

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

JAKELINE DUTRA DOS SANTOS

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO COM
FIBRAS SINTÉTICAS ARMADAS COM BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO
COM FIBRAS DE VIDRO**

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

JAKELINE DUTRA DOS SANTOS

ESTUDO DO COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO COM
FIBRAS SINTÉTICAS ARMADAS COM BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO
COM FIBRAS DE VIDRO

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.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Nadia Cazarim da Silva Forti

Campinas

2022

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

624.183423 S237e	<p>Santos, Jakeline Dutra dos</p> <p>Estudo do comportamento à flexão de vigas de concreto com fibras sintéticas armadas com barras de polímero reforçado com fibras de vidro / Jakeline Dutra dos Santos. - Campinas: PUC-Campinas, 2022.</p> <p>125 f.: il.</p> <p>Orientador: Nádia Cazarim da Silva Forti.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Sistema de Infraestrutura Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Sistema 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. Vigas de concreto. 2. Fibras de vidro. 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 Sistema de Infraestrutura Urbana. III. Título.</p> <p>CDD - 23. ed. 624.183423</p>
---------------------	--

JAKELINE DUTRA DOS SANTOS

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE VIGAS
DE CONCRETO COM FIBRAS SINTÉTICAS ARMADAS
COM BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM
FIBRAS DE VIDRO**

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). Nádía Cazarim da Silva Forti.

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



Profa. Dra. Nádía 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. Daniel Carlos Taissum Cardoso
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RIO

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Juscelino Santos e Lucilene Ribeiro, pelo carinho, dedicação, apoio e por me incentivarem em todos os momentos. Ao meu irmão, Thiago Santos, pelo companheirismo e incentivos.

Aos meus amigos, Isabela Duarte, Michele Fugiyama e Guilherme Sumitomo, que estiveram comigo durante todo o período, por me dar suporte quando precisei, pelos conhecimentos compartilhados e pelo companheirismo em laboratório.

À minha orientadora, Nádia Cazarim da Silva Forti, por ter orientado com excelência todo o processo de pesquisa.

Ao professor Marco Antonio Carnio, pelo apoio, orientação e empréstimo dos equipamentos necessários para realização da pesquisa.

À empresa Haizer Importação e Exportação Ltda., pela disposição em apoiar a pesquisa, pela bolsa concedida e pela doação das barras de GFRP.

Aos funcionários do CEATEC da PUC-Campinas, pela contribuição e competência no auxílio em laboratório

À Pontifícia Universidade Católica de Campinas, pela bolsa reitoria, pelos conhecimentos adquiridos e pelo acolhimento durante a graduação em Engenharia Civil e agora como mestranda.

RESUMO

As barras de Polímero Reforçados com Fibras de Vidro (GFRP) são uma alternativa viável para o reforço de concreto devido às suas características como elevada resistência à tração, baixo peso específico, baixa condutividade térmica, transparência eletromagnética, instalação fácil e rápida e maior durabilidade em ambientes agressivos. Entender o comportamento mecânico das barras de GFRP e dos elementos estruturais, em que as barras são associadas, é de suma importância para a confiabilidade e aplicação no mercado nacional. Com esta perspectiva, este trabalho avaliou o comportamento à flexão de vigas de concreto armado com barras longitudinais de GFRP e estribos de aço, com e sem adição de macrofibras de polipropileno e armadura de confinamento. Na primeira etapa deste trabalho foram realizados ensaios de caracterização das barras de GFRP como resistência à tração, módulo de elasticidade e aderência das barras ao concreto. Os resultados encontrados, para todos os diâmetros ensaiados, foram superiores aos recomendados pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021). A resistência à tração e o módulo de elasticidade apresentaram uma tendência de queda com o aumento do diâmetro. O comportamento à flexão foi caracterizado pelo ensaio de flexão a quatro pontos em vigas de seção transversal de 15 x 30 cm e 200 cm de comprimento. Foram ensaiadas quatro vigas: G-SF-SC (sem adição de fibras e sem armadura de confinamento); G-SF-C (sem adição de fibras e com armadura de confinamento); G-F-SC (com fibras e sem armadura de confinamento); e G-F-C (com fibras e armadura de confinamento). As vigas de concreto armado com barras de GFRP apresentaram comportamento bilinear para a carga versus deslocamento vertical. A adição de 1% de macrofibras de polipropileno e armadura de confinamento melhoraram a capacidade de carga e conferiram maior ductilidade as vigas. Também contribuíram para a redução dos deslocamentos verticais e abertura de fissuras, até a carga de serviço.

Palavras chaves: Barras de GFRP; Concreto com fibras; Macrofibras de Polipropileno; Comportamento à flexão; Armadura de confinamento.

ABSTRACT

Glass Fiber Reinforced Glass Bars (GFRP) are viable alternatives to increase the durability of a reinforced concrete structure due to its strength-to-strength characteristics and for being a corrosive material. It also has the advantages of low specific weight, low thermal conductivity and electromagnetic transparency. Understanding the behavior of the mechanical application of GFRP bars and the structural elements, in which the bars are associated, is of paramount importance for reliability and in the national market. With this perspective, this work on the flexural behavior of reinforced concrete beams with longitudinal GFRP evaluation bars and steel stirrups with and without the addition of polypropylene fibers and confining concrete. The first step of this work, were carried out about focused on the characterization of the bars, performing tests of tensile and compressive strength, and young's modulus, and bond strength by pull out tests. The results found were positive in all tested diameters, being higher than those recommended by the Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) The tensile strength and Young's the modulus of elasticity values decreased showed a downward trend with increasing diameters The flexural behavior was characterized by the four-point bending test on beams with cross-section of 15 x 30 cm and 200 cm in length. Four beams were tested: GSF-SC (without addition of fibers and without confining concrete); G-SF-C (without addition of fibers and with confining concrete); G-F-SC (with fibers and without confining concrete); and G-F-C (with fibers and confining concrete). The reinforced concrete beams with GFRP bars showed bilinear behavior for load versus mid-span deflection. The addition of 1% of polypropylene macrofibers and confining concrete improved the load capacity and conferred greater ductility to the beams. They also contributed to the reduction of the deflections and crack opening, at the service load.

Key words: GFRP bars; Concrete with fibers; Flexural behavior of beams; Polypropylene Macrofibers; confining concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. a) Reforço “Soft-eye” para parede de diafragma do túnel; (b) Armadura de FRP na parede do tanque.	16
Figura 2. Ponte Old Olds Bay (a); Canal de Mitigação de Inundações (b); Subestação Elétrica (c).	25
Figura 3. Abertura de fissuras no concreto sem fibras e com fibras.	26
Figura 4. Comportamento do concreto com fibras pós-fissuração.	26
Figura 5. (a) Microfibras de monofilamento; (b) Microfibras fibriladas; (c) Macrofibras sintéticas.	28
Figura 6. Gráfico Força x deslocamento de vigas híbridas.	29
Figura 7. Detalhamento das vigas armadas com GFRP.	30
Figura 8. Gráfico Força x deslocamento.	30
Figura 9. Abertura de fissuras.	31
Figura 10. Detalhamento armadura (Issa, Metwally e Elzeiny (2011)).	32
Figura 11. Gráfico Força x deslocamento.	32
Figura 12. Gráfico Força x deslocamento vertical	33
Figura 13. Abertura de fissuras (a) concreto convencional (b) concreto com fibras.	34
Figura 14. Gráfico Força x deslocamento vertical (Matos et al. (2012)).	35
Figura 15. Fator de redução em função da taxa de armadura.	41
Figura 16. Diagrama de esforços para esmagamento do concreto.	41
Figura 17. Diagrama de esforços para ruptura da armadura de FRP.	42
Figura 18. Diagrama de tensões para esmagamento do concreto.	48
Figura 19. Diagrama de tensões para ruptura da armadura de FRP.	49
Figura 20. Área de concreto circundante para cálculo da armadura efetiva.	51
Figura 21. Gráfico tensão-deformação vigas com taxa (0,9 p_{fb}).	53
Figura 22. Gráfico tensão-deformação vigas com taxa (1,4 p_{fb}).	54
Figura 23. Gráfico força x deslocamento.	54
Figura 24. Modo de ruptura das vigas (a) Esmagamento do concreto (b) Ruptura da barra de GFRP	55
Figura 25. Fluxograma do programa experimental.	56
Figura 26. Granulometria agregado miúdo.	58

Figura 27. Granulometria agregado graúdo.....	58
Figura 28. Abatimento do tronco de cone. (a) concreto sem adição de fibras (160 mm); (b) concreto com adição de fibras (150 mm).....	61
Figura 29. Fibra de polipropileno de 54mm.	62
Figura 30. Ensaio de resistência à tração residual	63
Figura 31. Balança para determinação do diâmetro efetivo.	65
Figura 32. Modelo de ancoragem das barras de GFRP.	67
Figura 33. Ancoragem das barras de GFRP	68
Figura 34. Aplicação de gelo para retardar o tempo de pega da argamassa.	69
Figura 35. Detalhe das tampas.....	69
Figura 36. (a) Ensaio de tração - Barra de GFRP; (b) Extensômetro.	70
Figura 37. Modelo do corpo de prova para o ensaio de arrancamento.	72
Figura 38. Forma dos corpos de prova do ensaio de arrancamento.	72
Figura 39. Posicionamento do corpo de prova para o ensaio de arrancamento.....	73
Figura 40. Armadura da viga de concreto sem confinamento	74
Figura 41. Armadura da viga de concreto com confinamento.	75
Figura 42. Posicionamento da armadura na forma.....	76
Figura 43. Dispositivo para evitar o deslocamentos na forma.	76
Figura 44. Viga em processo de cura.....	77
Figura 45. Esquema do ensaio de flexão a quatro pontos.	77
Figura 46. Detalhamento da instrumentação das vigas.....	78
Figura 47. Extensômetro fixo na armadura longitudinal	78
Figura 48. QuantumX-MX840.....	78
Figura 49. Ensaio de flexão a quatro pontos.	79
Figura 50. Correlação de Imagens	80
Figura 51. Resultado do ensaio de resistência à tração residual.	83
Figura 52. Corpo de prova CP2.....	83
Figura 53. Corpo de prova CP4.....	83
Figura 54. Ruptura das barras de GFRP no ensaio de tração.....	84
Figura 55. Gráfico tensão de tração x deformação das barras de GFRP.....	85
Figura 56. Efeito Shear Lag.....	86

Figura 57. Modo de falha da viga G-SF-SC.....	88
Figura 58. Modo de falha viga G-SF-C.....	88
Figura 59. Modo de falha da viga G-F-SC.....	89
Figura 60. Modo de falha da viga G-F-C.	90
Figura 61. Gráfico Momento resistente x deslocamento.	92
Figura 62. Deformação da armadura longitudinal das vigas armadas com GFRP. ...	93
Figura 63. Detalhe da deformação da armadura no Estádio I.	93
Figura 64. Influência do confinamento na deformação (vigas com adição de fibra). 94	
Figura 65. Influência do confinamento na deformação (vigas sem adição de fibra). 94	
Figura 66. Influência da adição de fibras na deformação (vigas com confinamento).	94
Figura 67. Influência do confinamento na deformação (vigas sem confinamento). ...	94
Figura 68. Gráfico Carga x Flecha com curvas analíticas.	96
Figura 69. Gráfico Carga x Flecha G-SF-SC.....	97
Figura 70. Gráfico Carga x flecha G-SF-C.....	97
Figura 71. Gráfico Carga x flecha G-F-SC.....	97
Figura 72. Gráfico Carga x flecha G-F-C.	97
Figura 73. Abertura de fissuras viga G-SF-SC (DIC).....	98
Figura 74. Abertura de fissuras viga G-SF-C (DIC).	98
Figura 75. Abertura de fissuras viga G-F-SC (DIC).	99
Figura 76. Abertura de fissuras viga G-F-C (DIC).	99
Figura 77. Gráfico Força vs abertura de fissuras.....	101
Figura 78. Abertura de fissuras e comportamento teórico (concreto sem fibras). ..	102
Figura 79. Abertura de fissuras e comportamento teórico (concreto com fibras). ..	102
Figura 80. Gráfico Força x Abertura de fissuras (limites de serviço).	103
Figura 81. Fissura de cisalhamento na viga G-SF-SC	103
Figura 82. Fissura de cisalhamento na viga G-SF-C.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades mecânicas de diferentes fibras.	19
Tabela 2. Densidade de barras de reforço (g/cm ³).	21
Tabela 3. Coeficiente de expansão térmica.....	21
Tabela 4. Propriedades das barras de GFRP.....	22
Tabela 5. Características das barras de GFRP.	23
Tabela 6. Propriedades típicas de fibras usadas como reforço.	27
Tabela 7. Resultados experimentais de Matos et al. (2012).	36
Tabela 8. Fator de redução ambiental.....	38
Tabela 9. Recomendações de espessuras mínimas pra vigas não protendidas e lajes unidirecionais.	45
Tabela 10. Fator de redução ambiental.	47
Tabela 11. Abertura de fissura limite para estruturas armadas com FRP.....	52
Tabela 12. Detalhamento das vigas.	53
Tabela 13. Identificação das vigas.....	57
Tabela 14. Consumo de material.	59
Tabela 15. Ensaio de caracterização do concreto.	60
Tabela 16. Número de corpos de prova (CP).	60
Tabela 17. Propriedades das fibras sintéticas KraTos.....	61
Tabela 18. Ensaio e normas para a caracterização de propriedades mecânicas das barras de GFRP.	64
Tabela 19. Propriedades das barras de GFRP fornecidas pela Haizer Building Solutions.....	65
Tabela 20. Diâmetro efetivo das barras de GFRP.	66
Tabela 21. Diâmetros e áreas nominais das barras reforçadas com fibras segundo a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).	66
Tabela 22. Diâmetros e áreas nominais das barras reforçadas com fibras segundo ASTM D7957-17.....	67
Tabela 23. Comprimento barra de GFRP para ensaio de tração.....	68
Tabela 24. Taxa de armadura e momento resistente utilizando valores característicos dos materiais.....	74

Tabela 25. Resultados caracterização para ensaio de flexão.....	81
Tabela 26. Resistência à tração residual	82
Tabela 27. Resultado do ensaio de tração direta.....	84
Tabela 28. Resultados dos módulos de elasticidade das barras de GFRP.	86
Tabela 29. Resultados ensaio de arrancamento em barras de GFRP.....	87
Tabela 30. Dados usados no dimensionamento teórico.	91
Tabela 31. Momento resistente.....	91
Tabela 32. Valores de flecha máxima segundo as normas.	95
Tabela 33. Deslocamentos apresentados pelas vigas.....	95
Tabela 34. Valores de norma abertura de fissuras para carga de serviço.	100
Tabela 35. Abertura de fissuras pela Prática Recomendada.....	100
Tabela 36. Abertura de fissuras pela ACI 440.	100

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Justificativa	17
1.2. Objetivo Principal.....	18
1.3. Objetivos Específico	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. Compósitos de FRP	19
2.1.1. Fibras Contínuas	19
2.1.2. Matriz polimérica.....	19
2.1.3. Propriedades Físicas das barras de FRP	20
2.1.4. Propriedades Mecânicas das barras de GFRP.....	21
2.1.5. Durabilidade.....	23
2.2. Aplicação das barras de GFRP	24
2.3. Concreto com adição de fibras dispersas.....	25
2.3.1. Concreto armado com barras de GFRP	28
2.4. Confinamento do concreto	34
2.5. Dimensionamento de estruturas armadas com FRP	36
2.5.1. ACI 440.1R-15	36
2.5.2. Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).....	46
2.6. Influência da taxa de armadura no modo de ruptura.	52
3. METODOLOGIA.....	56
3.1. Programa experimental	56
3.2. Primeira Etapa: Caracterização dos materiais	57
3.2.1. Caracterização do concreto	57
3.2.2. Caracterização do concreto com fibras.....	61
3.2.3. Caracterização das barras de GFRP.....	64

3.3. Segunda Etapa: Vigas armadas com barras de GFRP com adição de fibras e armadura de confinamento.....	73
3.3.1. Arranjo da armadura de GFRP.....	73
3.3.2. Processo de moldagem e cura das vigas.....	75
3.3.3. Ensaio de flexão a quatro pontos.....	77
3.4. Análise dos dados.....	80
4. ANÁLISE DE RESULTADOS	81
4.1. Caracterização do concreto.....	81
4.1.1. Ensaio de Resistência à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais).....	82
4.2. Caracterização das barras de GFRP.....	84
4.2.1. Resistência à tração das barras de GFRP.....	84
4.2.2. Módulo de Elasticidade das barras de GFRP.....	86
4.2.3. Ensaio de arrancamento.....	87
4.3. Ensaio de flexão a quatro pontos em vigas armadas com aço e GFRP.	87
4.3.1. Modo de ruptura	87
4.4. Comportamento à flexão: análise comparativa entre teórico e experimental.	90
4.4.1. Capacidade de carga.....	91
4.4.2. Deformação da armadura longitudinal.....	93
4.4.3. Análise dos deslocamentos verticais.....	95
4.4.4. Abertura de fissuras.....	97
5. CONCLUSÃO.....	105
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
APÊNDICE A – Pré-dimensionamento para determinação da armadura de flexão e cisalhamento.....	114

APÊNDICE B - Dimensionamento da viga de concreto sem fibra armada com GFRP – ACI 440.1R-15	118
APÊNDICE C - Dimensionamento da viga de concreto sem fibra armada com GFRP – Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021)	120
APÊNDICE D - Dimensionamento da viga de concreto com fibra armada com GFRP – Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021)	123

1. INTRODUÇÃO

A alcalinidade do concreto é responsável por oferecer proteção ao aço, presente como armadura em estruturas de concreto armado. Quando exposto a condições ambientais agressivas, como a presença de cloretos, essa alcalinidade pode ser neutralizada, danificando a proteção ao aço e causando sua corrosão, podendo levar a estruturas à instabilidade (FIB BULLETIN 40, 2007). Na busca por materiais alternativos surgem os Polímeros Reforçados com Fibras (FRP – Fibre-Reinforced Polymer).

