98,74	99,46	1,00
BFRP-SF-SE	17,28	-	-	17,28	33,04	1,91
BFRP-SF-CE	17,28	23,99	-	41,27	72,55	1,76
BFRP-CF-SE	-	-	65,37	65,37	52,99	0,81
BFRP-CF-CE	-	23,99	65,37	89,36	89,10	1,00

Com base nos resultados, é possível observar que a cortante resistente calculada pela ACI 440.1R-15 subestimou tanto a contribuição do concreto, parcela  $V_c$ , quanto a contribuição dos estribos, parcela  $V_f$ . A maior diferença encontrada entre o cálculo teórico e experimental foi para a viga armada com barras e estribos de GFRP, que apresentou resistência superior de 99%.

Quando analisada a parcela  $V_{Rd,F}$ , de acordo com a ABNT NBR 16935 (2021), nota-se que o cálculo teórico superestimou a contribuição do concreto com fibra, uma vez que o resultado experimental representou 83% e 81% do valor teórico, para as vigas armadas com barras de GFRP e BFRP, respectivamente.

A Tabela 32 apresenta a comparação dos resultados experimentais com os cálculos de cortante resistente de acordo com a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) e a norma ABNT NBR 16935 (2021), considerando-se os arranjos de armadura adotados (estribos espaçados a 21 cm) e os valores médios das propriedades das barras e dos concretos obtidos na caracterização dos materiais.

**Tabela 32.** Comparação dos resultados experimentais e do cálculo de cortante resistente de acordo com a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) e a norma ABNT NBR 16935 (2021).

ID viga	Prática Recomendada (2021)		ABNT NBR 16935 (2021)	$V_n$ (kN)	$V_{u, exp}$	$V_{u, exp}/V_n$
	$V_c$ (kN)	$V_f$ (kN)	$V_{Rd,F}$ (kN)			
GFRP-SF-SE	16,28	-	-	16,28	35,11	2,16
GFRP-SF-CE	16,28	47,85	-	64,13	83,75	1,31
GFRP-CF-SE	-	-	75,49	75,49	62,68	0,83
GFRP-CF-CE	-	47,85	75,49	123,34	99,46	0,81
BFRP-SF-SE	16,59	-	-	16,59	33,04	1,99
BFRP-SF-CE	16,59	47,10	-	63,69	72,55	1,14
BFRP-CF-SE	-	-	65,37	65,37	52,99	0,81
BFRP-CF-CE	-	47,10	65,37	112,47	89,10	0,79

Observa-se que a cortante resistente calculada pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), subestimou a contribuição do concreto, parcela  $V_c$ , de maneira que a maior diferença encontrada entre o cálculo teórico e experimental foi para a viga armada com barras de GFRP, que apresentou resistência superior de 116%. Com relação à parcela  $V_f$ , a Prática considerou maior contribuição dos estribos quando comparada à ACI 440.1R-15, com um aumento de 106% e 96% para as vigas armadas com estribos de GFRP e BFRP, respectivamente.

Também foi realizada uma análise dos resultados experimentais e dos dimensionamentos de acordo com a ACI 440.1R-15 e Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), considerando-se o arranjo de armadura longitudinal de cinco barras de 10 mm de diâmetro, estribos de 8 mm de diâmetro com espaçamento necessário para as vigas não romperem ao cisalhamento e os valores médios das propriedades das barras e dos concretos obtidos na caracterização dos materiais.

**Tabela 33.** Comparação dos resultados experimentais e dimensionamentos de acordo com a ACI 440.1R-15 e Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021)

ID viga	$V_{u,exp}$	ACI 440.1R-15		Prática Recomendada (2021)	
		$V_n$ (kN)	$V_{u,exp} / V_n$	$V_{Rd}$ (kN)	$V_{u,exp} / V_{Rd}$
GFRP-CF-SE	62,68	88,90	0,71	101,37	0,62
GFRP-CF-CE	99,46		1,12		0,98
BFRP-CF-SE	52,99	82,24	0,64	90,51	0,59
BFRP-CF-CE	89,10		1,08		0,98

Sobre as vigas armadas com barras de GFRP, ao se analisar a cortante resistente obtida pelos dimensionamentos e pelos ensaios experimentais, observa-se que a adição de fibra em conjunto com os estribos forneceu capacidade resistente superior ou muito próxima às previstas nos dimensionamentos. A resistência obtida no ensaio experimental foi 11,9% superior à cortante resistente calculada pela ACI 440.1R-15 e 1,9% inferior à cortante calculada pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

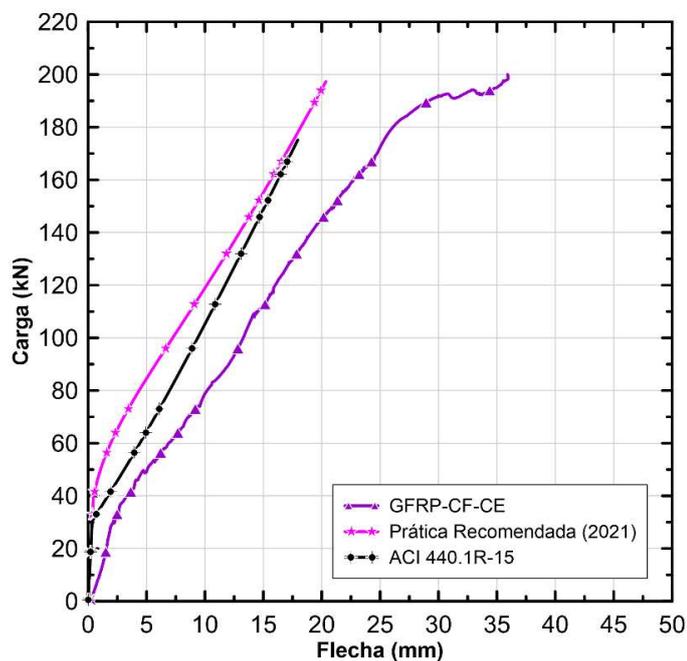
Contudo, a substituição total dos estribos por fibra não forneceu resistência suficiente para se atingir as capacidades resistentes obtidas previstas nos dimensionamentos. A resistência da viga GFRP-CF-SE foi 29,5% inferior à cortante resistente obtida da ACI 440.1R-15 e 38,2% inferior à cortante calculada pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