Os FRP são materiais compósitos de fibras envoltas em uma matriz polimérica. Individualmente os materiais não apresentam propriedade estruturais, mas quando combinados adquirem propriedades físicas e mecânicas desejáveis. Seu comportamento depende dos materiais constituintes e do arranjo entre as fibras e a matriz polimérica.

As fibras são responsáveis por garantir a resistência e a rigidez ao compósito e a resina (polímero) por confinar as fibras dando forma ao material. Entre as vantagens apresentadas pelos FRP destacam-se sua resistência à corrosão e a possibilidade de melhorar suas propriedades mecânicas pela orientação das fibras, tornando-os aplicáveis em diferentes indústrias (NANNI; DE LUCA; JAWAHERI ZADEH, 2014).

As fibras podem ser de aramida, carbono, vidro, entre outras. As barras GFRP (polímeros reforçados com fibras de vidro) são mais utilizadas que as barras de aramida e carbono, por razões econômicas (YOU *et al.*, 2017)

A princípio, as barras de GFRP foram consideradas uma alternativa viável de substituição do reforço de aço apenas para o concreto polimérico devido a diferença de expansão térmica que ocorria entre os materiais. Até meados dos anos 70 as barras de GFRP não eram consideradas a melhor solução comercial. Somente nos anos 80, com a demanda por reforços não metálicos em locais de instalação de equipamentos médicos de ressonância magnética, as barra de polímero apareceram como uma alternativa para a construção civil e seu uso cresceu para esse tipo de construção (ACI 440.1R, 2015).

No Brasil esta tecnologia ainda não é muito difundida. Porém, em alguns países como o Japão, as barras de GFRP foram utilizadas na construção de mais de 200 pontes, algumas já em serviço por mais de 10 anos (ACI 440.1R, 2015).

As áreas com maior uso de FRP são construções de pontes rodoviárias, pisos de estacionamentos, soft-eyes em túneis (Figura 1a), estruturas marítimas e tanques de armazenamento de água (Figura 1b). A escolha do reforço de FRP nestas estruturas ocorreu, sobretudo, por sua resistência à corrosão e flexibilidade de instalação (BENMOKRANE, 2016)

Figura 1. a) Reforço “Soft-eye” para parede de diafragma do túnel; (b) Armadura de FRP na parede do tanque.



Fonte: Benmokrane, 2016.

Na última década estudos apresentaram as vantagens e eficácia do uso das barras de GFRP como armadura para estruturas de concreto. Mesmo apresentando grandes vantagens, as barras de FRP possuem comportamento frágil devido ao seu comportamento elástico-linear até a ruptura e apresentam baixo módulo de elasticidade que é responsável por gerar deflexões excessivas em elementos estruturais como as vigas (ATTIA et al., 2019). Estes grandes deslocamentos verticais também induzem a formação de fissuras com grandes aberturas. Neste cenário, para estruturas de concreto armado com barras de GFRP submetidos à flexão, comumente, a verificação do Estado Limite de Serviço comanda o dimensionamento do elemento estrutural.

Estudos apontam alternativas para melhorar o desempenho do concreto armado com barras de FRP que incluem armaduras híbridas, melhorar as propriedades compressivas do concreto para que as altas resistências à tração das barras possam ser melhor aproveitadas e adição de fibras descontínuas, no intuito de melhorar o desempenho em serviço de vigas (WU et al., 2019; SUN et al., 2021; LIU

et al., 2020). As fibras conferem as vigas um comportamento pseudo-ductil, resultante da capacidade da fibras em conferir ao concreto resistências residuais pós fissuração (CHELLAPANDIAN; MANI; SURIYA PRAKASH, 2020).

Outra alternativa inclui o aumento de reforço no meio do vão com o confinamento do concreto na região central, dado pelos estribos, para aumentar capacidade de carga e a ductilidade da viga (ATTIA *et al.*, 2019; BASA; ULICEVIC; ZEJAK, 2018).

1.1. Justificativa

Nos dias atuais, a busca por materiais alternativos na construção civil é constante, seja para melhorar suas propriedades mecânicas, para redução de gastos e de impactos ambientais.

Em estruturas de concreto armado, há um anseio de uso de materiais que possibilite aumento da vida útil das estruturas e menores gastos com manutenção. As barras de GFRP são capazes de garantir maior durabilidade ao elemento estrutural devido a suas propriedades mecânicas e físicas.

A aplicação dos compósitos de GFRP está difundida em diversas áreas da construção civil como construções de pontes rodoviárias, estruturas marítimas, tanques de armazenamento e principalmente em ambientes mais agressivos.

Embora em outros países como os EUA, Japão, Rússia e Canadá o uso de FRP em estruturas de concreto armado seja normatizado, no Brasil ainda não há normas que regulamentam seu uso, contribuindo para a baixa utilização do material. Um grande avanço na área foi a publicação da Prática Recomendada IBACON/ABECE (2021) sobre Estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras (FRP).

Dentre as diversas vantagens apresentadas pelo das barras de GFRP, algumas propriedades demandam atenção. As barras de GFRP são materiais de comportamento frágil, apresentando comportamento elástico-linear até a ruptura e falha abrupta e possuem baixo módulo de elasticidade, responsável por gerar grandes deslocamentos verticais em vigas armadas com GFRP. Tendo em vista estes aspectos, o dimensionamento de viga de concreto com GFRP regularmente é

governado pelo Estado Limite de Serviço (deslocamentos e fissuração), segundo as normas (ACI 440.1R-15; PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE (2021)).

Por esse motivo, este trabalho pretende avaliar mecanismos que possibilitem incremento de ductilidade, aumento da rigidez e redução da abertura de fissura em vigas de concreto armado com barras de GFRP.

1.2. Objetivo Principal

Esse trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico de vigas de concreto armado com barras de Polímero Reforçado com Fibras de Vidro (GFRP) submetidas à flexão com adição 1 % de fibras de polipropileno descontínuas, em volume de concreto, na perspectiva de melhorar o comportamento pós fissuração das vigas. Também pretende avaliar se o incremento da armadura de confinamento no vão central das vigas, confere ao elemento estrutural um comportamento pseudo-dúctil, para que a ruptura não ocorra de maneira abrupta.

1.2.1. Objetivos Específicos

Alguns objetivos específicos foram propostos:

- Caracterização das barras de Polímero Reforçado com Fibras de Vidro (GFRP) quanto à sua resistência à tração, módulo de elasticidade e aderência ao concreto.
- Verificar a influência da adição de fibras descontínuas (no concreto) no controle da fissuração, incremento de ductilidade e aumento da rigidez.
- Verificar a influência da armadura transversal de confinamento, presente no terço central, no modo de falha e ductilidade do elemento.
- Verificar a compatibilidade entre os resultados dos ensaios experimentais com as formulações de dimensionamento adotadas pelas normas ACI 440.1R- 15 e Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Compósitos de FRP

2.1.1. Fibras Contínuas

O núcleo das barras de FRP é constituído por fibras contínuas estiradas. As fibras são produzidas com materiais que apresentam elevada resistência, rigidez, tenacidade e durabilidade. Diversos fatores influenciam no desempenho das fibras, entre eles estão a forma, comprimento e sua composição química (ISIS, 2007). Atualmente as fibras mais utilizadas na produção de barra de FRP são vidro, carbono e aramida.

As fibras de vidro podem ser danificadas quando inseridas em meio alcalino, contudo, a adição de zircônio durante a produção da fibra de vidro permite a produção de fibras de vidro álcali-resistentes (AR-vidro).

As fibras de basalto são um material mais recente que possui como vantagem a grande disponibilidade de matéria-prima, com uso em menor escala em relação as outras fibras (REICHENBACH et al., 2021). A Tabela 1 mostra as principais propriedades das fibras de vidro álcali-resistentes, carbono e basalto.

Tabela 1. Propriedades mecânicas de diferentes fibras.

Fibra	Densidade (g/cm³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)
AR-Vidro	2,7	76	2000
Carbono	1,73-1,96	200-500	1750-7000
Basalto	2,75	89	2000-4840

Fonte: Reichenbach, 2021

As fibras de vidro são mais utilizadas na produção de barras de FRP devido ao custo do material. A produção das barras de GFRP é relativamente mais barata.

2.1.2. Matriz polimérica

A matriz polimérica presente nas barras de FRP, além de atuar como um mecanismo de proteção das fibras, é responsável por transferir os esforços solicitantes para as fibras. No processo de fabricação de compósitos, a escolha inadequada da matriz pode influenciar negativamente em suas propriedades finais (ISIS, 2007).

Os polímeros podem ser classificados em duas classes, os termoplásticos e termofixo. As resinas termofixas endurecem quando são submetidas a elevadas temperaturas, não retornando ao estado líquido. Diferentemente, as resinas termoplásticas são liquefeitas com o aquecimento e solidificadas com o resfriamento (EL-MOGY, 2011).

As resinas termofixas são mais utilizadas na produção dos compósitos de FRP, devido à melhor estabilidade térmica que apresentam, além de exibirem maior resistência à fluência, quando comparadas às resinas termoplásticas. Sua aplicação ocorre no estado líquido, no qual a fibra é embebida pela matriz polimérica. Entre as resinas termofixas mais utilizadas estão o poliéster, viniléster e epóxi (ISIS, 2007).

Segundo Fiore e Valenza (2013), as resinas epóxi, em comparação às outras termofixas (viniléster e poliéster), apresentam propriedades mecânicas vantajosas, sendo mais resistentes à absorção de umidade e em ambientes corrosivos. São consideradas resinas de alto desempenho. Assim, quando usadas na produção de barras de FRP, garantem maiores proteção as fibras internas das barras.

O uso de resinas termoplásticas não é muito difundido na produção de barras de FRP. O uso das resinas termoplásticas permite que as barras sejam dobradas pós-produção e, também, são materiais termo soldáveis (ações que não são possíveis com o uso de termofixos). Benmokrane et al. (2021) investigaram a durabilidade e propriedades de fluência de barras de GFRP com matriz termoplástica. As barras analisadas cumpriram todos os requisitos da ASTM D7957 e CSA S807, com exceção da absorção de umidade. As propriedades físicas e mecânicas não apresentaram diferença significativa com relação as barras de GFRP com termofixos.

2.1.3. Propriedades Físicas das barras de FRP

As barras de FRP são influenciadas pelas suas propriedades físicas e mecânicas, podendo ser projetadas e fabricadas para atender a requisitos específicos a depender de sua aplicação (FIB BULLETIN 40, 2007).

A Tabela 2 apresenta a densidade de diferentes barras de FRP, com fibra de vidro (GFRP), de carbono (CFRP) e de aramida (AFRP), em comparação ao aço.

Tabela 2. Densidade de barras de reforço (g/cm³).

Aço	GFRP	CFRP	AFRP
7,90	1,25-2,10	1,50-1,60	1,25-1,40

Fonte: (ACI 440.1R, 2015) – editada

O coeficiente de expansão térmica (CTE) dos compósitos de FRP depende do tipo de fibra, resina e da fração de volume de cada componente. O CTE longitudinal é dominado pelas propriedades das fibras e o CTE transversal é governado principalmente pela matriz polimérica. O coeficiente de variação térmica para barras com volume de fibras de $V_f = 0,5$ a $0,75$ é dado pela Tabela 3.

Tabela 3. Coeficiente de expansão térmica

Direção	Coeficiente de expansão térmica ($\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)		
	GFRP	CFRP	ARFP
Longitudinal α_L	6 a 10	-9 a 0	-2 a -6
Transversal α_T	21 a 23	74 a 104	60 a 80

Fonte: FIB BULLETIN 40, 2007 – modificada.

2.1.4. Propriedades Mecânicas das barras de GFRP.

El-Hassan et al. (2018) em sua pesquisa apresentaram um comparativo entre dois modelos de barras de GFRP (Tabela 4), produzida por fabricantes diferentes. Os modelos apresentam frações semelhantes de fibra de vidro e utilizaram resina epóxi. Mesmo possuindo características similares a barra Tipo II apresentou valor significativamente superior de resistência à tração. Outra conclusão apresentada pelos autores é que, ao contrário do que ocorre para barras de aço, em que um mesmo módulo de elasticidade pode ser considerado para barras de fabricantes diferentes, nas barras de GFRP ele dependerá do tipo de material utilizado na composição do compósito (fibras e polímero) e dos processos de fabricação (superfície de acabamento).

Tabela 4. Propriedades das barras de GFRP.

Propriedades	unid.	Norma de procedimento	Tipo I	Tipo II
Diâmetro	mm	ASTM D7205 [27]	7,2-8,0	8,0-9,0
Área da seção transversal	mm ²	ASTM D7205 [27]	45	54
Fração de vidro (em massa)	%	ASTM D3171 [20], ASTM E1868 [40]	78	75
Índice de vazios, por volume	%	ASTM D3171 [20], ASTM D2734 [41]	0,1	0,23
Temperatura de transição vítrea	°C	ASTM E1356 [28]	106	125
Resistência à tração	MPa	ASTM D7205 [27]	816	1321

Fonte: El-Hassan et al., 2018 – editada.

Segundo Cunha (2019) os principais fatores que afetam o desempenho das barras são as propriedades mecânicas da fibra quanto ao teor e sua adesão com a composição da sua matriz polimérica. Sendo assim, quanto mais uniforme for a distribuição das fibras, menos heterogêneo é o material, tornando mais difícil a ocorrência de falhas nas áreas enfraquecidas.

2.1.4.1. Resistência à tração e à compressão.

Quando submetidas a esforços de tração, as barras de GFRP não apresentam comportamento plástico antes da ruptura. Os compósitos de FRP têm como característica, quando submetidos à tração, um comportamento de tensão-deformação elástico linear até o momento da falha, não apresentando patamar de escoamento (ACI 440 1R, 2015).

A utilização da barra de FRP em estruturas sujeitas à compressão ainda não é recomendado. O modo de falhas à compressão depende do tipo de fibra, volume e tipo de resina e, em média, a resistência à compressão das barras de GFRP é de 55% da resistência à tração (ACI 440 1R, 2015).

Nos estudos de Tavares (2006), foi apresentada uma comparação entre as propriedades da barra GFRP com alguns outros tipos, com o intuito indicar suas vantagens, conforme Tabela 5.

Tabela 5. Características das barras de GFRP.

	Armadura de aço	Cordoalha de aço	Barra de GFRP	Cordoalha de GFRP	Cordoalha de CFRP
Resistência à tração (MPa)	483-690	1379-1862	517-1207	1379-1724	1650-1724
Tensão de escoamento (MPa)	276-414	1034-1396	Não se aplica (N/A)		
Módulo de elasticidade (GPa)	200	186-200	41-55	48-62	152-165
Alongamento máximo (mm/m)	>0,10	>0,04	0,035-0,05	0,03-0,045	0,01-0,015
Resistência à compressão (MPa)	276-414	N/A	310-482	N/A	N/A
Coefficiente de expansão térmica (10°C)	11,7	11,7	9,9	9,9	0,0
Peso específico	7,9	7,9	1,5-2,0	2,4	1,5-1,6

Fonte: Tavares, 2006.

É possível observar que as barras de GFRP, quando comparadas a armadura convencional de aço, apresentam valores superiores de resistência à tração, à compressão e menor peso específico. Contudo, também há considerável queda no módulo de elasticidade, motivo pelo qual as estruturas que utilizam GFRP como armadura apresentam maiores deformações.

2.1.5. Durabilidade

A resina presente na composição das barras de GFRP, além de transferir os esforços entre as fibras, manter as fibras unidas e garantir estabilidade ao material, tem também como função protegê-las das ações do ambiente (MAZZÚ, 2020). O uso de uma resina inadequada pode comprometer o comportamento mecânico e a durabilidade das barras de GFRP.

Segundo o ACI 440.1R (2015), as barras de FRP são suscetíveis a variações em suas propriedades como resistência e rigidez, dependendo do tipo de ambiente em que elas são expostas, durante ou após a construção. Os ambientes destacados, que comprometem a durabilidade, são: com presença de água, exposição ultravioleta, temperaturas elevadas, soluções alcalinas e soluções salinas.

Quando expostas a ambiente com umidade excessiva, a resina das barras pode absorver a água, causando inchaço da matriz, o que resulta em perdas de capacidade resistente, módulo de elasticidade e deformação última.

Os raios ultravioletas degradam a matriz polimérica pelo processo de fotodegradação devido à quebra de ligações químicas entre as cadeias poliméricas, danificando as propriedades do material. Contudo, este processo de fotodegradação não afeta as barras quando estão protegidas pelo concreto. (COUTO, 2007)

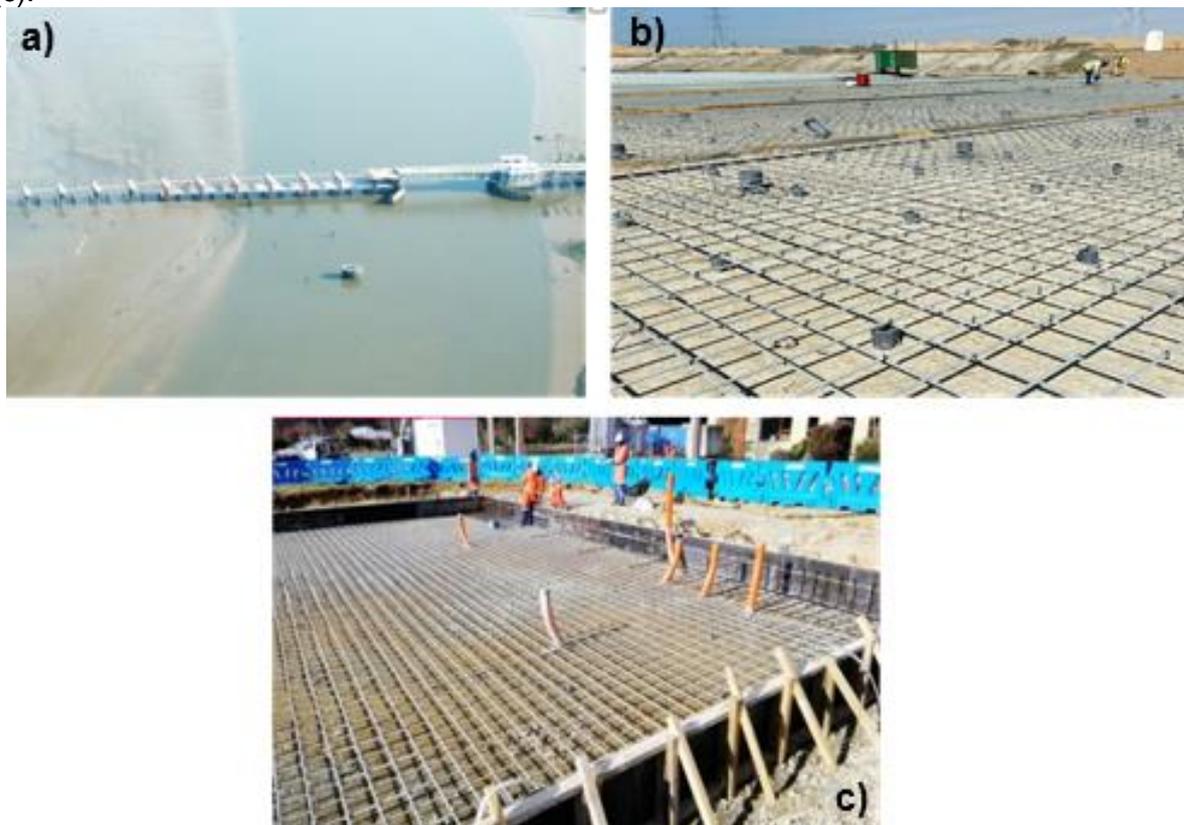
Precauções também devem ser tomadas quando barras de GFRP são utilizadas em estruturas que a resistência ao fogo é um fator significativo de projeto. A exposição a altas temperaturas pode amolecer a matriz polimérica das barras, causando a perda de características como a de ligação, responsável por transferir as tensões para as fibras, e diminuir a aderência entre as barras e o concreto. No estudo realizado por Hajiloo e Green (2018), a temperatura crítica (ou temperatura vítrea) encontrada, na qual a aderência entre barra-concreto ficou abaixo de 8 MPa, estava entre 100°C a 140°C.

2.2. Aplicação das barras de GFRP

Em grandes obras de construção civil, recentes, foram utilizados exclusivamente barras de GFRP como armadura do concreto em diferentes continentes, com objetivos diversos como:

- o reparo da ponte Old Olds Bay, em Astoria, Oregon (Figura 2a), no qual o uso de GFRP garantirá maior durabilidade a estrutura;
- o Canal de Mitigação de Inundações em Jizan, Arábia Saudita (Figura 2b). Por ser uma região propensa a inundações o uso de GFRP mitiga problemas como a corrosão da armadura;
- e a Subestação Elétrica Kikiwa, Nova Zelândia (Figura 2c), que faz uso do material devido suas propriedades de não condutividade eletromagnéticas e, portanto, não causará interferências na estação.

Figura 2. Ponte Old Olds Bay (a); Canal de Mitigação de Inundações (b); Subestação Elétrica (c).



Fonte: Mateenbar™ (<https://www.mateenbar.com/projects/>).

2.3. Concreto com adição de fibras dispersas

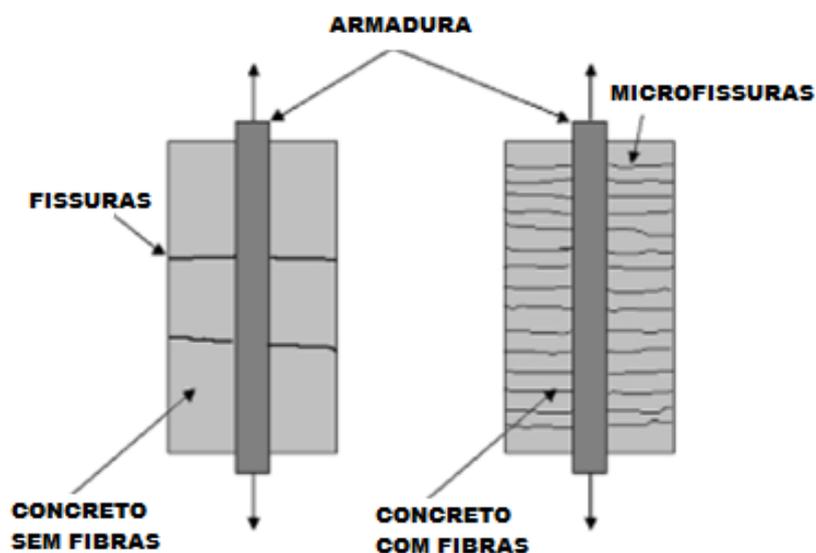
Estruturas de concreto quando submetidas a tensões, sobretudo de tração, apresentam microfissuras que, quando não controladas, expõem o material e sua armadura a ataques de agentes agressivos do meio. A adição de fibras distribuídas aleatoriamente no concreto é feita com o intuito controlar a formação das fissuras (SÁ, 2018).

Quando acrescentadas na matriz cimentícia, as fibras arranjam-se de forma aleatória e descontínua, e essa aleatoriedade contribui para a distribuição das fissuras ao longo do elemento de concreto (DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009).

As fibras influenciam na forma com que as fissuras surgem no elemento de concreto armado (Figura 3). O concreto sem fibras, quando solicitado, apresenta fissuras distantes e com aberturas maiores. A adição de fibras altera esse comportamento. A distribuição descontínua das fibras no concreto faz com que microfissuras distribuam-se ao longo do comprimento, contribuindo para a redução

das aberturas das fissuras, atendendo aos limites dos estados limites de serviço (BRANDT, 2008).

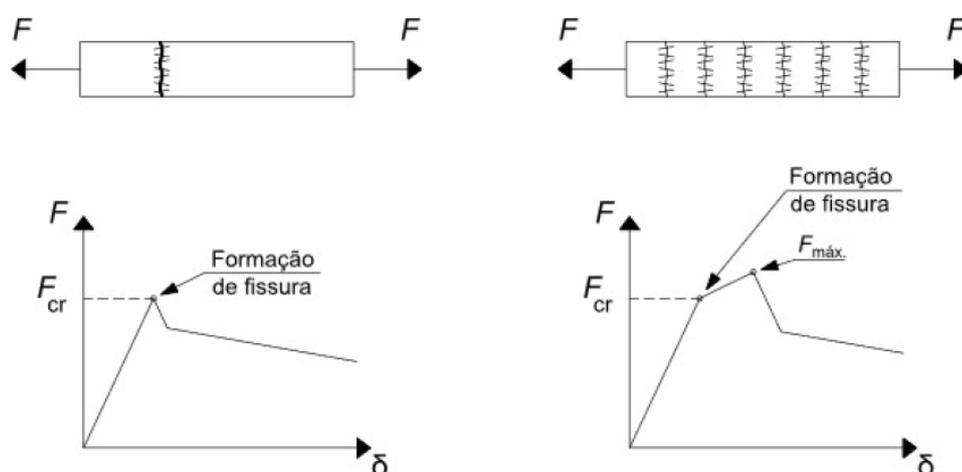
Figura 3. Abertura de fissuras no concreto sem fibras e com fibras.



Fonte: Brandt (2008) – modificada.

O concreto com fibras pode apresentar dois tipos de comportamento pós-fissuração, a depender da fibra e da porcentagem de sua adição ao concreto, sendo eles: *softening*, no qual ocorre a redução gradual da carga resistente após a formação da fissura; e *hardening*, determinado pelo aumento da carga resistente, apresentando múltiplas fissuras até atingir a carga máxima. NBR 16395 (ABNT, 2020). A Figura 4, exemplifica os dois comportamentos

Figura 4. Comportamento do concreto com fibras pós-fissuração.



a) Comportamento de *softening*

b) Comportamento de *hardening*

Fonte: NBR 16395 (ABNT, 2020).

Existem diferentes tipos de fibras e elas são caracterizadas pelo seu material, tamanho, geometria, propriedades e performance na matriz cimentícia. Todas essas características determinam o comportamento da fibra no concreto, porém as propriedades que desempenham papel mais relevante são o módulo de elasticidade e a resistência mecânica das fibras (FIGUEIREDO, 2011).

O módulo de elasticidade de uma fibra pode determinar sua aplicação. Fibras com alto módulo podem ser aplicadas como substituição parcial da armadura, já as fibras com baixo módulo auxiliam na redução da fissuração por retração do concreto (DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009).

As fibras mais utilizadas como reforço do concreto são as macrofibras. A Tabela 6 apresenta diferentes tipos de fibra e suas principais características.

Tabela 6. Propriedades típicas de fibras usadas como reforço.

Fibra	Diâmetro (µm)	Peso específico (g/cm³)	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
Nylon	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

Fonte: Sá, 2018.

As fibras sintéticas são as fibras mais utilizadas em adição ao concreto. Elas derivam de uma gama diversa de materiais como acrílico, aramida, carbono, nylon, basalto, poliolefina, polipropileno e recentemente PVA. As fibras de polipropileno são as mais utilizadas entre elas (HANSEN, B., M. BARMAN, AND T. U. RAHMAN, 2016)

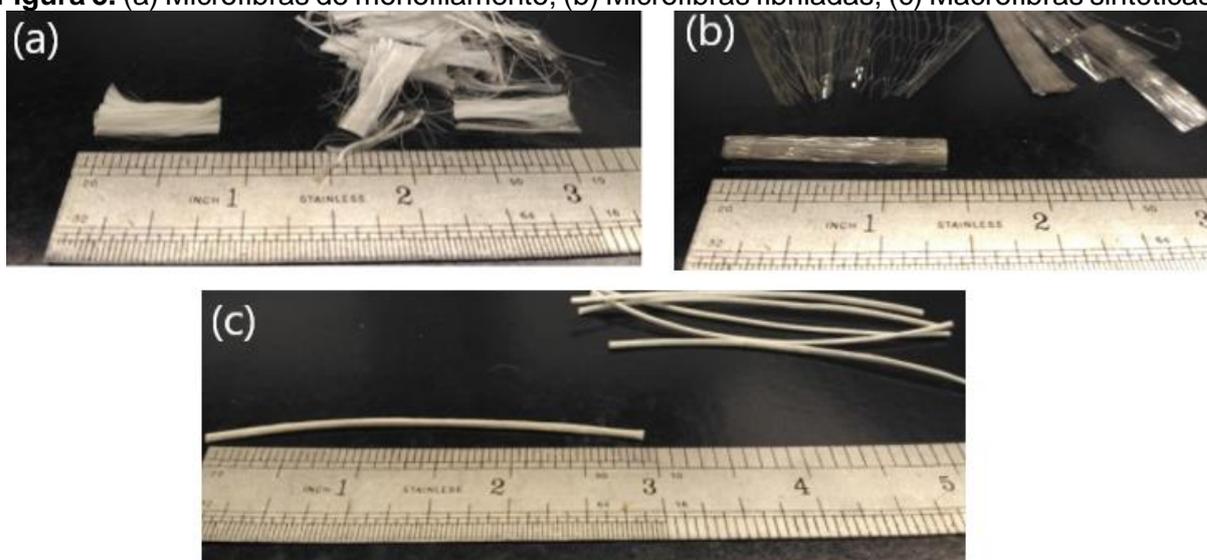
As fibras de polipropileno são classificadas em dois segmentos: as macrofibras e as microfibras.

As microfibras são divididas em duas estruturas: as de monofilamento, como mostra a Figura 5a e as fibriladas, Figura 5b, e cada estrutura proporciona

comportamentos distintos para as fibras. As fibriladas promovem maior adesão entre a fibra e o concreto, em comparação às fibras de monofilamento.

Entre os dois segmentos o uso de macrofibras (Figura 5c) é mais difundido no Brasil (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 5. (a) Microfibras de monofilamento; (b) Microfibras fibriladas; (c) Macrofibras sintéticas.

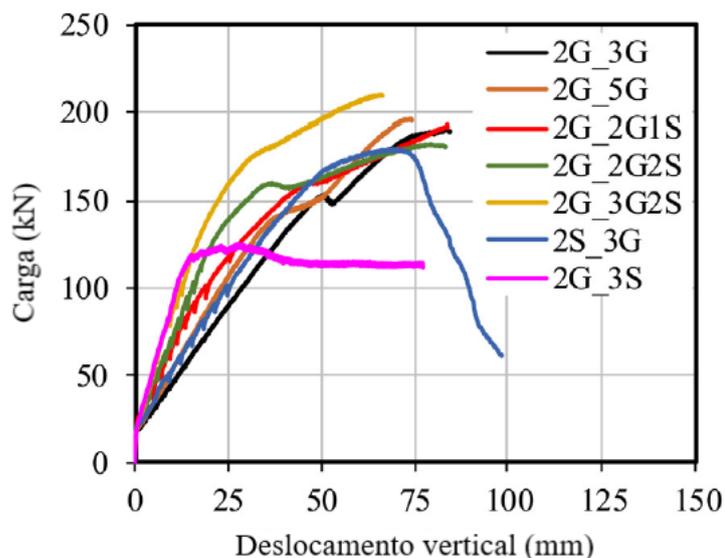


Fonte: Figueiredo, 2011.

2.3.1. Concreto armado com barras de GFRP

Maranan et al. (2019) apresentou um estudo com vigas de concreto armado com barras híbridas. Foram ensaiadas 7 vigas sendo duas com armadura de GFRP e 5 híbridas (GFRP + aço). A Figura 6 apresenta o comportamento Carga versus deslocamentos vertical das vigas ensaiadas. A nomenclatura G representa a armadura de GFRP e S a armadura de aço, a primeira posição indica a armadura de compressão e a segunda posição a armadura de tração.

Figura 6. Gráfico Força x deslocamento de vigas híbridas.



Fonte: Maranan et al. (2019).

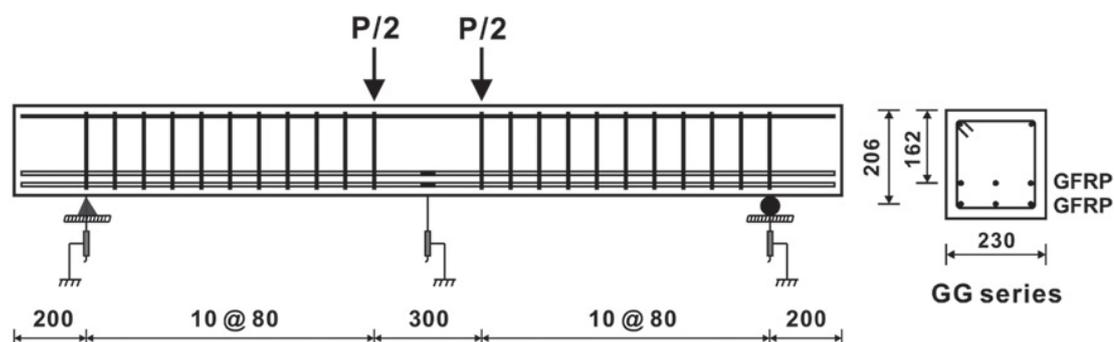
Os resultados mostram que o uso de barras de GFRP em conjunto ao aço, melhorou a ductilidade e capacidade de carga das vigas. Os deslocamentos verticais diminuiriam em média 15% com relação a viga armada com barras de GFRP.

Como esperado a rigidez das vigas aumentaram com o aumento da taxa de armadura. Um aumento de 66% na taxa de armadura reduziu os deslocamentos verticais em 21%. Contudo, a presença de aço influencia no desempenho a longo prazo do concreto armado com GFRP, em especial no que diz respeito à capacidade não corrosiva do elemento.

Outra alternativa encontrada visa melhorar as propriedades do concreto armado com barras de GFRP é a adição de fibras descontínuas. O uso de concreto com fibras pode garantir uma pseudo-ductilidade ao elemento de concreto armado.