Sobre as vigas armadas com barras de BFRP, pôde-se observar comportamento semelhante, em que a substituição de parte dos estribos de BFRP por macrofibra polimérica proporcionou capacidade resistente superior ou muito próxima aos resultados previstos nos dimensionamentos. A resistência obtida no ensaio experimental foi 8,3% superior à cortante resistente calculada pela ACI 440.1R-15, e 1,6% inferior à força cortante calculada pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

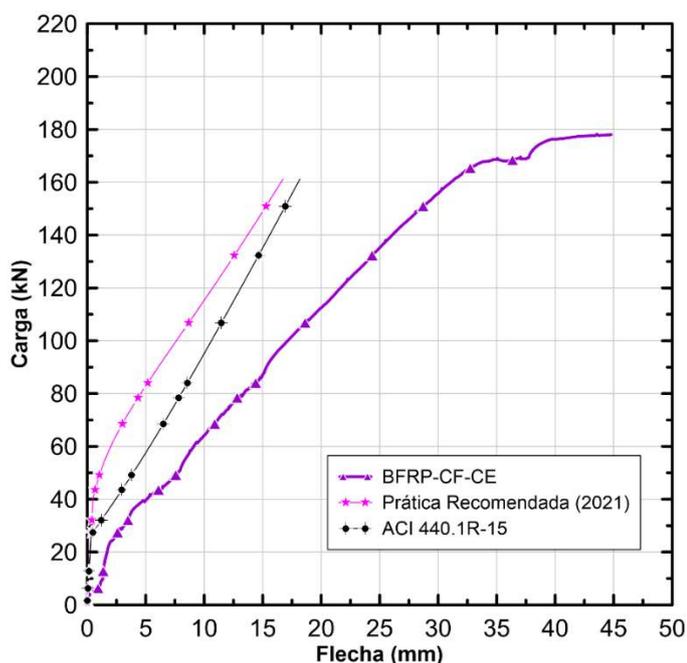
A substituição total dos estribos por fibra não forneceu resistência suficiente para atingir as capacidades resistentes obtidas nos dimensionamentos. A resistência da viga BFRP-CF-SE foi 35,6% inferior à força cortante resistente obtida da ACI 440.1R-15 e 41,5% inferior à força cortante calculada pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

Os Gráficos 25 e 26 apresentam as curvas experimentais e analíticas de força *versus* flecha para as vigas armadas com barras de GFRP e BFRP, respectivamente, que romperam à flexão por esmagamento do concreto.

**Gráfico 25.** Curvas experimentais e analíticas de Carga x Flecha para as vigas armadas com GFRP.



**Gráfico 26.** Curvas experimentais e analíticas de Carga x Flecha para as vigas armadas com BFRP.



Em ambos os gráficos é possível notar que os cálculos de flecha fornecidos pela ACI 440.1R-15 e pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) subestimaram o comportamento da estrutura, uma vez que para a mesma capacidade de carga, foram estimadas flechas inferiores ao observado nos ensaios.

## 5. CONCLUSÕES

A compreensão do comportamento mecânico das barras de polímero reforçado com fibras, assim como o seu desempenho em elementos estruturais, é de fundamental importância para a confiabilidade e aplicação desse novo material no mercado nacional.

O estudo experimental realizado teve como objetivo caracterizar o comportamento mecânico das barras de GFRP e BFRP por meio do ensaio de resistência à tração e módulo de elasticidade, além de analisar a substituição parcial e total dos estribos de FRP por macrofibra polimérica no teor de 1% em volume de concreto, em vigas de concreto armado com barras de GFRP e BFRP. A partir dos resultados, pôde-se obter as seguintes conclusões:

- Ensaio de resistência à tração

Os resultados do ensaio de resistência à tração das barras de GFRP e BFRP indicaram que o aumento dos diâmetros não influenciou na resistência à tração das barras, de modo que todos os diâmetros de barras analisadas apresentaram valores de resistência bastante próximos.

Todos os diâmetros das barras analisadas, dos materiais GFRP e BFRP, apresentaram resistência à tração superior ao valor mínimo exigido pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), que é de 800 MPa.

- Módulo de elasticidade

Os resultados referentes às barras de GFRP e BFRP indicaram que o aumento do diâmetro não influenciou no módulo de elasticidade das barras, sendo observado o mesmo comportamento em relação à resistência à tração.

Todos os diâmetros das barras analisadas, dos materiais GFRP e BFRP, apresentaram módulo de elasticidade superior ao valor mínimo exigido na Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), que é de 50 GPa. e superior à 44,8 GPa, que é o valor mínimo exigido pela ASTM D7957/D7957M-17.

- Ensaio de flexão a quatro pontos com vigas de concreto armado com barras de GFRP e BFRP

Ao se analisar a flecha das vigas armadas com barras de GFRP e BFRP, pôde-se observar que a presença das fibras e dos estribos, com espaçamento excessivo, proporcionou maior ductilidade às vigas, podendo ser observado um aumento de deformação ao final do segundo estágio.