Yang et al. (2012) avaliaram o comportamento à flexão de vigas de concreto armado com barras de GFRP com adição de fibras descontínuas de aço e poliolefina. O estudo avaliou a influência da adição de fibras na capacidade de carga, resposta a fissuração e ductilidade. As vigas possuem seção transversal de 230 x 250 mm e 2300 mm de comprimento, possuem duas camadas de armadura, com alturas efetivas de 206 mm (d1) e 162 mm (d2), como mostra a Figura 7. As fibras foram adicionadas em volume de concreto com SF = 1,0% (aço) e SN = 2,0% (poliolefina).

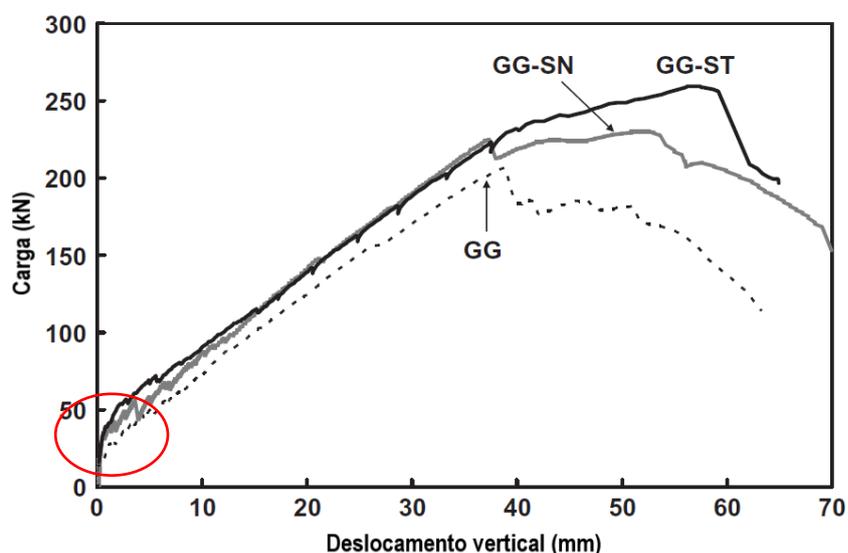
Figura 7. Detalhamento das vigas armadas com GFRP.



Fonte: Yang et al. (2012).

As vigas com adição de fibras apresentam um aumento da carga para a formação das primeiras fissuras. Nas vigas com adição de fibras de aço esse aumento é duas vezes maior que nas vigas sem adição de fibras, como mostra a Figura 8, indicando que a resistência à tração foi influenciada pela adição de fibras. Após a abertura das fissuras ocorre uma redução na rigidez do elemento devido ao baixo módulo de elasticidade das barras de FRP.

Figura 8. Gráfico Força x deslocamento.

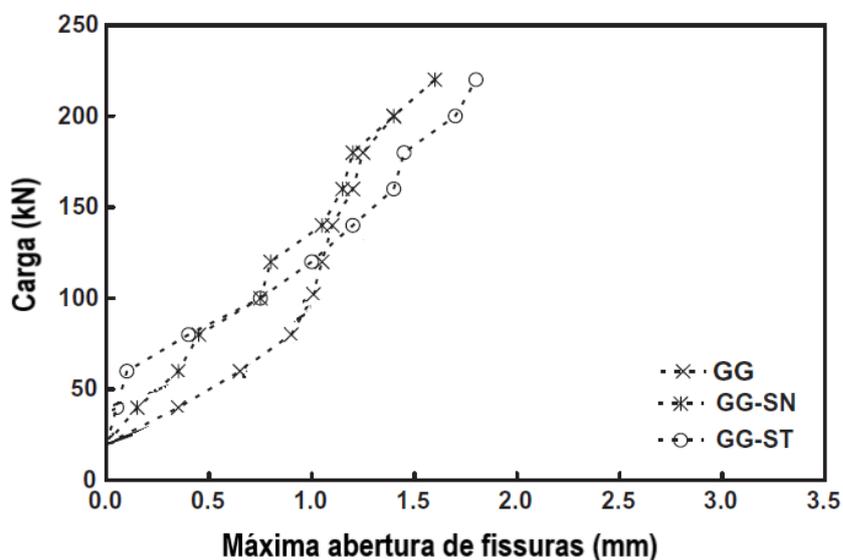


Fonte: Yang et al. (2012) – modificada.

As vigas com fibras sintéticas e de aço apresentaram um aumento na carga de ruptura de 11% e 25%, respectivamente, em comparação a viga sem adição de fibras. As fibras de aço restringiram a formação de fissuras mais profundas, e essa restrição foi menor nas vigas com fibras sintéticas devido ao baixo Módulo de elasticidade da fibra. Nas vigas com adição de fibra a abertura de fissuras é menor que a abertura da viga GG (concreto convencional). Até a carga de 100 kN, a abertura foi controlada

pela ação das fibras, e essa diferença entre as aberturas é reduzida após a carga de 120 kN (Figura 9).

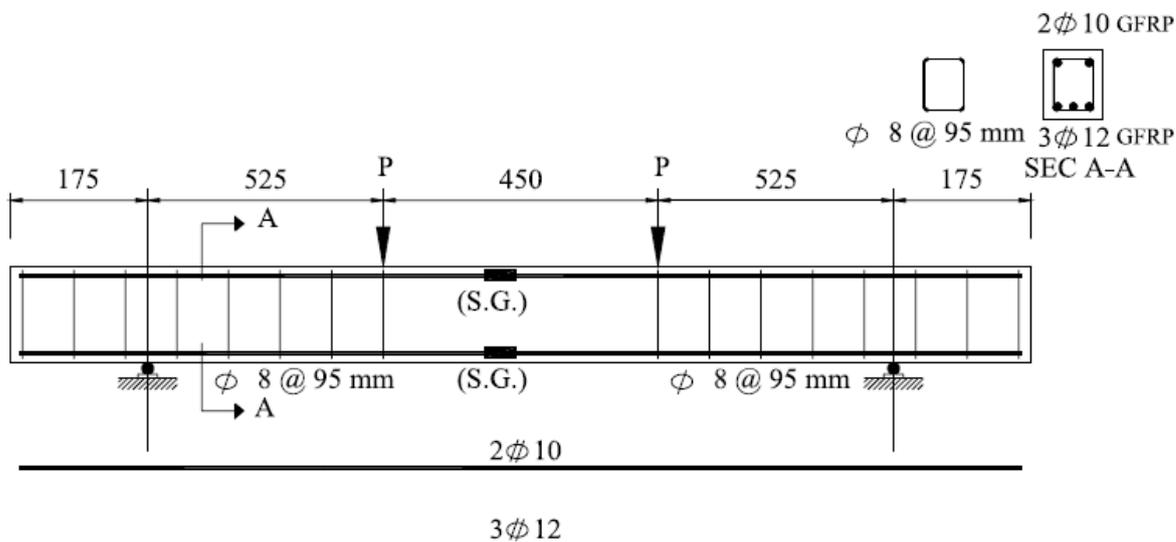
Figura 9. Abertura de fissuras.



Fonte: Yang et al. (2012) – modificada.

No estudo de Issa, Metwally e Elzeiny (2011), os autores avaliaram a influência da adição de fibras, 0,5% em volume de concreto, no comportamento à flexão de vigas armadas com GFRP. Foram ensaiadas sete vigas, divididas em quatro grupos: sem adição de fibras, com adição de fibras de polipropileno, adição de fibras de vidro e adição de fibras de aço. Todas as vigas possuíam seção transversal de 150 x 150 mm e 1850 mm de comprimento (Figura 10). Foi adotado a mesma armadura transversal e longitudinal em todas as vigas. O concreto também era uma variante no estudo as nomenclaturas NO, NP, NG e NS, indicam as vigas com concreto de resistência à compressão de 25 MPa e as nomenclaturas HO, HP e HG resistências de 65 MPa.

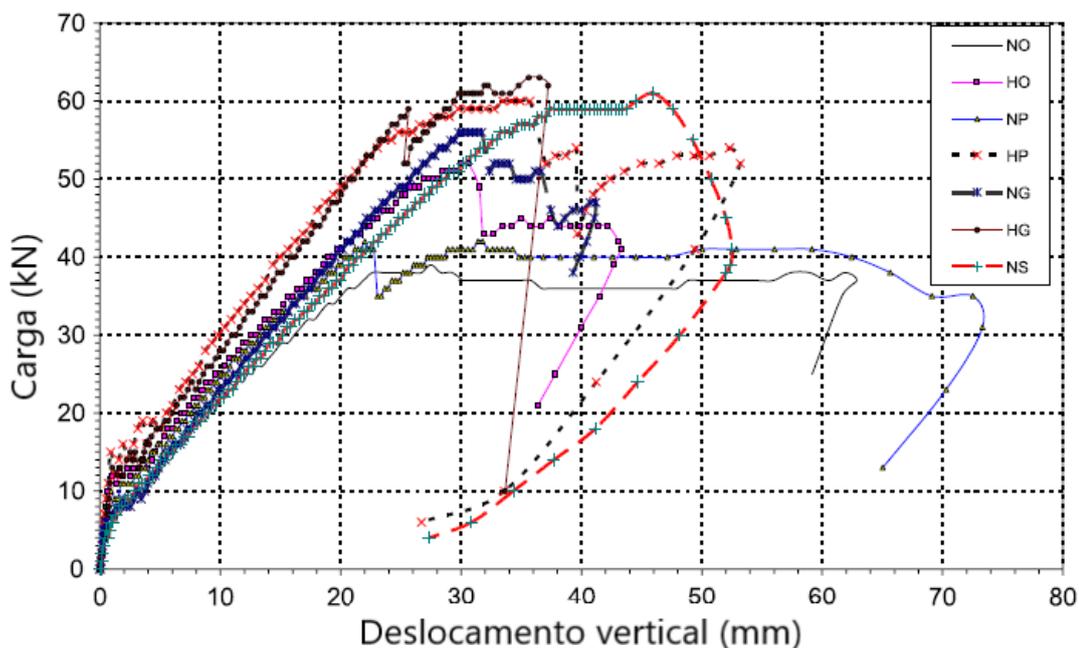
Figura 10. Detalhamento armadura (Issa, Metwally e Elzeiny (2011)).



Fonte: Issa, Metwally e Elzeiny (2011).

As vigas apresentaram modos de ruptura diferentes, sendo divididas em três tipos: ruptura por flexão (NO, NP e HP); flexão combinada com grande fissura de cisalhamento (NG e HG); e flexão e esmagamento do concreto (NS e HO). A Figura 11 apresenta o comportamento das vigas submetidas à flexão.

Figura 11. Gráfico Força x deslocamento.



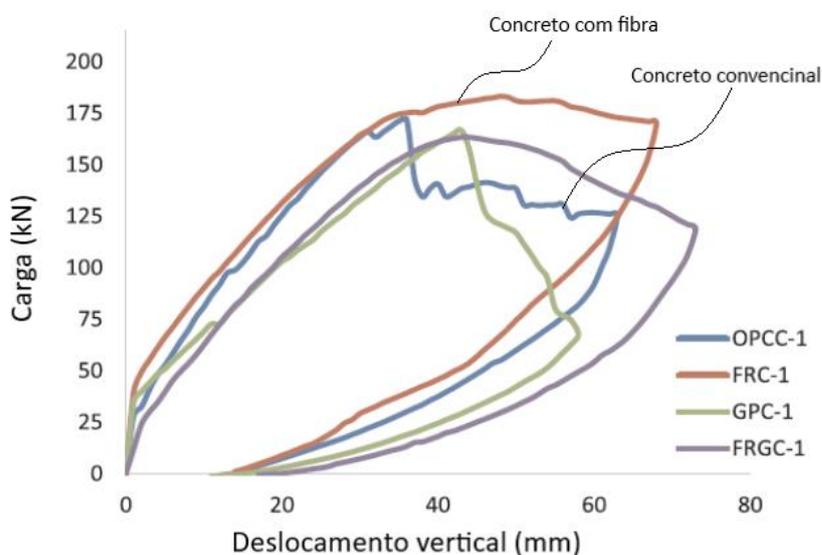
Fonte: Issa, Metwally e Elzeiny (2011) – modificada.

Os resultados mostraram que a capacidade de carga das vigas aumentou com a adição de fibras, com um acréscimo máximo de 21,20%, para a viga HG (fibra de

vidro). O uso de fibras de polipropileno no concreto de resistência de 25 MPa, com relação a viga sem adição de fibras, resultou inicialmente em uma redução na rigidez das vigas e posterior aumento até a ruptura. Porém, na viga com concreto com resistência de 65 MPa o uso das fibras de polipropileno aumentou a rigidez inicial, com pequena alteração até a ruptura. A adição das fibras analisadas (polipropileno, vidro e aço) aumentaram a ductilidade da viga, em especial a fibra de aço. No entanto, segundo Attia et al. (2019), a adição de fibras de aço eleva o seu peso devido à alta densidade do material, além de ser um elemento corrosivo, que atuaria contra a vantagem das barras de GFRP de serem álcali resistentes. Nesse caso, as fibras sintéticas são mais indicadas que as das fibras de aço.

Junaid et al. (2019) avaliou o comportamento à flexão de vigas armadas com barras de GFRP com e sem a adição de fibras de polipropileno. As vigas foram ensaiadas a flexão a quatro pontos com distância de 210 cm entre apoios, com seção transversal de 200 x 300 mm. Todas as vigas foram dimensionadas com taxa de armadura superior a relação $p_f / p_{fb} > 1,0$ e sem estribos na região de cisalhamento nulo da viga. As cargas foram aplicadas a uma distância de 500 mm entre elas. As vigas com concreto convencional são nomeadas como OPCC e as vigas com concreto com fibras FRC, todas foram armadas com barras longitudinais de GFRP de 16 mm e estribos de aço de 10mm. A Figura 12 mostra o comportamento das vigas no diagrama carga versus deslocamento vertical.

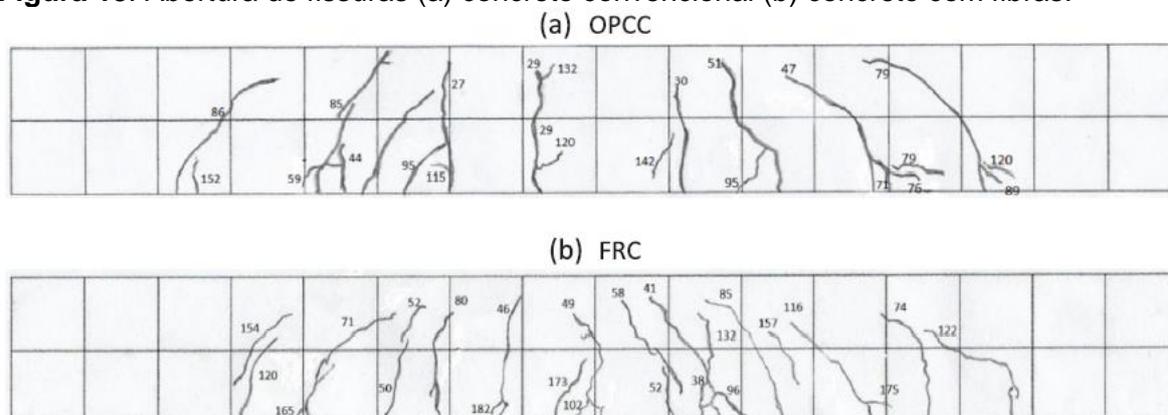
Figura 12. Gráfico Força x deslocamento vertical



Fonte: Junaid et. al (2019) – modificada.

A capacidade de carga das vigas FRC (adição de fibras) aumentou em 10,5% em comparação com a viga OPCC, mesmo com as vigas apresentando concretos de resistências semelhantes. A relação entre a carga aplicada e os deslocamentos apresentados pelas vigas pode ser classificado em quatro etapas: inicialmente apresentam um comportamento linear, muito semelhante entre todas as vigas, até atingir o momento de fissuração; na segunda etapa ocorre a redução da rigidez das vigas, devido a fissuração do concreto, nessa etapa as vigas com adição de fibras apresentam uma rigidez maior, este comportamento se estende até o esmagamento do concreto; na terceira etapa, na qual inicia-se o esmagamento do concreto, e o comportamento é governado pelo ação das fibras, enquanto nas vigas com concreto convencional (OPCC) ocorre a queda brusca da carga, as vigas FRC continuam sustentando as cargas até a quarta etapa onde ocorre a queda da carga com a ruptura da viga. Esse comportamento mostra como a adição de fibras de polipropileno promoveu ductilidade para a viga FRP. As vigas OPCC apresentaram quantidade menor de fissuras, mas aberturas maiores. As vigas com adição de fibras resultaram em maior número de fissuras, mas com aberturas menores, como mostra a Figura 13.

Figura 13. Abertura de fissuras (a) concreto convencional (b) concreto com fibras.



Fonte: Junaid et.al (2019).