Para as vigas analisadas dos dois materiais, GFRP e BFRP, a adição de fibra proporcionou maior capacidade de carga para mesma abertura de fissura, com uma contribuição máxima de 56%, para a viga GFRP-CF-SE. Entretanto, a presença dos estribos promoveu maior contribuição, com um aumento da capacidade de carga para a mesma abertura de fissura de 80% para a viga GFRP-SF-CE.

A cortante resistente calculada pela ACI 440.1R-15 subestimou tanto a contribuição do concreto, parcela  $V_c$ , quanto a contribuição dos estribos, parcela  $V_f$ . A maior diferença encontrada entre o cálculo teórico e experimental foi para a viga armada com barras e estribos de GFRP, que apresentou resistência superior de 99%.

Quando analisada a parcela  $V_{Rd,F}$ , pela ABNT NBR 16935 (2021), nota-se que o cálculo teórico superestimou a contribuição do concreto com fibra, uma vez que o resultado experimental representou 83% e 81% do valor teórico, para as vigas armadas com barras de GFRP e BFRP, respectivamente.

O cálculo da cortante resistente pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) subestimou a contribuição do concreto, parcela  $V_c$ , de modo que a maior diferença encontrada entre o cálculo teórico e experimental foi para a viga armada com barras de GFRP, que apresentou resistência superior de 116%. Com relação à parcela  $V_f$ , a Prática considera maior contribuição dos estribos quando comparada à ACI 440.1R-15, com um aumento de 106% e 96% para as vigas armadas com estribos de GFRP e BFRP, respectivamente.

Quando comparada a cortante resistente obtida pelos dimensionamentos e o resultado experimental, observa-se que a adição de 1% de macrofibra de polipropileno em conjunto com os estribos, com espaçamento excessivo, forneceu capacidade resistente superior ou muito próxima aos dimensionamentos realizados, ao considerar o limite de espaçamento máximo entre estribo, o que indica a efetividade da substituição de parte dos estribos de GFRP e BFRP por macrofibra polimérica no teor utilizado. Contudo, a substituição total dos estribos por fibra não forneceu resistência suficiente para se atingir as capacidades resistentes obtidas nos dimensionamentos.

A substituição total dos estribos de GFRP e BFRP por macrofibras de polipropileno no teor de 1% em volume de concreto não foi suficiente para alterar o modo de ruptura frágil por cisalhamento. Porém, a adição de fibra de polipropileno em conjunto com os estribos, com espaçamento excessivo, proporcionou a mudança do modo de ruptura frágil por cisalhamento para ruptura pseudo-dúctil de flexão por esmagamento do concreto, indicando a eficiência das fibras em substituir parte dos estribos de FRP.

### **5.1. Sugestões para trabalhos futuros**

A utilização de barras de FRP em estruturas de concreto ainda é uma novidade no Brasil. Recentemente, foi publicada a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) que trata do dimensionamento de estruturas de concreto armado com as barras não metálicas de FRP, o que corrobora para a inserção do material no mercado nacional. Nesse contexto, se faz necessária a realização de pesquisas que abordem o comportamento mecânico do material, bem como seu desempenho nas estruturas:

- Verificação do teor de fibra otimizado para adicionar na matriz de concreto que proporcione a substituição total dos estribos de FRP em vigas de concreto armado submetidas à flexão.;
- Avaliar com um programa experimental mais amplo a aplicação das formulações de previsão de flecha abordadas pela ACI 440.1R-15 e Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021);
- Avaliar com um programa experimental mais amplo a aplicação das formulações de cálculo de cortante resistente abordadas pela ACI 440.1R-15 e Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021);

## REFERÊNCIAS

ABED, F., & ALHAFIZ, A. R. (2019). Effect of basalt fibers on the flexural behavior of concrete beams reinforced with BFRP bars. **Composite Structures**, 215(January), 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.050>

ALTALABANI, D., BZENI, D. K. H., & LINSEL, S. (2020). Mechanical properties and load deflection relationship of polypropylene fiber reinforced self-compacting lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, 252, 119084. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119084>

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2006) “ACI 440 1R – Guide for design and concrete reinforced with FRP bars”, United States. 2006.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440. 1R - 15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. American Concrete Institute, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5739: 2018 - Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118: 2014 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7211: 2019 - Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro. 2019c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8522: 2017 - Concreto — Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro. 2017.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16889: 2020 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16916: 2021 - Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16917: 2021 - Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16935: 2021 – Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras - Procedimento. Rio de Janeiro. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16940: 2021 – Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) – Método de ensaio. Rio de Janeiro. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16942: 2021 – Fibras poliméricas para concreto – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 248: 2003 - Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. 2003a.

Association for Materials Protection and Performance (AMPP). 2021 IMPACT Canada Study. Disponível em: <<https://www.ampp.org/resources/what-is-corrosion/corrosion-reference-library/impact-canada>>. Acesso em: 29 de dezembro de 2021.

ASTM D7205/D7205-M-06. Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

ASTM D7913/D7913M-20. Standard Test Method for Bond Strength of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Bars to Concrete by Pullout Testing. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

ASTM D7957/D7957M-17. Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

AWADALLAH, Z. H., AHMED, M. M., FARGHAL, O. A., & FAHMY, M. F. M. (2014). Some Parameters Affecting Shear Behavior of High Strength Fiber Reinforced Concrete Beams Longitudinally Reinforced With Bfrp Rebars. **JES. Journal of Engineering Sciences**, 42(5), 1163–1178. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2014.115059>

BASTOS, P S.. **Dimensionamento de vigas de concreto armado à força cortante**. Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Civil, Bauru, 2021. Notas de Aula. Disponível em:< <https://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto2/Cortante.pdf>>. Acesso em: 8 dez. 2021.

BENMOKRANE, B., MANALO, A., BOUHET, J. C., MOHAMED, K., ROBERT, M. Effects of Diameter on the Durability of Glass-1 Fiber-Reinforced-Polymer (GFRP) Bars Conditioned in Alkaline Solution. **Journal of Composites for Construction** 2017; 21(5): 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000814.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. London and New York: Modern Concrete Technology Series, 2007.