2.4. Confinamento do concreto

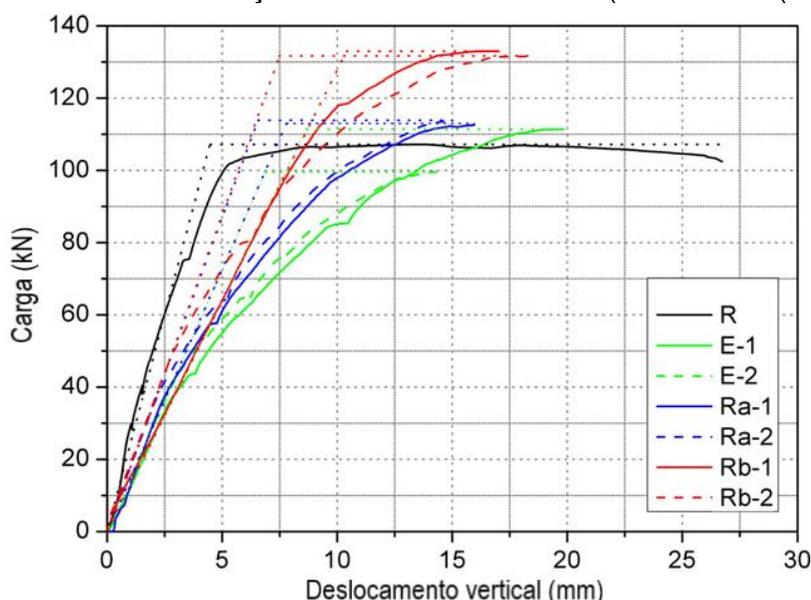
A ductilidade dos elementos de concreto armado é uma característica tão importante quanto sua capacidade de carga. O aumento da armadura longitudinal, que resiste aos esforços solicitantes de tração, pode diminuir a ductilidade de vigas de concreto armado.

As vigas de concreto armado com barras de GFRP comumente são dimensionadas com altas taxas de armadura de tração, que induzem o colapso da estrutura por esmagamento do concreto antes da ruptura da armadura longitudinal de tração. Esses elementos apresentam uma ductilidade muito baixa. Enquanto o aumento da armadura de tração diminui a ductilidade, a armadura de compressão e armadura de confinamento contribuem o aumento da ductilidade (RENIĆ; KIŠIČEK, 2021).

Segundo Delalibera e Giongo (2008), a armadura de confinamento contribui para o aumento da ductilidade em viga de concreto armado, principalmente em vigas que estão dimensionadas no domínio 4 de deformação, no qual ocorre o colapso por esmagamento do concreto. Armadura de confinamento reduz o risco de ruptura frágil.

Matos et al. (2012) avaliou em seu estudo o comportamento à flexão de vigas contínuas armadas com barras de GFRP. Foram ensaiadas vigas de seção transversal de 12 x 10 cm e 200 cm de comprimento, sendo uma viga de referência armada com aço (R), duas vigas armadas com GFRP (E) com momento resistente equivalente ao da viga armada com aço, duas vigas armadas com GFRP modificadas (Ra) com armadura longitudinal superdimensionada e por fim, duas vigas armadas com GFRP (Rb) com armadura simular à viga Ra, mas com armadura de confinamento, com intuito de melhorar a ductilidade da viga em comparação à viga Ra. A Figura 14 apresenta o comportamento a flexão das vigas.

Figura 14. Gráfico Força x deslocamento vertical (Matos et al. (2012)).



Fonte: Matos et. al (2012) – modificada.

O estudo mostrou que o uso da armadura de confinamento garantiu um aumento de 20% na ductilidade da viga Rb em comparação a viga E e Ra, que apresentaram comportamento semelhante. A Tabela 7 apresenta a carga última, momento máximo e a ductilidade de cada viga ensaiada. A ductilidade pode ser dada pela razão entre χ_u/χ_y , no qual χ_u é a curvatura de ruptura e χ_y o “escoamento”. Para o cálculo do “escoamento” considerou-se o início do escoamento do aço (viga R) e a deformação de compressão do concreto na tensão máxima (vigas E, Ra e Rb). A viga com confinamento também apresentou maior capacidade de carga em relação as vigas E e Ra de 22% e 13%, respectivamente. Quanto a ductilidade, a viga R apresenta o melhor comportamento devido ao escoamento da armadura de aço, as vigas E e Ra obtiveram respostas muito semelhantes, quanto a ductilidade, enquanto a viga Rb (maior confinamento) apresentou um aumento na ductilidade de 20%, com relação às vigas E e Ra.

Tabela 7. Resultados experimentais de Matos et al. (2012).

Viga	Carga Ultima (kN)	Momento Máximo (kNm)	Ductilidade (-)
R	107,2	7,7	6,0
E	109,2	11,3	2,1
Ra	118,1	7,3	2,2
Rb	133,6	9,1	2,6

Fonte: Matos et al. (2012).

2.5. Dimensionamento de estruturas armadas com FRP

2.5.1. ACI 440.1R-15

Segundo a ACI 440.1R-15 o dimensionamento de estruturas armadas com FRP é baseado no princípio dos Estados Limites. Devido ao comportamento frágil das barras de FRP e do concreto o dimensionamento pode ser controlado pela ruptura da barra ou esmagamento do concreto. As características do material fazem com que, muitas vezes, os Estados Limites de Serviço governem o dimensionamento dessas estruturas.

2.5.1.1. Propriedade dos materiais.

De acordo com a ACI 440.1R-15 as propriedades dos materiais fornecidas pelo fabricante devem ser adotadas como propriedades iniciais, pois não incluem os efeitos da exposição das barras ao ambiente.

As propriedades dos materiais utilizadas para o dimensionamento são definidas considerando fatores de ponderação que consideram os efeitos de longo prazo e exposição do elemento no ambiente. Os coeficientes consideram o tipo de exposição ao qual o material estará exposto ao longo do tempo.

A resistência à tração de cálculo e a deformação específica de projeto das barras de GFRP são definidas pelas Equações 1 e 2.

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^* \quad (1)$$

Onde:

f_{fu} = resistência à tração de cálculo das barras de FRP, considerando os coeficientes de ponderação;

C_E = fator de redução ambiental das propriedades mecânicas das fibras devido às suas condições de exposição;

f_{fu}^* = resistência à tração característica das barras de FRP onde $f_{fu}^* = f_{u,ave} - 3\sigma$, sendo $f_{u,ave}$ a resistência média à tração de corpos de prova analisados, σ o desvio padrão;

$$\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon_{fu}^* \quad (2)$$

Onde:

ε_{fu}^* = deformação específica de cálculo das barras de FRP

ε_{fu} = deformação específica característica das barras de FRP.

O fator de redução ambiental (C_E) para as barras de FRP de diversas fibras é apresentado pela Tabela 8. O fator de redução adotado deve considerar o tipo e nível de exposição do material ao ambiente.

Tabela 8. Fator de redução ambiental.

Condição de Exposição	Tipo de Fibra	Fator de redução (C_E)
Concreto sem contato com solo e ambiente interno	Carbono	1,0
	Vidro	0,8
	Aramida	0,9
Concreto em contato com solo e ambiente externo	Carbono	0,9
	Vidro	0,7
	Aramida	0,8

Fonte: ACI 440.1R-15.

Os valores de C_E consideram os efeitos da temperatura no comportamento do material, no entanto, as barras de GFRP não devem ser aplicadas em estruturas sujeitas a temperaturas superiores à temperatura de transição vítrea (T_g) da resina usada na fabricação da barra.

2.5.1.2. Comportamento à tração de barras dobradas

A resistência à tração de barras de FRP que contêm dobras é determinada pela Equação 3. Essa equação é adaptada das recomendações da JSCE (1997b).

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

Onde:

f_{fb} = resistência à tração de barras de FRP dobradas

r_b = o raio da região de dobra

d_b = diâmetro nominal da barra de FRP

2.5.1.3. Estados Limites Últimos (ELU)

As vigas de concreto armado são reforçadas com aço para garantir ductilidade ao elemento estrutural. O dimensionamento ocorre de maneira a garantir o escoamento do aço antes do esmagamento do concreto. As barras de GFRP possuem comportamento frágil, isto é, não apresentam escoamento antes da ruptura. Essa característica deve ser considerada no dimensionamento de estruturas armadas com GFRP (ACI 440-1R-15).

No dimensionamento à flexão de vigas armadas com GFRP dois modos de ruptura podem ser considerados: ruptura da barra de FRP e esmagamento do concreto.

Se o colapso ocorrer por ruptura das armaduras de FRP será acompanhado por um comportamento frágil, ou seja, uma ruptura abrupta. O aviso da estrutura estará limitado ao surgimento de grandes aberturas de fissuras e grandes deformações verticais, causadas pelo alongamento da armadura de FRP. O elemento não apresentará ductilidade como é observado em estruturas armadas com aço.

Segundo a ACI 440.1R-15, a ruptura governada pelo esmagamento do concreto comprimido é mais desejável em estruturas armadas com FRP. Ao falhar por compressão a estrutura apresenta comportamento inelástico antes da falha.

Desde que os critérios de resistência e segurança sejam atendidos, os dois modos de falha são aceitos.

Algumas hipóteses devem ser assumidas no dimensionamento:

- Seções planas antes do carregamento permanecem plana pós carregamento;
- A deformação máxima do concreto é de 0,003;
- A resistência à tração do concreto não é considerada;
- A armadura de FRP apresenta comportamento elástico linear até a ruptura;
- Ocorre aderência perfeita entre o concreto e a armadura de FRP.

O momento resistente da viga deve multiplicado pelo fator de redução (ϕ), governado pelo modo de falha esperado no elemento. Esse momento deve ser maior que o momento solicitante, como mostra a Equação 4.

$$\phi M_n \geq M_u \quad (4)$$

Onde:

M_n = Momento resistente da viga

M_u = Momento solicitante da viga

O cálculo do M_n depende do modo de falha, que pode ser governado pela ruptura da armadura longitudinal ou pelo esmagamento do concreto. Para determinar o modo de falha governante seguimos as Equações 5 e 6, correspondente a taxa de armadura e taxa de armadura balanceada, respectivamente.

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (5)$$

$$\rho_{fb} = 0,85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_{fu}} \cdot \frac{E_f \cdot \varepsilon_{cu}}{E_f \cdot \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (6)$$

Se $\rho_f < \rho_{fb}$, o modo falha é governado pela ruptura da barra

Se $\rho_f > \rho_{fb}$, o modo de falha é governado pelo esmagamento do concreto.

Onde:

A_f = taxa de armadura adotada em projeto

b = largura da seção transversal

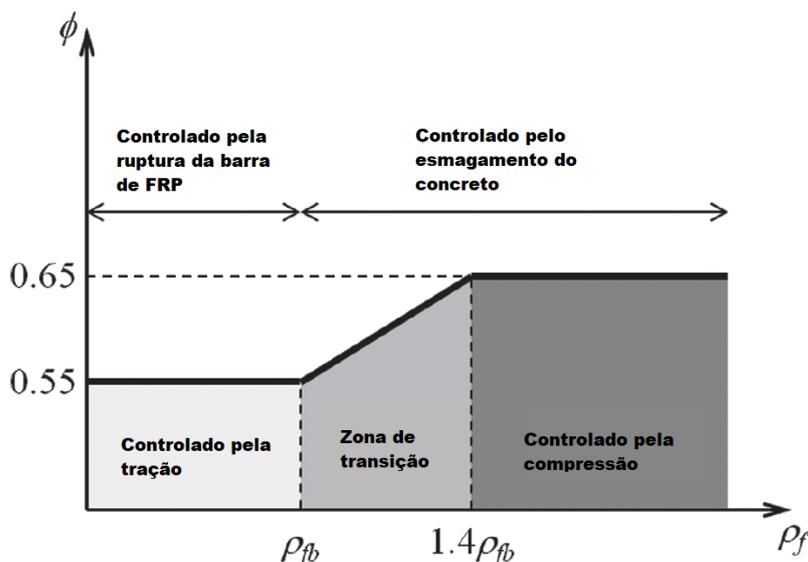
d = distância entre a face superior da viga até o eixo da armadura

O fator de redução (φ) pode ser calculado por meio da Equação 7. Essa equação é representada graficamente pela Figura 15.

$$\varphi = \begin{cases} 0,55 \text{ para } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0,3 + 0,25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \text{ para } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4 \rho_{fb} \\ 0,65 \text{ para } \rho_f \geq \rho_{fb} \end{cases} \quad (7)$$

Quando a relação entre as taxas de armadura é $\rho_f \geq 1,4\rho_{fb}$, a falha do elemento é controlada pelo esmagamento do concreto comprimido e quando $\rho_f \leq \rho_{fb}$ ocorre o colapso por tração e ruptura da armadura de GFRP. Entre as relações existe uma zona de transição, como é mostrada na Figura 15, na qual não é possível determinar com segurança o modo de falha.

Figura 15. Fator de redução em função da taxa de armadura.

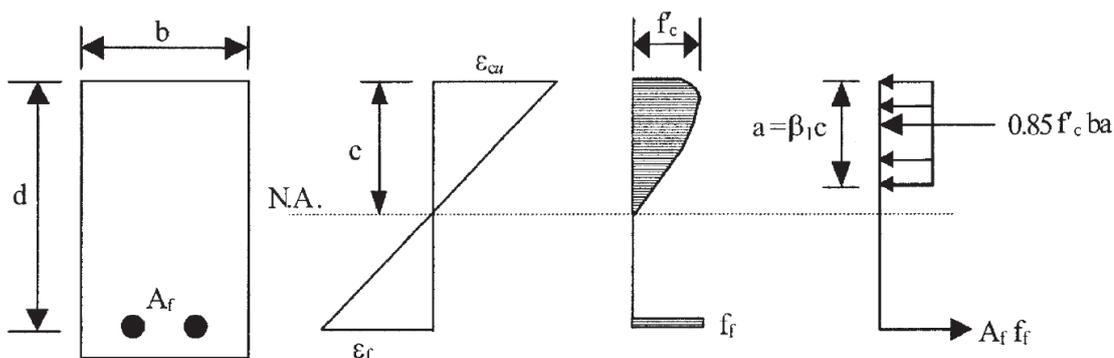


Fonte: ACI 440.1R-15 – modificada.

2.5.1.3.1. Falha governada pelo esmagamento do concreto.

Quando $\rho_f \geq \rho_{fb}$, a ruptura é controlada pelo esmagamento do concreto. A Figura 16 apresenta o diagrama de distribuição de tensões na seção transversal retangular.

Figura 16. Diagrama de esforços para esmagamento do concreto.



Fonte: ACI 440.1R-15.

Baseado no equilíbrio de forças e na compatibilização é possível determinar a tensão de tração na armadura de FRP, como representado pela Equação 8.

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \cdot \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85\beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu} \right) < f_{fu} \quad (8)$$

E_f = Módulo de elasticidade da barra de GFRP;

ε_{cu} = deformação específica do concreto;

β_1 = Fator de redução com valor 0,85 para concreto de até 28 MPa. Para concreto acima de 28MPa, o valor é reduzido em 0,005 para cada 7MPa acrescido na resistência, não podendo ser inferior a 0,65

f'_c = Resistência característica do concreto;

ρ_f = Taxa de armadura.

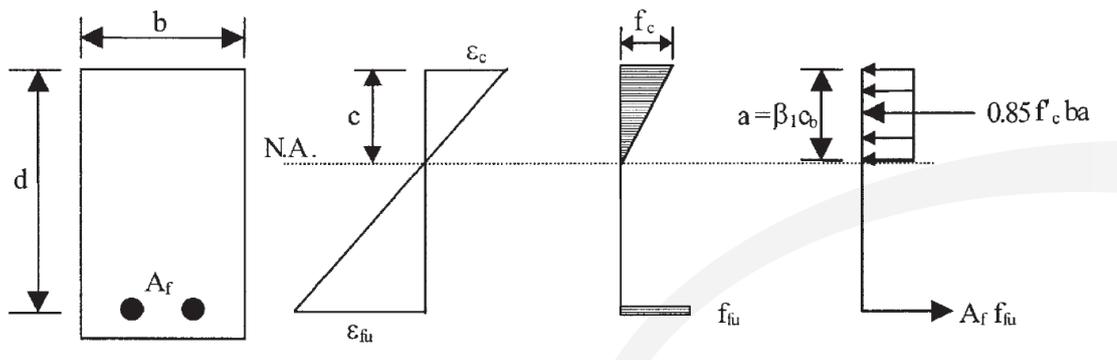
Calculada a tensão de tração é possível determinar o momento resistente nominal, como apresentado pela Equação 9.

$$M_n = \rho_f f_f \left(1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2 \quad (9)$$

2.5.1.3.2. Falha governada pela ruptura da armadura de FRP.

Quando a $\rho_f < \rho_{fb}$, a falha é controlada pela ruptura da armadura de FRP e o comportamento do diagrama de tensões é representado pela Figura 17. Como a deformação máxima do concreto não pode ser atingida ($\varepsilon_c < \varepsilon_{cu}$), um diagrama equivalente é determinado (Figura 17).

Figura 17. Diagrama de esforços para ruptura da armadura de FRP.



Fonte: ACI 440.1R-15.

Na análise do diagrama duas incógnitas estão incorporadas: a deformação final do concreto (ε_{cu}) no momento da ruptura da barra e a distância da linha neutra até a fibra mais comprimida (c).

De modo simplificado o momento resistente nominal da seção pode ser calculado pela Equação 10.

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (10)$$

Para a seção analisada o produto de $\beta_1 c$ (Eq.10) varia de acordo com as propriedades do material e a taxa de armadura. Em uma seção controlada pela ruptura da armadura de FRP, o valor máximo de $\beta_1 c b$ é obtido quando a deformação máxima do concreto é atingida, representado pelas Equações 11 e 12.