BRASILEIRO, L. L., & MATOS, J. M. E. (2015). **Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil.** *Cerâmica*, 61(358), 178–189. <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613581860>

CAI, J., PAN, J., & ZHOU, X. (2017). Flexural behavior of basalt FRP reinforced ECC and concrete beams. **Construction and Building Materials**, 142, 423–430. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.087>

CASTOLDI, R. de Souza. **Propriedades mecânicas e durabilidade de concretos reforçados com fibras de polipropileno e sisal.** Rio de Janeiro, 2018. 147p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

CUNHA, R. D. **Estudo da aderência de barras poliméricas reforçadas com fibras de vidro (GFRP) ao concreto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

DEV, A., CHELLAPANDIAN, M., & PRAKASH, S. S. (2020). Effect of Macrosynthetic and Hybrid Fibers on Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars. **Journal of Bridge Engineering**, 25(7), 04020031. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001557](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001557)

EL-NEMR, A., AHMED, E. A., EL-SAFTY, A., & BENMOKRANE, B. (2018). Evaluation of the flexural strength and serviceability of concrete beams reinforced with different types of GFRP bars. **Engineering Structures**, 173(June), 606–619. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.089>

FAHMY M., AHMED, S., and WU, Z. “Bar surface treatment effect on the bond-slip behavior and mechanism of basalt FRP bars embedded in concrete”. **Construction and Building Materials**, v. 289, 2021.

Fib Bulletin 40. **FRP reinforcement in RC structures.** Bull 40 Int Fed Struct Concr 2007:160.

FIGUEIREDO, A.D. de. **Concreto reforçado com fibras.** São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2011, 248 p. Tese (Livre-Docência).

GCP Applied Technologies Inc. Folha de dados do produto. ADVA CAST 525. Disponível em: < <https://gcpat.com.br/pt-br/solutions/products/adva-cast-high-range-admixtures/adva-cast-525>>. Acesso em: 19 de dezembro de 2021.

GOM: Precise Industrial 3D METROLOGY. GOM CORRELATE n.d.

HAIZER GROUP. Paraná: Haizer Building Solution. Disponível em: <https://www.haizergroup.com.br/mapa>. Acesso em: 11 de maio, 2021.

HAIZER GROUP. Haizer Building Solution. Disponível em: <https://www.haizergroup.com.br/haizervergalhoes>. Acesso em: 14 de dezembro, 2021.

Hu, Y.; Ma, L. Effect of Surface Treatment of Polypropylene (PP) Fiber on the Sulfate Corrosion Resistance of Cement Mortar. **Materials** 2021, 14, 3690. <https://doi.org/10.3390/ma14133690>

HUA, Y., YIN, S., and WANG, Z. "Analysis of influence factors on interfacial bond between BFRP bars and seawater sea-sand concrete". **Journal of Reinforced Plastics Composites**, v. 0, p. 1 – 13, 2020.

HUANG, Z., CHEN, W., HAO, H., CHEN, Z., PHAM, T. M., TRAN, T. T., & ELCHALAKANI, M. (2021). Shear behaviour of ambient cured geopolymer concrete beams reinforced with BFRP bars under static and impact loads. **Engineering Structures**, 231(November 2020), 111730. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111730>

JUNAID, M. T., ELBANA, A., ALTOUBAT, S., & AL-SADOON, Z. (2019). Experimental study on the effect of matrix on the flexural behavior of beams reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) bars. **Composite Structures**, 222, 110930. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110930>

KHAN, S., KHAN, R. A., KHAN, A. R., ISLAM, M., & NAYAL, S. (2015). Mechanical properties of Polypropylene Fibre reinforced concrete for M 25 & M 30 mixes : A Comparative study. **International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS)**, 1(6), 327–340. <http://ijseas.com/volume1/v1i6/ijseas20150634.pdf>

KOCAOZ, S., SAMARANAYAKE, V. A., and NANNI, A. (2005). "Tensile characterization of glass FRP bars." *Compos. Part B*, 36(2), 127–134.

KORDSA. Construction Reinforcement. KraTos FIBERS. Disponível em: <https://www.kordsa.com/en/products/detail/construction-reinforcement/32/46/0>  
Acesso em: 14 de dezembro, 2021.

LEONHARDT, F.; MONNING, E. Construções de concreto – **Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado**, v. 1, Rio de Janeiro, Ed. Interciência, 1982, 305p.

LI, C., GAO, D., WANG, Y., & TANG, J. (2017). Effect of high temperature on the bond performance between basalt fibre reinforced polymer (BFRP) bars and concrete. **Construction and Building Materials**, 141, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.125>

Liu, Y., Wang, L., Cao, K., & Sun, L. (2021). Review on the Durability of Polypropylene Fibre-Reinforced Concrete. **Advances in Civil Engineering**, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6652077>

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto, estrutura, propriedade dos materiais**. São Paulo: Pini, 1994. 573p.

MICALI, R. M. "**Análise teórica de vigas pré-moldadas de concreto com armadura de aço e de polímero reforçado com fibra de vidro em meio altamente agressivo**". Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, 2010.

MONALDO, E.; NERILLI, F.; VAIRO, G. Basalt-fiber reinforced materials and structural applications in civil engineering, **Composite Structures**, 214:246-263, 2019.

Nanni A, De Luca A, Jawaheri Zadeh H. **Reinforced Concrete with FRP Bars**. CRC press; 2014. <https://doi.org/10.1201/b16669>.

PAWŁOWSKI, D., & SZUMIGAŁA, M. (2015). Flexural behaviour of full-scale basalt FRP RC beams - Experimental and numerical studies. **Procedia Engineering**, 108, 518–525. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.114>

PINHEIRO, L. M. Fundamentos do Concreto de Projeto de Edifícios. Apostila. Universidade de São Paulo, São Carlos, , 2007.

Prática Recomendada IBRACON/ABECE. Estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras (FRP). São Paulo. Ed. IBRACON/ABECE, 1ª Edição, 2021.

REIS, V. L. F. **Construção de Estruturas de Betão Armado com Varões de FRP**. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos de Construção) – Universidade do Porto, Porto. 2009.

RESENDE, T. L. de; CARDOSO, D. C. T. (Orientador); SHEHATA, L. da C. D. (Co-orientadora). **Contribuição dos mecanismos resistentes à força cortante em vigas de concreto armado sem e com fibras de aço**. Rio de Janeiro, 2020. 253 p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

SÁ, F. R. G. de; CARDOSO, D. C. T. (Orientador); SILVA, F. de A. (Co-orientador). **Influência da adição de fibras de polipropileno no comportamento de elementos estruturais de concreto armado com barras de GFRP**. Rio de Janeiro, 2018. 100p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

SAID, M., ADAM, M. A., MAHMOUD, A. A., & SHANOUR, A. S. (2016). Experimental and analytical shear evaluation of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars. **Construction and Building Materials**, 102(3), 574–591. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.185>

SINGH, B. S. Analysis and Design of FRP Reinforced Concrete Structures. McGraw Hill Education (India) Private Limited, 2014

SHEN, D., SHI, X., ZHANG, H., DUAN, X., & JIANG, G. (2016). Experimental study of early-age bond behavior between high strength concrete and steel bars using a pull-out test. **Construction and Building Materials**, 113, 653–663. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.094>

TAVARES, D. H. (2006). **Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de GFRP**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

TRAN, T. T., PHAM, T. M., & HAO, H. (2020). Effect of hybrid fibers on shear behaviour of geopolymer concrete beams reinforced by basalt fiber reinforced polymer (BFRP) bars without stirrups. **Composite Structures**, 243(March), 112236. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112236>

TOMLINSON, D., & FAM, A. (2015). Performance of concrete beams reinforced with basalt FRP for flexure and shear. **Journal of Composites for Construction**, 19(2), 1–10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000491](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000491)

TORRES, A. S. **Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma Meta-análise**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

VINTZELEOU, E. N.; TASSIOS, T. P. Mathematical models for dowel action under monotonic and cyclic conditions. **Magazine of Concrete Research**, v. 38, n. 134, p. 13-22, março 1986.

WEI, W., LIU, F., XIONG, Z., and LI, L. "Bond performance between fibre-reinforced Polymer bars and concrete under pull-out tests". **Construction and Building Materials**, v. 227, 2019.

YOU YJ, PARK KT, SEO DW, HWANG JH. Tensile Strength of GFRP Reinforcing Bars with Hollow Section. **Adv Mater Sci Eng** 2015;2015. <https://doi.org/10.1155/2015/621546>.

## APÊNDICE A

Neste tópico é apresentado o dimensionamento das vigas armadas com barras de GFRP e BFRP de acordo com a norma ACI 440.1R-15 e a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

Primeiramente, foram definidas as dimensões das vigas que possuem seção transversal com largura da base de 150 mm, altura de 300 mm e vão livre entre apoios de 190 cm. A armadura longitudinal adotada é composta por cinco barras de 10 mm de diâmetro nominal dos materiais GFRP ou BFRP, armadura transversal composta por estribos de GFRP ou BFRP de diâmetro nominal de 8 mm, porta estribos de GFRP ou BFRP de 6 mm de diâmetro nominal, resistência característica à compressão do concreto de 40 MPa e cobrimento de 20 mm, altura útil de 251,9 mm e 252,1 mm para armadura de GFRP e BFRP, respectivamente. Os pontos de aplicação das cargas se encontram a 63 cm dos apoios. Todo o dimensionamento foi realizado utilizando os valores característicos das propriedades das barras de GFRP e BFRP obtidos dos ensaios de caracterização, ou seja, sem coeficientes de ponderação. A Tabela A1 apresenta as propriedades dos materiais utilizados.

**Tabela A1.** Propriedades dos materiais.

Material	∅ (mm)	$f_{fu}$ (MPa)	$E_f$ (GPa)
Barra long. de GFRP	10,5	952,17	51713
Estribo de GFRP	7,6	839,25	53420
Barra long. de BFRP	10,1	902,82	52590
Estribo de BFRP	7,8	981,26	52280
Concreto	$F_{ck}$ (MPa)	$F_{ct, m}$ (MPa)	$E_{cs}$ (MPa)
	40,00	3,51	31875,8

### A.1. Dimensionamento de acordo com a ACI 440.1R-15

#### A.1.1. Dimensionamento à flexão das vigas armadas com barras de GFRP

Cálculo da resistência à tração característica da barra de GFRP:

$$f_{fu}^* = f_{u,ave} - 3\sigma = 997,11 - 3 * 14,98 = 952,17 \text{ MPa}$$

Cálculo do fator de redução:

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 * \frac{f'c - 28}{7} = 0,85 - 0,05 * \frac{40 - 28}{7} = 0,764$$

Cálculo da taxa de armadura de GFRP:

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{(\pi \cdot 1,05^2 / 4) \cdot 5}{15 \cdot 25,19} = 0,011458$$

Cálculo da taxa de armadura balanceada:

$$\begin{aligned} \rho_{fb} &= 0,85 \cdot \frac{f'_c}{f_{fu}} \cdot \beta_1 \cdot \frac{E_f \cdot \varepsilon_{cu}}{E_f \cdot \varepsilon_{cu} + f_{fu}} = \\ &= 0,85 \cdot \frac{40}{952,17} \cdot 0,764 \cdot \frac{51713 \cdot 0,003}{51713 \cdot 0,003 + 952,17} = 0,003824 \end{aligned}$$