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c b}{2} \right) \quad (11)$$

$$c_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d \quad (12)$$

2.5.1.4. Armadura Mínima

A armadura mínima é calculada somente quando a ruptura da seção é controlada por $\rho_f < \rho_{fb}$. Neste caso uma taxa mínima de armadura deve ser atendida para evitar a falha por fissuração do concreto, $\phi M_n \geq M_{cr}$, onde M_{cr} é o momento de fissuração. A armadura mínima é apresentada pela Equação 13.

$$A_{f,min} = \frac{0,41\sqrt{f'_c}}{f_{fu}} b_w d \geq \frac{2,3}{f_{fu}} b_w d \quad (13)$$

2.5.1.5. Estado limite de Serviço (ELS).

Estruturas armadas com barras de FRP apresentam rigidez pós fissuração menor do que elementos armados com barras de aço. Sendo assim, o dimensionamento pode ser controlado pelas cargas de serviço. De modo geral, elementos armados com FRP não atendem aos critérios de serviço de deformação e abertura de fissuras (ACI 440.1R-15).

A capacidade de serviço pode ser descrita por dois critérios que devem ser atendidos pela estrutura.

- Fissuração – Abertura excessiva das fissuras é indesejável por motivos estruturais e estéticos, podendo danificar o elemento estrutural.
- Deformação vertical – As deformações devem estar dentro dos limites aceitáveis de utilização da estrutura.

a) Fissuração

As propriedades não corrosivas das barras de FRP permite que aberturas maiores sejam admitidas em comparação as estruturas armadas com aço. A abertura das fissuras pode ser calculada por dois métodos: direto, no qual a abertura da fissura é calculada; e indireto (adotado pela ACI 440.1R-15), no qual o limite do espaçamento entre as barras é determinado.

Em concordância com a ACI 318 o cálculo do espaçamento máximo é obtido pela Equação 14.

$$S_{m\acute{a}x} = 1,15 \frac{E_f W}{f_{fs} k_b} - 2,5c_c \leq 0,92 \frac{E_f W}{f_{fs} k_b} \quad (14)$$

Onde:

f_{fs} = Tensão na barra de FRP devido às cargas de serviço em MPa

k_b = coeficiente dependente da aderência.

O limite da abertura de fissura, baseado no espaçamento máximo entre barras, baseia-se no valor de d_c (distancia da fibra mais tracionada até o centro da barra mais próxima). O valor de d_c dever estar em conformidade com a Equação 15. Se um valor de d_c maior for necessário, o limite da abertura máxima deve permanecer inalterado, sendo necessário reduzir a tensão nas barras de FRP.

$$d_c \leq \frac{E_f W}{2f_{fs} \beta k_b} \quad (15)$$

b) Deslocamento Vertical.

O controle das deflexões segue as disposições da ACI 318 na qual a preocupação com os deslocamentos ocorre no nível de serviço sob ação de carga estáticas imediatas, e não se aplica a cargas dinâmicas (terremotos e vibrações). Dois métodos de controle são fornecidos: método indireto, que determina a espessura mínima do elemento e o método direto que limita as deflexões calculadas. (ACI 440.1R-15)

As deformações em estruturas armadas com FRP são maiores devido ao baixo módulo de elasticidade do material. Sendo assim, a ACI 440.1R-15 recomenda o uso do método direto de controle de deslocamento. As espessuras mínimas recomendadas estão apresentadas na Tabela 9, sendo adotadas por conveniência

como valores iniciais para o cálculo, o que não garante que todas as considerações sobre as deformações sejam satisfeitas em projeto.

Tabela 9. Recomendações de espessuras mínimas pra vigas não protendidas e lajes unidirecionais.

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

Fonte: ACI 440.1R-15 - (modificado).

Os valores Tabelados são baseados com referência no limite de deflexão de serviço de L/240, e taxas de armadura adotadas de $2\rho_{fb}$ e $3\rho_{fb}$.

O momento de inércia de uma seção não fissurada é igual ao momento de inercia bruto (I_g). A fissuração do elemento ocorre quando o momento máximo (M_a), gerado pela ação do carregamento, excede o momento de fissuração (M_{cr}), reduzindo a rigidez do elemento. O momento de inércia da seção fissurada é calculado pela Equação 16 e 17.

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} + n_f A_f d^2 (1 - k)^2 \quad (16)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (17)$$

A rigidez de um elemento varia entre $E_c \cdot I_g$ e $E_c \cdot I_{cr}$ dependendo da magnitude da carga de serviço aplicada. Segundo Bischoff (2005) a equação de Branson superestima estruturas que apresentam a razão entre as inércias (I_g / I_{cr}) maiores que 3 ou 4. A razão das inércias em elementos armados com FRP está entre 5 e 25, por essa razão a equação Branson subestima as deformações em elementos armados com FRP que apresentam, na maioria das vezes, alta relação I_g / I_{cr} .

Bischoff (2005) propôs uma equação alternativa que funciona de maneira semelhante para elementos armados com aço e FRP. A equação proposta por Bischoff (Equação 18) é modificada para incluir um fator adicional γ que explica a variação da rigidez ao longo da barra. O fator é obtido pela expressão $\gamma = 1.72 -$

$0.72(M_{cr}/M_a)$, resultante da integração da curva ao longo do comprimento de uma viga simplesmente apoiada com uma carga uniformemente distribuída (ACI 440.1R-15).

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2 \cdot \left[1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right]} \leq I_g \text{ onde } M_a > M_{cr} \quad (18)$$

O momento de fissuração corresponde ao especificado na ACI 318 e pode ser calculado pela Equação 19.

$$M_{cr} = \frac{0,62\lambda\sqrt{f'_c} I_g}{\gamma_t} \quad (19)$$

Quando $M_a > M_{cr}$ os efeitos da fissuração devem ser considerados usando a Equação 18, as espessuras recomendadas estão dentro desta condição. Quando $M_a < M_{cr}$ a diferença entre os valores é muito pequena e a variabilidade da resistência à tração e a restrição do encolhimento podem fissurar a seção. Neste caso as deflexões serão significativamente subestimadas pelo uso das propriedades da seção bruta.

2.5.2. Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021)

A Prática Recomendada tem como princípios gerais para a análise de estruturas de concreto armado com FRP, os mesmos critérios considerados para estruturas de concreto armado com aço, descritos na NBR 6118 (ABNT, 2014).

2.5.2.1. Propriedade dos materiais.

A resistência de cálculo das barras de FRP é obtida pela Equação 20. Na equação f_d e f_k correspondem aos valores de resistência de cálculo e característico, respectivamente. O coeficiente de redução γ_m é igual a 1,30 para solicitação normal no Estado Limite Ultimo e 1,00 no Estado Limite de serviço. O fator de redução ambiental é apresentado na Tabela 10.

$$f_d = C_E \frac{f_k}{\gamma_m} \quad (20)$$

Tabela 10. Fator de redução ambiental.

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).

2.5.2.2. Flexão Simples (Solicitações normais pra ELU).

Segundo a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), o dimensionamento à flexão é feito seguindo hipóteses usuais empregadas no cálculo de vigas de concreto armado, sendo elas:

- Seções permanecem planas após a flexão;
- Para concreto de resistência normal e seções transversais retangulares os $\alpha_c = 0,85$ e $\lambda = 0,8$;
- A resistência à tração do concreto deve ser desprezada;
- A armadura de FRP apresenta comportamento elástico linear até a ruptura e as tensões na armadura são proporcionais às deformações;
- Ocorre a aderência perfeita entre armadura de FRP e concreto.

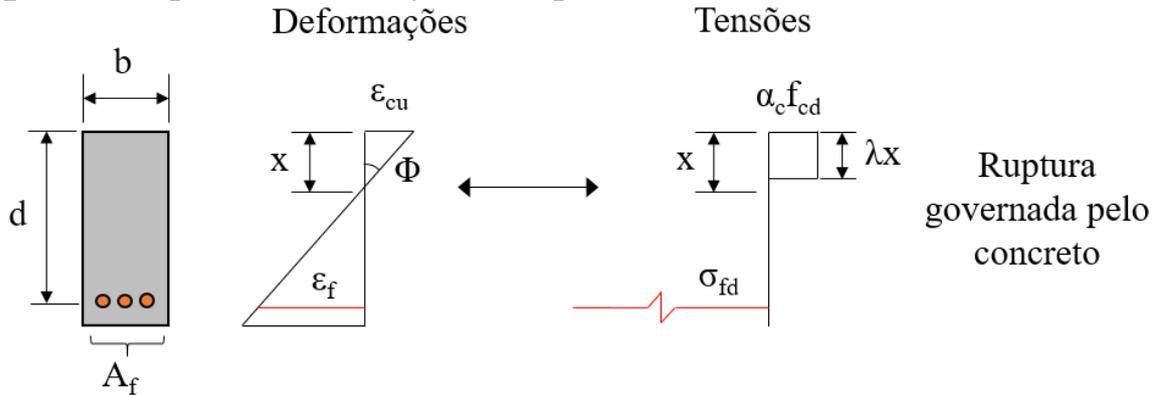
Assim como na ACI440.1R-15, a Prática recomendada considera os dois modos de falha no dimensionamento do elemento armado com FRP, que pode ser governada pelo esmagamento do concreto ou ruptura da armadura de FRP. O modo de falha depende da relação entre a taxa de armadura (Equação 5) e a taxa de armadura balanceada, definida pela Equação 21, onde ϵ_{cu} é a deformação última do concreto à compressão.

$$\rho_{fb} = \lambda \alpha_c \frac{f_{cd}}{f_{fd}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fd}} \quad (21)$$

2.5.2.2.1. Falha governada pelo esmagamento do concreto.

Para $\rho_f > \rho_{fb}$ o modo de falha é governado pelo esmagamento do concreto, a Figura 18 apresenta o diagrama para essa condição.

Figura 18. Diagrama de tensões para esmagamento do concreto.



Fonte: Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

A linha neutra (x) pode ser obtida por meio da Equação 22, 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. Com a substituição na Equação 22 na Equação 23 obtemos a tensão na armadura. Na Equação 24 é obtido o momento resistente.

$$x = \frac{1}{2b} \frac{\varepsilon_{cu} A_f E_f}{\lambda \alpha_c f_{cd}} \left(-1 + \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda \alpha_c f_{cd}}{\varepsilon_{cu} A_f E_f} b d} \right) \quad (22)$$

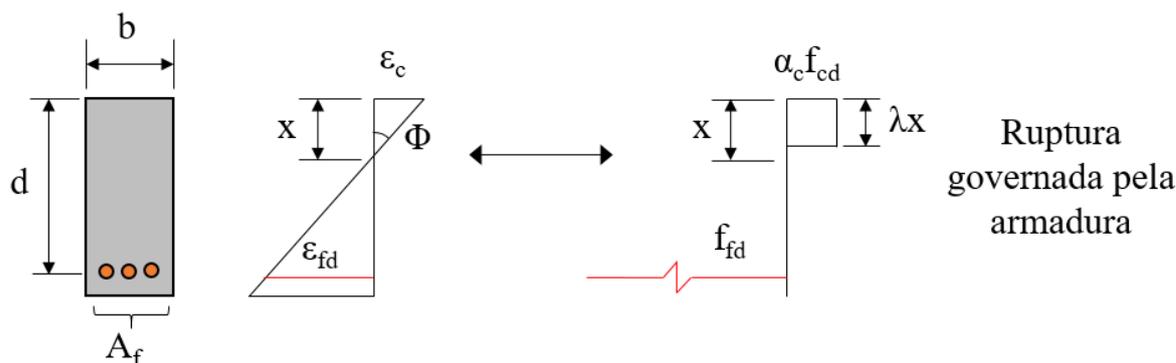
$$\sigma_{fd} = \frac{x b \alpha_c \lambda f_{cd}}{A_f} \quad (23)$$

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

2.5.2.2.2. Falha governada pela ruptura da armadura de FRP.

Para $\rho_f \leq \rho_{fb}$ a falha é governada pela ruptura da armadura de FRP. A Figura 19 apresenta o comportamento do elemento para esse modo de falha.

Figura 19. Diagrama de tensões para ruptura da armadura de FRP.



Fonte: Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

A mudança no modo de falha altera o cálculo da linha neutra, sendo obtido agora pela Equação 25, a tensão na armadura também é modificada. O cálculo do momento resistente permanece utilizando a Equação 26.

$$x = \frac{f_{fd} A_f}{\lambda \alpha_c f_{cd} b} \quad (25)$$

$$\sigma_{fd} = f_{fd} \quad (26)$$

2.5.2.3. Armadura Mínima.

A armadura mínima deve ser determinada de modo que o elemento resista a um momento solicitante mínimo obtido pela Equação 27.

$$M_{d,min} = 1,5 \frac{I_c}{y_t} f_{ctk,sup} \quad (27)$$

Onde:

y_t = é a distância da linha neutra até à fibra mais tracionada;

$f_{ctk,sup}$ = a resistência à tração característica superior do concreto.

A Prática recomenda que as armaduras longitudinais de tração tenham diâmetro nominal ≥ 8 mm e sejam inferiores a 1/8 da largura da seção.

2.5.2.4. Verificações no Estado Limite de Serviço.

No dimensionamento de estruturas armadas com FRP duas verificações de serviço devem ser realizadas: deformações excessivas e abertura de fissuras.

a) *Deformações.*

As deformações podem ser determinadas pela flecha imediata considerando a rigidez equivalente a partir da formula de Branson modificada (Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021)).

A rigidez equivalente do elemento pode ser calculada por meio da Equação 28.

$$(EI)_{eq,t0} = E_{cs} \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \beta_d I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c \quad (28)$$

Onde:

M_r = Momento de fissuração na seção crítica conforme NBR 6118 (ABNT, 2014);

M_a = Momento solicitante;

I_c = Momento de inércia da seção bruta;

I_{II} = Momento de inércia no estágio II.

O coeficiente β_d é um coeficiente redutor obtido pela Equação 29.

$$\beta_d = 0,75 \quad (29)$$

Os deslocamentos verticais limites são iguais aos prescritos na NBR 6118 (ABNT, 2014), levando em consideração as características do FRP em serviço.

b) Abertura de Fissuras.

A abertura de fissuras é calculada por meio da Equação 30, que segue as considerações do Fib Model Code 2010.

$$w_k = \frac{2}{E_f} \left[1 + \frac{c}{4} \frac{f_{ctm}}{\tau_b} \frac{\phi}{\rho_{ef}} \right] \left[\sigma_f - 0,6 \frac{f_{ctm}}{\rho_{ef}} \left(1 + \frac{E_f}{E_{cs}} \rho_{ef} \right) \right] \quad (30)$$

Onde:

σ_f = Tensão na armadura no estágio II;

f_{ctm} = Resistência à tração média do concreto;

c = Cobrimento nominal da armadura;

τ_b é a tensão de aderência nominal dada por $1,3 \times f_{bk}$, onde f_{bk} é dado pela Equação 31.

$$f_{bk} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 f_{ctk,inf} \quad (31)$$

Onde:

$\eta_1 = 1,25$ para barras com revestimento de areia; $1,15$ para barras com fios enrolados em espiral ou nervuras superficiais; e $0,7$ para barras com reentrâncias no comprimento.

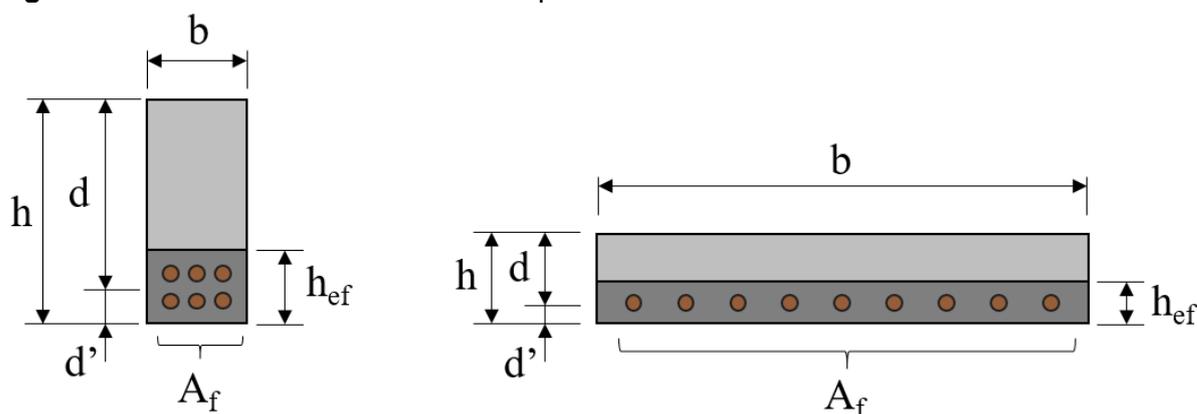
$\eta_2 = 1,0$ para zona de boa aderência e $0,7$ para zona de má aderência, conforme definições da NBR 6118.

$\eta_3 = 1,0$ para barras com diâmetro inferior a 20 mm e $0,8$ para barras com diâmetro superior a 20 mm.

$\eta_4 = 1,0$ para barras de GFRP, BFRP ou CFRP e $0,8$ para barras de AFRP.

A taxa de armadura efetiva (ρ_{ef}) é dada por $\rho_{ef} = A_f / (b \cdot h_{ef})$, onde h_{ef} é definido como o menor valor entre $2,5d'$ e $(h - x_{II})/3$. A Figura 20 exemplifica como são obtidos os valores de h_{ef} .

Figura 20. Área de concreto circundante para cálculo da armadura efetiva.



Fonte: Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

Segundo o Fib Model Code 2010 para o uso de concreto com adição de fibras a verificação deve ser feita substituindo o valor de f_{ctm} por $(f_{ctm} - 0,64 f_{R1})$ na Equação 30, onde f_{ctr} corresponde à resistência residual à tração do concreto com fibras para uma abertura CMOD de 0,5 mm obtida no ensaio de flexão NBR 16940 (ABNT, 2021).

Por fim, a abertura de fissura deve atender aos limites apresentados pela Tabela 11.

Tabela 11. Abertura de fissura limite para estruturas armadas com FRP.

Condição de exposição	w_{max} (mm)
Ambiente interno (todas as CAA)	0,7
Ambiente externo (todas as CAA)	0,5

Fonte: Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

2.6. Influência da taxa de armadura no modo de ruptura.

Os dimensionamentos apresentados pela ACI 440.1R-15 e Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) mostram como a relação entre a taxa de armadura e armadura balanceada pode influenciar no comportamento à flexão de vigas armadas com GFRP. Segundo a ACI 440. 1R (2015) mesmo sendo possível determinar o modo de ruptura por meio analítico, alguns fatores, se alterados, podem influenciar na resposta do elemento real.

Na literatura estudos mostram a influência da taxa de armadura no comportamento a flexão de vigas armadas com GFRP.

Vakili et al. (2019) apresenta um estudo experimental do comportamento à flexão de vigas armadas com GFRP com adição de macrofibras de aço e microfibras de vidro e polipropileno. Ao todo foram ensaiadas oito vigas (Tabela 12). Quatro vigas possuíam taxas armadura GFRP inferiores a $0,9\rho_{fb}$, sendo uma sem adição de fibras (GLR1) e as outras com adição de fibras de vidro (GLGR1), polipropileno (GLPR1) e aço (GLSR1). Outras quatro vigas apresentaram taxas de armadura balanceada de GFRP acima de $1,4\rho_{fb}$, com o intuito de alterar o modo de ruptura das vigas com fibras de vidro e polipropileno, que ocorreria por ruptura da barra (com taxa abaixo de $0,9\rho_{fb}$), para esmagamento do concreto.

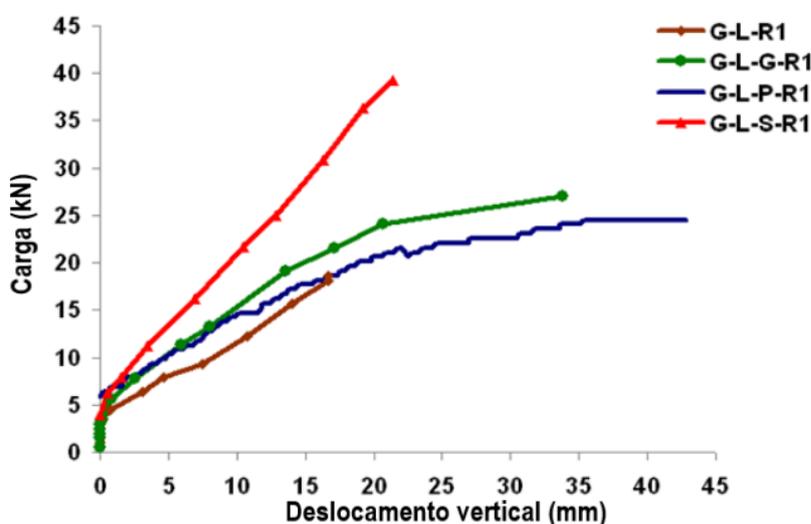
Tabela 12. Detalhamento das vigas.

Vigas	Dimensão das vigas (mm)		Vão livre (mm)	Barras de GFRP	Porta estribos	Estribos (aço)
	Largura	Altura				
G-L-R1	100	200	1400	2#8	1φ8	φ6@7,5cm
G-L-R2	100	200	1400	2#10	1φ8	φ6@7,5cm
G-L-G-R1	100	200	1400	2#8	1φ8	φ6@7,5cm
G-L-G-R2	100	200	1400	2#10	1φ8	φ6@7,5cm
G-L-P-R1	100	200	1400	2#8	1φ8	φ6@7,5cm
G-L-P-R2	100	200	1400	2#10	1φ8	φ6@7,5cm
G-L-S-R1	100	200	1400	2#8	1φ8	φ6@7,5cm
G-L-S-R2	100	200	1400	2#10	1φ8	φ6@7,5cm

Fonte: Vakili et al, 2019 – editada.

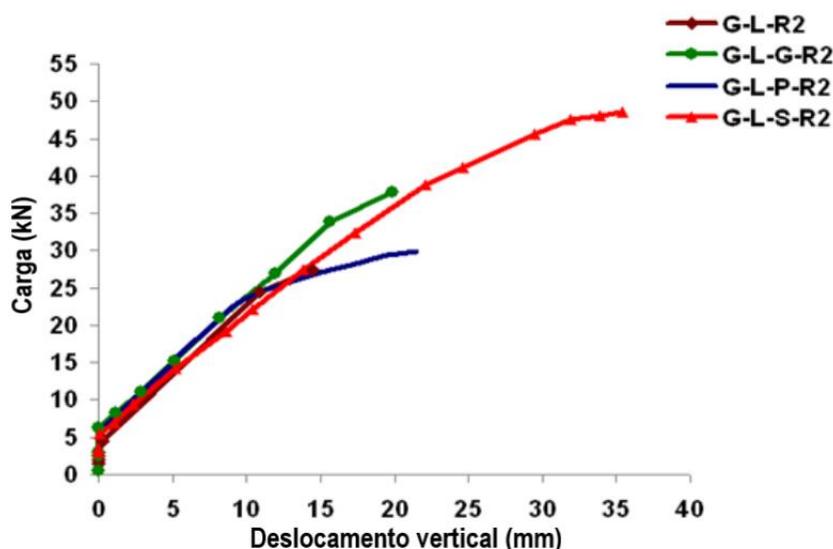
Os resultados mostraram que as vigas G-L-G-R1 e G-L-P-R1, com o aumento da taxa de armadura (nomenclatura com final R2), alteraram seu modo de falha, de ruptura da armadura de GFRP para esmagamento do concreto, como previsto em cálculo. Também, as vigas de concreto com fibras apresentaram valores superiores de cargas antes da primeira fissura, se comparadas com a viga de concreto sem fibras. As vigas de concreto com fibras de aço, vidro e polipropileno apresentaram deslocamentos verticais menores em relação a viga de concreto sem fibras, Figura 21. Contudo, quando a taxa de armadura foi maior ($1,4\rho_{fb}$) essa diferença não foi muito significativa, Figura 22.

Figura 21. Gráfico tensão-deformação vigas com taxa ($0,9\rho_{fb}$).



Fonte: Vakili et al, 2019 – editada.

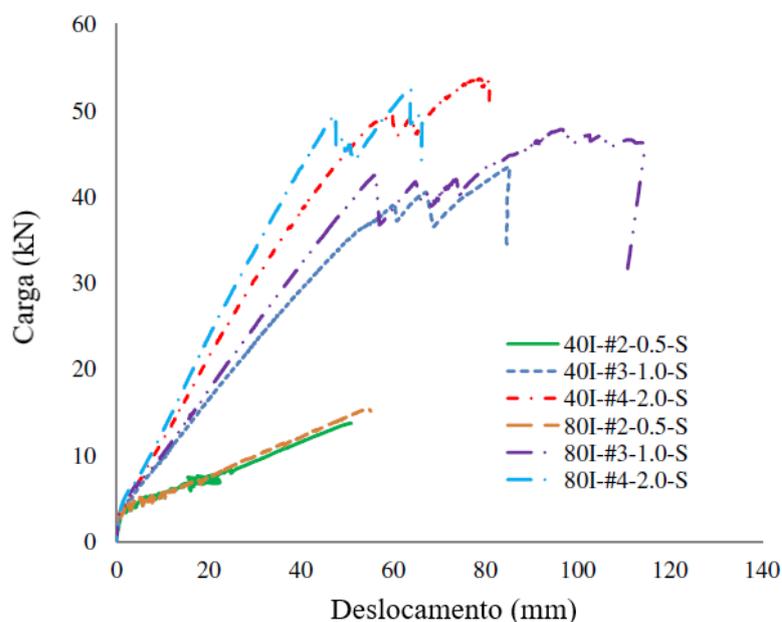
Figura 22. Gráfico tensão-deformação vigas com taxa (1,4pfb).



Fonte: Vakili et al, 2019 – editada.

Goldston et. al. (2016) avaliaram o comportamento à flexão de vigas armadas com GFRP, alterando a taxa de armadura ρ_f e a resistência do concreto. As taxas de armadura eram 0,5%, 1% e 2%, as taxas de 0,5% representavam uma relação inferior a $0,9p_{fb}$ e as taxas de 1% e 2% uma relação superior a $1,4p_{fb}$. Os concretos ensaiados tinham resistência de 40MPa e 80MPa, foram feitas três vigas para cada resistência à compressão do concreto, variando a taxa de armadura. Os resultados dos ensaios de flexão das vigas podem ser vistos na Figura 23.

Figura 23. Gráfico força x deslocamento.

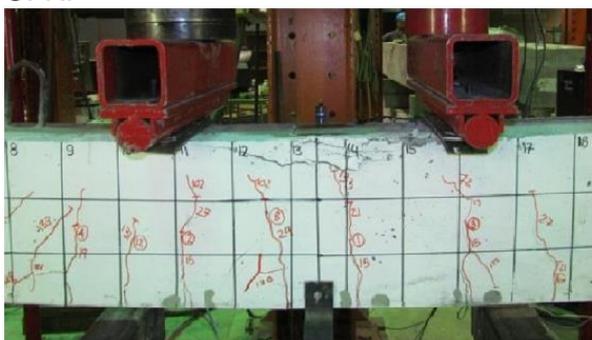


Fonte: Goldston et. al (2016) – modificada.

As vigas com taxa de armadura de 0,5% apresentaram modo de falha por ruptura da armadura de GFRP para as duas resistências, enquanto as vigas com taxas de 1% e 2% romperam por esmagamento do concreto. Os resultados também mostraram que o aumento da taxa de armadura melhorou a rigidez pós-fissuração das vigas, reduzindo os deslocamentos verticais, uma redução de 8% nas vigas de 40MPa e de 16% para as vigas de 80MPa.

No estudo de Abdelkarim el al. (2019) também podemos observar a influência da taxa de armadura no comportamento a flexão das vigas de GFRP. Os autores avaliaram vigas com resistência de 35MPa e 65MPa, com taxas de armadura de 0,38% e 1,63% para as duas resistências. Somente a viga de 65MPa e com taxa inferior a 0,9 ρ_{fb} apresentou ruptura da barra de GFRP, como mostra a Figura 24b. O aumento da taxa de armadura influenciou no momento resistente e contribuiu para a redução da abertura das fissuras.

Figura 24. Modo de ruptura das vigas (a) Esmagamento do concreto (b) Ruptura da barra de GFRP



(a)



(b)

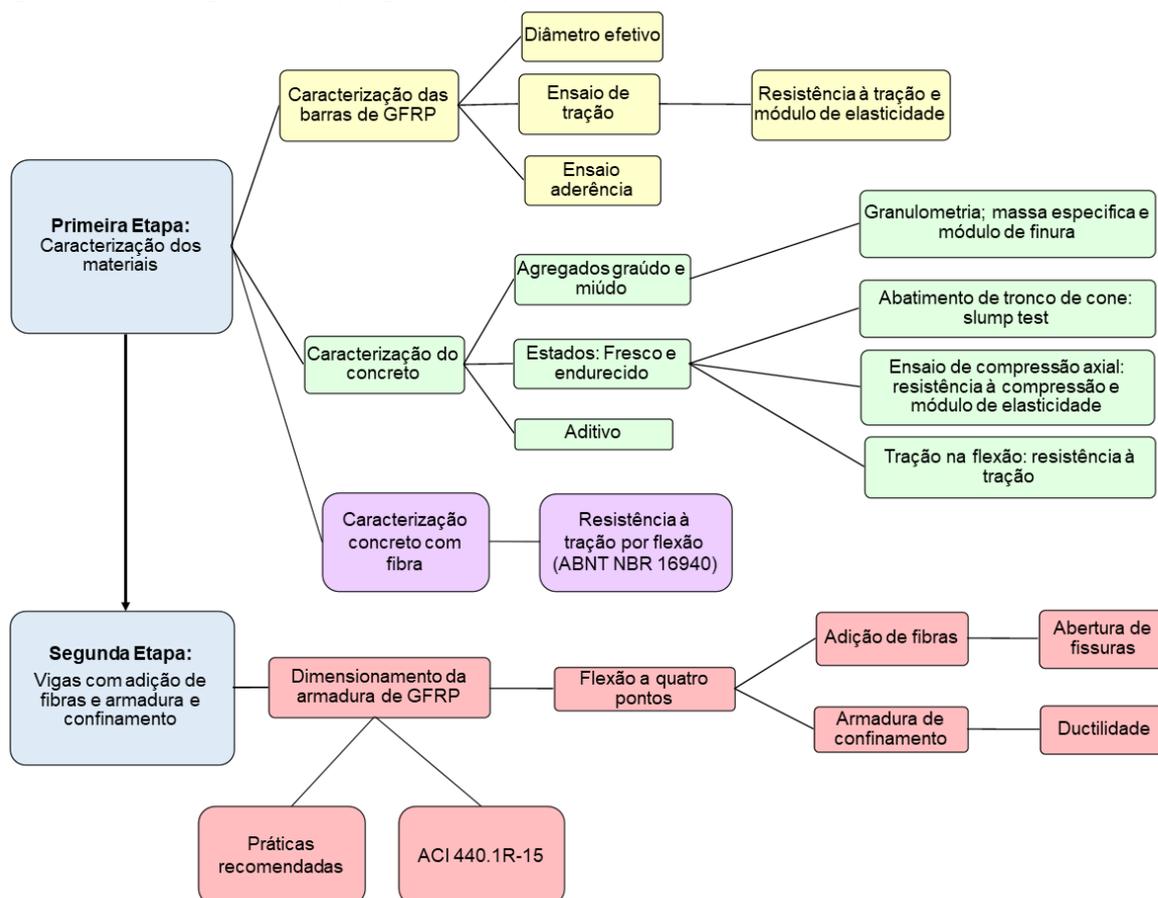
Fonte: Abdelkarim el al. (2019).

3. METODOLOGIA

3.1. Programa experimental

O programa experimental foi dividido em duas etapas, apresentado no fluxograma (Figura 25).

Figura 25. Fluxograma do programa experimental



A primeira etapa do programa experimental consiste na caracterização dos materiais. Para as barras de GFRP foram realizados ensaios de tração direta, que permite obter a resistência à tração e módulo de elasticidade das barras. Ao todo foram ensaiados cinco diâmetros de barras: Ø6 mm, Ø8 mm, Ø10 mm, Ø12 mm e Ø16 mm. Também foi caracterizada a tensão de aderência entre a barra e o concreto, por meio de ensaio de arrancamento. Na caracterização do concreto, para os agregados graúdo e miúdo foi determinado a granulometria, massa específica e módulo de finura. As especificações do cimento e aditivo são as fornecidas pelos fabricantes.

Na segunda etapa foram ensaiadas quatro vigas de concreto armado com GFRP, submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos. As quatro vigas possuíam a mesma taxa de armadura longitudinal, com diferenças na armadura transversal e a presença, ou não, de fibras descontínuas de polipropileno. A Tabela 13 apresenta a nomenclatura das vigas ensaiadas. O objetivo desta etapa foi avaliar se a adição de fibra ao concreto e a presença de armadura de confinamento na região de maior flexão (região central da viga), atribuiriam ao elemento estrutural incremento de ductilidade e redução da abertura de fissuras.