Como  $\rho_f > 1,4 \rho_{fb}$  a falha na estrutura é iniciada pelo esmagamento do concreto:

$$\begin{aligned} f_f &= \left[ \sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu} \right] = f_f \\ &= \left[ \sqrt{\frac{(51713 \cdot 0,003)^2}{4} + \frac{0,85 \cdot 0,764 \cdot 40}{0,011458} \cdot 51713 \cdot 0,003} - 0,5 \cdot 51713 \cdot 0,003 \right] \\ &= 520,64 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Como  $\rho_f > \rho_{fb}$ :

$$\begin{aligned} M_n &= \rho_f f_f \left( 1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2 \\ &= 0,011458 \cdot 520,64 \cdot \left( 1 - 0,59 \cdot \frac{0,011458 \cdot 520,64}{40} \right) \cdot 150 \cdot 251,9^2 = 51784457,7 \text{ Nmm} \\ &= 51,78 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$M_n = 51,78 \text{ kNm} \rightarrow V_n = 82,19 \text{ kN}$$

### A.1.2. Dimensionamento ao cisalhamento das vigas armadas com barras de GFRP

Cálculo da razão entre o módulo de elasticidade da barra de GFRP e o módulo de elasticidade do concreto:

$$\eta_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{51713}{31875,8} = 1,62$$

Cálculo da proporção de profundidade da linha neutra:

$$k = \sqrt{2 \rho_f \eta_f + (\rho_f \eta_f)^2} - \rho_f \eta_f$$

$$= \sqrt{2 \cdot 0,011458 \cdot 1,62 + (0,011458 \cdot 1,62)^2} - 0,011458 \cdot 1,62$$

$$= 0,178$$

Contribuição do concreto:

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w (kd) = \frac{2}{5} \sqrt{40} \cdot 15 \cdot (0,178 \cdot 251,9)$$

$$= 16987,07 \text{ N} = 16,99 \text{ kN}$$

Cálculo da resistência à tração característica da barra de GFRP contendo dobras:

$$f_{fb} = \left( 0,05 \cdot \frac{r_b}{d_b} + 0,3 \right) \cdot f_{fu} = (0,05 \cdot 3 + 0,3) \cdot 839,25 = 377,66 \text{ kN}$$

Cálculo do nível de tensão na armadura de cisalhamento de GFRP:

$$f_{fv} = 0,004 E_f = 0,004 \cdot 51713 = 213,68 \text{ kN} \leq f_{fb} \rightarrow \text{ok!}$$

Área de armadura de cisalhamento (estribos perpendiculares ao eixo do elemento):

$$\frac{A_{fv}}{s} = \frac{(V_u - \phi V_c)}{\phi f_{fv} d} = \frac{82190 - 16987,07}{213,68 \cdot 251,9} = 1,2114 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}} = 0,1211 \text{ cm}^2/\text{cm}$$

Espaçamento dos estribos:

$$S = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,76^2 / 4}{0,1211} = 7,49 \text{ cm}$$

### A.1.3. Dimensionamento à flexão das vigas armadas com barras de BFRP

Cálculo da resistência à tração característica da barra de BFRP:

$$f_{fu}^* = f_{u,ave} - 3\sigma = 1012,92 - 3 \cdot 36,7 = 902,82 \text{ MPa}$$

Cálculo do fator de redução:

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \cdot \frac{f'_c - 28}{7} = 0,85 - 0,05 \cdot \frac{40 - 28}{7} = 0,764$$

Cálculo da taxa de armadura de BFRP:

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{(\pi \cdot 1,01^2/4) \cdot 5}{15 \cdot 25,21} = 0,010593$$

Cálculo da taxa de armadura balanceada:

$$\begin{aligned} \rho_{fb} &= 0,85 \cdot \frac{f'_c}{f_{fu}} \cdot \beta_1 \cdot \frac{E_f \cdot \varepsilon_{cu}}{E_f \cdot \varepsilon_{cu} + f_{fu}} = \\ &0,85 \cdot \frac{40}{902,82} \cdot 0,764 \cdot \frac{52590 \cdot 0,003}{52590 \cdot 0,003 + 902,82} = \\ &= 0,004282 \end{aligned}$$

Como  $\rho_f > 1,4 \rho_{fb}$  a falha na estrutura é iniciada pelo esmagamento do concreto:

$$\begin{aligned} f_f &= \left[ \sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu}} \right] = f_f \\ &= \left[ \sqrt{\frac{(52590 \cdot 0,003)^2}{4} + \frac{0,85 \cdot 0,7643 \cdot 40}{0,10593} \cdot 52590 \cdot 0,003} \right. \\ &\quad \left. - 0,5 \cdot 52590 \cdot 0,003 \right] = 548,20 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Como  $\rho_f > \rho_{fb}$ :

$$\begin{aligned} M_n &= \rho_f f_f \left( 1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2 \\ &= 0,010593 \cdot 548,20 \cdot \left( 1 - 0,59 \cdot \frac{0,010593 \cdot 548,20}{40} \right) \cdot 150 \cdot 252,1^2 \\ &= 50619822,31 \text{ Nmm} = 50,62 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$M_n = 50,62 \text{ kNm} \rightarrow V_n = 80,34 \text{ kN}$$

#### A.1.4. Dimensionamento ao cisalhamento das vigas armadas com barras de BFRP

Cálculo da razão entre o módulo de elasticidade da barra de BFRP e o módulo de elasticidade do concreto:

$$\eta_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{52590}{31875,8} = 1,64$$

Cálculo da proporção de profundidade da linha neutra:

$$k = \sqrt{2 \rho_f \eta_f + (\rho_f \eta_f)^2} - \rho_f \eta_f$$

$$= \sqrt{2 \cdot 0,010593 \cdot 1,64 + (0,010593 \cdot 1,64)^2} - 0,010593 \cdot 1,64 = 0,16984$$

Contribuição do concreto:

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w (kd) = \frac{2}{5} \sqrt{40} \cdot 15 \cdot (0,16984 \cdot 252,1)$$

$$= 16248,21 \text{ N} = 16,25 \text{ kN}$$

Cálculo da resistência à tração característica da barra de BFRP contendo dobras:

$$f_{fb} = \left(0,05 \cdot \frac{r_b}{d_b} + 0,3\right) \cdot f_{fu} = (0,05 \cdot 3 + 0,3) \cdot 981,26 = 441,57 \text{ kN}$$

Cálculo do nível de tensão na armadura de cisalhamento de BFRP:

$$f_{fv} = 0,004 E_f = 0,004 \cdot 52590 = 209,12 \text{ kN} \leq f_{fb} \rightarrow \text{ok!}$$

Área de armadura de cisalhamento (estribos perpendiculares ao eixo do elemento):

$$\frac{A_{fv}}{s} = \frac{(V_u - \phi V_c)}{\phi f_{fv} d} = \frac{80340 - 16248,21}{209,12 \cdot 252,1} = 1,2157 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}} = 0,1216 \text{ cm}^2/\text{cm}$$

Espaçamento dos estribos:

$$S = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,78^2 / 4}{0,1216} = 7,86 \text{ cm}$$

## A.2. Dimensionamento de acordo com a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021)

Para a realização do dimensionamento à flexão de vigas armadas com barras de FRP, algumas hipóteses são consideradas:

- as seções permanecem planas após a flexão;
- bloco retangular de tensões no concreto com tensão  $\alpha_c f_{cd}$  e altura  $\lambda x$ , onde  $x$  é a profundidade da linha neutra e  $\alpha_c$  e  $\lambda$  são dados conforme NBR 6118 (2014), para concretos de resistência normal e seções transversais retangulares,  $\alpha_c = 0,85$  e  $\lambda = 0,8$ ; a resistência à tração do concreto deve ser desprezada;

- as tensões na armadura de FRP são proporcionais às deformações e comportamento elástico linear até a ruptura; e a aderência entre o concreto e as barras de FRP é perfeita.

Para o dimensionamento ao cisalhamento, as hipóteses a serem consideradas são:

- modelo de treliça com bielas de compressão inclinadas de  $\theta = 45$  graus (pouca adaptação plástica);
- contribuição do concreto apenas na zona comprimida (linha neutra calculada pelo estágio II), dada a flexibilidade das armaduras longitudinal e transversal,
- as parcelas de força cortante transferidas por engrenamento dos agregados e efeito de pino são menores; estribos orientados perpendicularmente ao eixo da viga.

### A.2.1. Dimensionamento à flexão das vigas armadas com barras de GFRP

Cálculo da taxa de armadura de GFRP:

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{(\pi \cdot 1,05^2 / 4) \cdot 5}{15 \cdot 25,19} = 0,011458$$

Cálculo da taxa de armadura balanceada:

$$\rho_{fb} = \lambda \alpha_c \frac{f_{cd}}{f_{fd}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fd}}$$

$$= 0,8 \cdot 0,85 \frac{40}{952,17} \frac{51713 \cdot 0,0035}{51713 \cdot 0,0035 + 952,17} = 0,004563$$

Como  $\rho > \rho_{fb}$ , a ruptura é governada pelo esmagamento do concreto, e a profundidade da linha neutra pode ser obtida pela seguinte equação:

$$x = \frac{1}{2b} \frac{\varepsilon_{cu} A_f E_f}{\lambda \alpha_c f_{cd}} \left( -1 + \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda \alpha_c f_{cd}}{\varepsilon_{cu} A_f E_f} bd} \right) = \frac{1}{2 \cdot 150} \frac{0,0035 \cdot 432,95 \cdot 51713}{0,8 \cdot 0,85 \cdot 40}$$

$$\left( -1 + \sqrt{1 + 4 \frac{0,8 \cdot 0,85 \cdot 40}{0,0035 \cdot 432,95 \cdot 51713} \cdot 150 \cdot 251,9} \right)$$

$$= 60,613 \text{ mm}$$

Como  $\rho > \rho_{fb}$ , a tensão na armadura é obtida pela equação:

$$\sigma_{fd} = \frac{xb\alpha_c\lambda f_{cd}}{A_f} = \sigma_{fd} = \frac{60,613 \cdot 150 \cdot 0,85 \cdot 0,8 \cdot 40}{432,951}$$

$$= 571,20 \text{ MPa}$$

O momento resistente é obtido pela equação:

$$M_{Rd} = \sigma_{fd} A_f \left( d - \frac{\lambda x}{2} \right) = 571,20 \cdot 432,95 \left( 251,9 - \frac{0,8 \cdot 60,613}{2} \right)$$

$$= 56299300 \text{ Nmm} = 56,30 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 56,30 \text{ kNm} \rightarrow V_{rd} = 89,36 \text{ kN}$$

## A.2.2. Dimensionamento ao cisalhamento das vigas armadas com barras de GFRP

Cálculo da posição da linha neutra no estágio II:

$$x_{II} = \frac{nA_f}{b} \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{2}{n\rho_s}} \right) =$$

$$\frac{51713 \cdot 432,96}{31875,8 \cdot 150} \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\frac{51713}{31875,8} \cdot 0,011458}} \right) = 44,11 \text{ mm} = 4,41 \text{ cm}$$

Verificação de falha por compressão diagonal:

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250} = 1 - 40/250 = 0,84$$

$$V_{Rd2} = 0,27\alpha_{v2}f_{cd}b_w d = 0,27 \cdot 0,84 \cdot 4,0 \cdot 15 \cdot 25,19 = 342,79 \text{ kN}$$

Contribuição do concreto:

$$V_c = 0,6f_{ctd}bx_{II} = 0,6 \cdot 0,24562 \cdot 15 \cdot 4,41 = 9,75 \text{ kN}$$

Cálculo da resistência à tração do estribo considerando a redução devido à dobra:

$$f_{fbk} = \left( 0,05 \frac{r_b}{\phi} + 0,3 \right) f_{fk} = f_{fbk} = (0,05 \cdot 3 + 0,3) \cdot 839,25 = 377,66 \text{ MPa} = 37,77 \text{ kN/cm}^2$$

Área de armadura de cisalhamento (estribos perpendiculares ao eixo do elemento):

$$V_f = 0,9df_{fbd} \left( \frac{A_{ft}}{s} \right)_V \rightarrow \left( \frac{A_{ft}}{s} \right)_V = \frac{(V_u - V_c)}{0,9df_{fbd}} = \frac{(89,36 - 9,75)}{0,9 \cdot 25,19 \cdot 37,77} = 0,09297 \text{ cm}^2/\text{cm}$$

Espaçamento dos estribos:

$$S = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,76^2 / 4}{0,09297} = 9,75 \text{ cm}$$

### A.2.3. Dimensionamento à flexão das vigas armadas com barras de BFRP

Cálculo da taxa de armadura de BFRP:

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{(\pi \cdot 1,01^2 / 4) \cdot 5}{15 \cdot 25,21} = 0,010593$$

Cálculo da taxa de armadura balanceada:

$$\rho_{fb} = \lambda \alpha_c \frac{f_{cd}}{f_{fd}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fd}} = 0,8 \cdot 0,85 \frac{40}{902,82} \frac{52590 \cdot 0,0035}{52590 \cdot 0,0035 + 902,82} = 0,005102$$

Como  $\rho > \rho_{fb}$ , a ruptura é governada pelo esmagamento do concreto, e a profundidade da linha neutra pode ser obtida pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{2b} \frac{\varepsilon_{cu} A_f E_f}{\lambda \alpha_c f_{cd}} \left( -1 + \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda \alpha_c f_{cd}}{\varepsilon_{cu} A_f E_f} bd} \right) \\ &= \frac{1}{2 \cdot 150} \frac{0,0035 \cdot 400,592 \cdot 52590}{0,8 \cdot 0,85 \cdot 40} \left( -1 + \sqrt{1 + 4 \frac{0,8 \cdot 0,85 \cdot 40}{0,0035 \cdot 400,592 \cdot 52590} \cdot 150 \cdot 252,1} \right) \\ &= 59,064 \text{ mm} \end{aligned}$$

Como  $\rho > \rho_{fb}$ , a tensão na armadura é obtida pela equação:

$$\begin{aligned} \sigma_{fd} &= \frac{x b \alpha_c \lambda f_{cd}}{A_f} = \sigma_{fd} = \frac{59,064 \cdot 150 \cdot 0,85 \cdot 0,8 \cdot 40}{400,59} \\ &= 601,57 \text{ MPa} \end{aligned}$$

O momento resistente é obtido pela equação:

$$\begin{aligned} M_{Rd} &= \sigma_{fd} A_f \left( d - \frac{\lambda x}{2} \right) = 601,57 \cdot 400,592 \left( 252,1 - \frac{0,8 \cdot 59,06}{2} \right) \\ &= 55058327 \text{ Nmm} = 56,30 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$M_{Rd} = 55,06 \text{ kNm} \rightarrow V_{rd} = 87,39 \text{ kN}$$

### A.2.4. Dimensionamento ao cisalhamento das vigas armadas com barras de BFRP

Cálculo da posição da linha neutra no estágio II:

$$x_{II} = \frac{nA_f}{b} \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{2}{n\rho_s}} \right) =$$

$$\frac{52590 \cdot 400,592}{31875,8 \cdot 150} \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\frac{52590}{31875,8} \cdot 0,010593}} \right) = 42,93 \text{ mm} = 4,29 \text{ cm}$$

Verificação de falha por compressão diagonal:

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250} = 1 - 40/250 = 0,84$$

$$V_{Rd2} = 0,27\alpha_{v2}f_{cd}b_w d = 0,27 \cdot 0,84 \cdot 4,0 \cdot 15 \cdot 25,21 = 343,058 \text{ kN}$$

Contribuição do concreto:

$$V_c = 0,6f_{ctd}bx_{II} = 0,6 \cdot 0,24562 \cdot 15 \cdot 4,29 = 9,49 \text{ kN}$$

Cálculo da resistência à tração do estribo considerando a redução devido à dobra:

$$f_{fbk} = \left( 0,05 \frac{r_b}{\phi} + 0,3 \right) f_{fk} = f_{fbk} = (0,05 \cdot 3 + 0,3) \cdot 981,26 = 441,567$$

$$= 44,16 \text{ kN/cm}^2$$

Área de armadura de cisalhamento (estribos perpendiculares ao eixo do elemento):

$$V_f = 0,9df_{fbd} \left( \frac{A_{ft}}{s} \right)_v \rightarrow \left( \frac{A_{ft}}{s} \right)_v = \frac{(V_u - V_c)}{0,9df_{fbd}}$$

$$= \frac{(87,39 - 9,49)}{0,9 \cdot 25,21 \cdot 44,16} = 0,07775 \text{ cm}^2/\text{cm}$$

Espaçamento dos estribos:

$$S = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,78^2/4}{0,07775} = 12,29 \text{ cm}$$