Tabela 13. Identificação das vigas

Identificação	Armadura longitudinal	Estribos	Adição de fibra	Armadura de confinamento
G-SF-SC	GFRP	Aço	Não	Não
G-SF-C	GFRP	Aço	Não	Sim
G-F-SC	GFRP	Aço	Sim	Não
G-F-C	GFRP	Aço	Sim	Sim

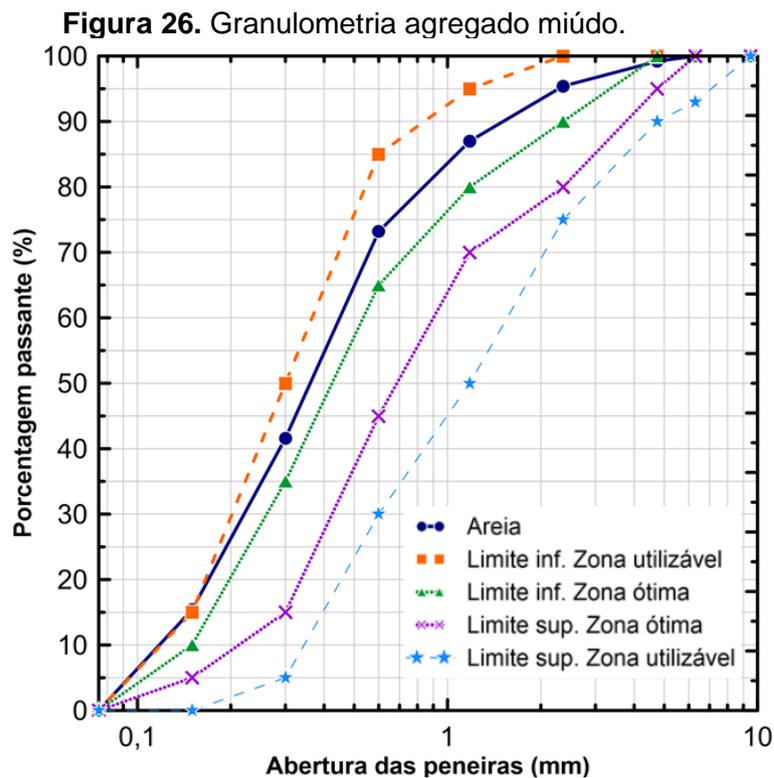
3.2. Primeira Etapa: Caracterização dos materiais

3.2.1. Caracterização do concreto

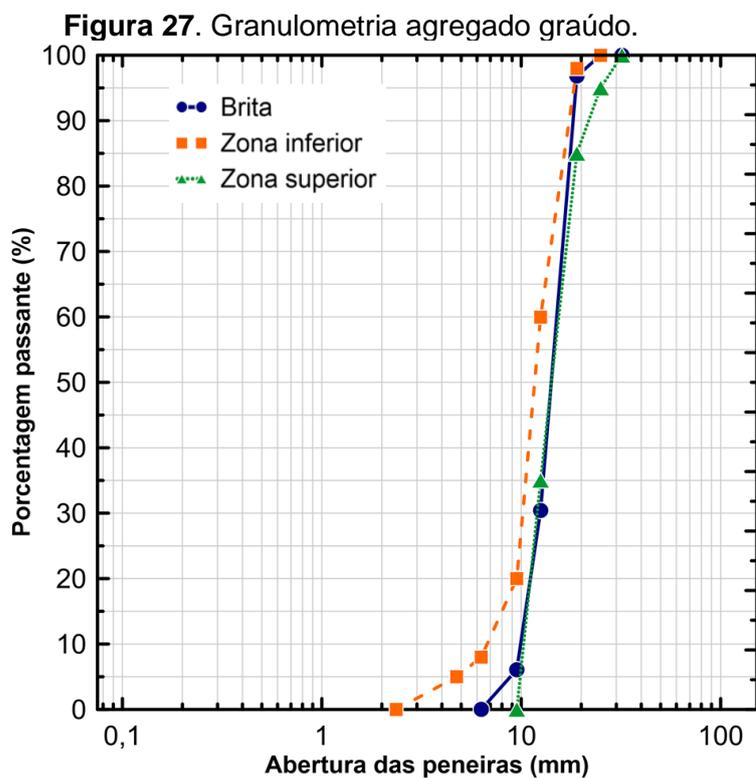
3.2.1.1. Agregados, cimento e aditivo.

Os agregados que compõem o concreto, utilizado no ensaio de flexão das vigas, foram caracterizados seguindo as recomendações da NBR 7211 (ABNT, 2009a).

A caracterização do agregado miúdo (areia) foi feita seguindo as normas NBR 16916 (ABNT, 2021). A Figura 26 apresenta a granulometria da areia utilizada. O agregado miúdo apresentou diâmetro máximo de 2,36 mm e módulo de finura (MF) de 1,88, valores dentro da zona utilizável inferior (MF de 1,55 a 2,20). A massa especificada do agregado foi de 2,611 g/cm³.



O agregado graúdo (brita) foi caracterizado seguindo as normas NBR NM 248 (ABNT, 2003). A curva granulométrica do agregado é apresentada na Figura 27. O agregado possui dimensão máxima de 19 mm, módulo de finura de 6,99 e massa específica de 2,83 g/cm³.



O cimento utilizado foi Cimento Cauê Estrutura da InterCement Brasil.

O aditivo utilizado para garantir maior trabalhabilidade ao concreto foi o ADVA CAST 525, da empresa GCP Applied Technologies Inc., com massa específica de 1,08 kg/m³, fornecida pelo fabricante.

3.2.1.2. Estado fresco e endurecido.

O concreto caracterizado foi utilizado nos ensaios de aderência das barras de GFRP e nas vigas do ensaio de flexão a quatro pontos.

O traço unitário em massa utilizado para a produção do concreto foi de 1: 2,02: 2,50: 0,5 e a Tabela 14 apresenta o consumo de material para a produção de 1m³ de concreto sem adição de fibras (Vf =0%) e do concreto com adição de fibras em 1% do volume do concreto (Vf =1%). O consumo de aditivo está expresso em g/m³.

Tabela 14. Consumo de material.

Material	VF (0%) Consumo (kg/m³)	VF (1%) Consumo (kg/m³)
Cimento	400,83	400,83
Areia	809,68	809,68
Brita	1002,08	1002,08
Água	200,42	200,42
Aditivo (g/cm ³) *	400,83*	801,67*
Fibras de polipropileno	0	9,10

O concreto no estado endurecido foi caracterizado por meio de ensaios de tração por flexão, módulo de elasticidade e resistência à compressão simples, de acordo com as normas especificadas na Tabela 15. O número de corpos de prova ensaiados para cada caracterização, está apresentado na Tabela 16.

Tabela 15. Ensaio de caracterização do concreto.

Caracterização do concreto com e sem fibras			
Características	Estado fresco	Estado endurecido	Tipo de Corpo de prova
Consistência	NBR 16889 (ABNT, 2020)		Slump test
Resistência à compressão		NBR 5739 (ABNT, 2018)	Cilíndrico (10 x 20 cm)
Resistência à tração por flexão		NBR 12142 (ABNT, 2010)	Prismático (10 x 10 x 40 cm)
Módulo de elasticidade		NBR 8522 (ABNT, 2017)	Cilíndrico (10 x 20 cm)

Tabela 16. Número de corpos de prova (CP).

Características	Nº CP concreto sem fibra	Nº CP concreto com fibra
Resistência à compressão	5	5
Resistência à tração por flexão	5	5
Módulo de elasticidade	5	5

A caracterização do concreto no estado fresco foi realizada por meio do ensaio de abatimento do troco de cone seguindo as diretrizes na NBR 16889 (ABNT, 2020). Foi realizado o abatimento do tronco de cone para o concreto da viga ensaiadas, resultando em um slump de 160 mm para as vigas G-SF-SC e G-SF-C e de 150 mm para as vigas G-F-SC e G-F-C. A Figura 28 apresenta o abatimento obtido para cada concreto.

Figura 28. Abatimento do tronco de cone. (a) concreto sem adição de fibras (160 mm); (b) concreto com adição de fibras (150 mm).



(a)

(b)

3.2.2. Caracterização do concreto com fibras.

3.2.2.1. Fibras descontínuas de polipropileno.

As fibras descontínuas adicionadas ao concreto foram as macrofibras sintéticas de polipropileno “KraTos Macro” de 54 mm de comprimento, fornecidas pela Kordsa Teknik Tekstil A.Ş. As propriedades das fibras adotadas no estudo foram as fornecidas pela empresa e estão apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17. Propriedades das fibras sintéticas KraTos.

Características	Propriedade das fibras
Classe da fibra	EM 14889-2 Classe II
Material	Polipropileno
Peso específico (g/m ³)	0,91
Comprimento (mm)	54
Tensão de tração (MPa)	550
Temperatura de Fusão (°C)	160
Quantidade de fibras/kg	50000

As fibras KraTos Macro são um material não corrosivo, álcali resistente (AR) e são comercializadas em embalagens solúveis em água, como mostra a Figura 29.

Figura 29. Fibra de polipropileno de 54mm.



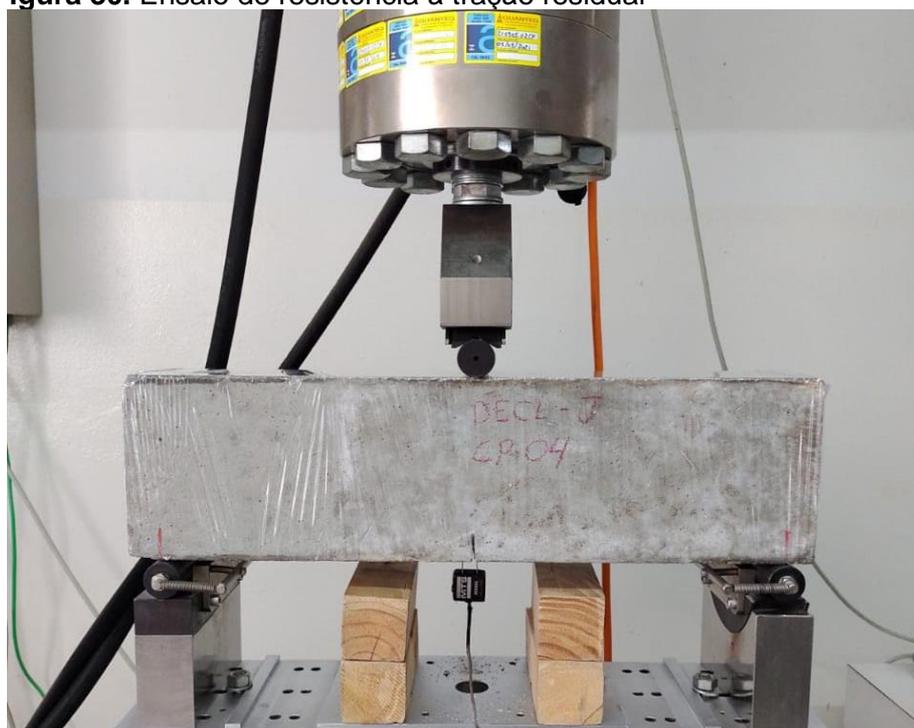
3.2.2.2. Resistência à tração por flexão - NBR 16940 (ABNT, 2021)

O ensaio de resistência à tração por flexão é realizado para caracterizar o comportamento mecânico do concreto com fibra na flexão, com a determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais). Esse ensaio segue os parâmetros e metodologia especificado na NBR 16940 (ABNT, 2021).

Os corpos de prova para este ensaio devem ser prismáticos com dimensões nominais de 150 mm de altura e largura e comprimento entre 550 mm e 700 mm, com tolerâncias nominais inferiores a 2 mm. O agregado utilizado no concreto deve ter diâmetro máximo de 25 mm e as fibras comprimento máximo de 60 mm.

Um entalhe deve ser feito na região central superfície inferior do corpo de prova, com espessura máxima de 5 mm. A altura do entalhe deve ter 25 ± 1 mm. A leitura da abertura do entalhe (*crack mouth opening displacement (CMOD)*) é realizada por um *clip-gauge* acoplado no entalhe, como mostra a Figura 30, que devem ter a capacidade de medir com exatidão uma carga 0,1kN.

Figura 30. Ensaio de resistência à tração residual



O equipamento de ensaio deve atuar a uma carga que permita que o CMOD aumente a uma taxa constante de 0,05 mm/min até o CMOD = 0,1 mm, após essa medida a taxa deve permanecer constante até o final do ensaio em 0,2 mm/min.

A resistência residual à tração é dada pela Equação 32

$$f_{R,i} = \frac{3 \cdot F_i \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (32)$$

Onde:

$f_{R,i}$ = é a resistência residual à tração na flexão correspondente ao CMOD = CMOD_i (com $i = 1, 2, 3, 4$), expressa em newtons por milímetro quadrado (N/mm²);

F_i = é a carga correspondente ao CMOD = CMOD_i ($i = 1, 2, 3, 4$), expressa em newtons (N);

l = é o comprimento do vão, expresso em milímetros (mm);

b = é a largura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

h_{sp} = é a distância entre o topo do entalhe e o topo do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

No programa experimental o ensaio foi realizado com quatro corpos de prova de 150 x150 cm de altura e largura e 550 cm de comprimento, com entalhe de 5 mm de espessura e 25 mm de altura. O equipamento utilizado para o ensaio foi a prensa dinâmica INTERMETRIC IM750SRV.

3.2.3. Caracterização das barras de GFRP.

Para caracterização das propriedades mecânicas das barras de Polímero Reforçado com Fibras de Vidro, foram realizados ensaios de determinação da resistência à tração, módulo de elasticidade e ensaios de arrancamento para estimar a aderências das barras com a matriz cimentícia. As normas utilizadas como referência para os ensaios são apresentadas na Tabela 18. Os ensaios foram realizados com base nas indicações apresentadas nas normas.

Tabela 18. Ensaio e normas para a caracterização de propriedades mecânicas das barras de GFRP.

Propriedades mecânicas das barras	
Ensaio	Norma
Resistência à tração	ASTM D7205/D7205M – 06 (Revisada 2016)
Módulo de elasticidade	ASTM D7205/D7205M – 06 (Revisada 2016)
Ensaio de arrancamento	ASTM D7913/D7913M – 14 (Revisada 2020)

Todas as barras de GFRP utilizadas nos ensaios foram fornecidas pela empresa Haizer Building Solution.

Foram ensaiadas barras com diâmetros nominais de 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm e 16 mm à tração.

No ensaio de arrancamento foram ensaiadas barras de 10 mm, correspondente ao diâmetro da armadura longitudinal.

As barras são produzidas pelo processo de pultrusão de fibras de vidro em resinas epóxis. As propriedades das barras fornecidas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19. Propriedades das barras de GFRP fornecidas pela Haizer Building Solutions.

Características	Propriedades da barra de GFRP
Resistência à tração (MPa)	800 a 1300
Módulo de elasticidade (GPa)	50 a 67
Tensão de aderência ao concreto (MPa)	16 a 29
Densidade (g/cm ³)	1,25 a 2,10
Alongamento relativo (%)	2,2 a 2,7

Fonte: <https://www.haizergroup.com.br/haizervergalhoes>.

3.2.3.1. Diâmetro Efetivo das barras de GFRP.

O diâmetro efetivo das barras de GFRP foram obtidos de acordo com a norma ASTM D7205/D7205M - 06 (Revisada 2016), utilizando uma balança digital hidrostática, Figura 31. Devido a quantidade limitada de barras disponíveis para uso nos ensaios propostos, o número de corpos de prova foi reduzido para três (a norma recomenda o uso de cinco). Os corpos de prova foram cortados com comprimento de 100 mm, o mínimo exigido por norma.

Figura 31. Balança para determinação do diâmetro efetivo.



Na Tabela 20 é apresentado o diâmetro efetivo determinado para todos os diâmetros de barras usados ao longo do estudo.

Tabela 20. Diâmetro efetivo das barras de GFRP.

Diâmetro Nominal (mm)	Diâmetro Efetivo (mm)	Área Efetiva (mm ²)
6,0	6,44	32,17
8,0	7,60	45,36
10,0	10,50	86,59
12,0	11,90	111,12
16,0	15,70	193,59

A Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), desenvolvida pelo comitê técnico CT-303 do IBRACON/ABECE, apresenta uma Tabela (Tabela 21) com a indicação dos requisitos mínimos de dimensões e áreas que as barras devem apresentar para que sejam aceitas.

Tabela 21. Diâmetros e áreas nominais das barras reforçadas com fibras segundo a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

Diâmetro nominal da barra (mm)	Área da seção nominal (mm ²)	Limites de área efetiva da seção transversal (mm ²)	
		Mínimo	Máximo
6	28,3	26,5	48,6
8	50,3	47,3	80,0
10	78,5	74,1	115,1
12	113,1	104,3	148,2
16	201,1	188,0	253,5

Com exceção a barra de 8mm, todas as barras estão dentro dos limites estabelecidos pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

A norma ASTM D7957/D7957M-17 apresenta os requisitos mínimos de dimensões para alguns diâmetros (Tabela 22), entre eles os medidos: 6 mm, 10 mm e 16 mm. Todos os diâmetros apresentam dimensões dentro do especificado em norma.

Tabela 22. Diâmetros e áreas nominais das barras reforçadas com fibras segundo ASTM D7957-17.

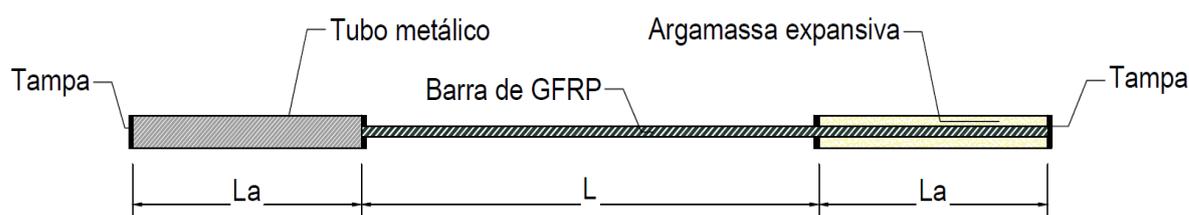
Diâmetro nominal da barra (mm)	Área da seção nominal (mm ²)	Limites de área efetiva da seção transversal (mm ²)	
		Mínimo	Máximo
6,3	32	30	55
9,5	71	67	104
12,7	129	119	169
15,9	199	186	251

3.2.3.2. Ensaio de resistência à tração em barras de GFRP

O ensaio de tração direta foi realizado para caracterizar o comportamento à tração do material e determinar as resistências à tração e módulo de elasticidade das barras de diferentes diâmetros. Foram ensaiados cinco corpos de prova para cada diâmetro de barra, sendo os diâmetros nominais: Ø 6 mm, Ø8 mm, Ø10 mm, Ø12 mm e Ø16 mm.

A execução do ensaio de tração direta em barras de GFRP requer a preparação do corpo de prova antes de sua inserção no equipamento de ensaio. As barras de GFRP não podem estar em contato direto com a garra, responsável pela tração do material, pois essa região seria esmagada. Então, um tubo metálico foi ancorado nas extremidades das barras ensaiadas, como mostra a Figura 32.

Figura 32. Modelo de ancoragem das barras de GFRP.



O comprimento livre (L) e de ancoragem (L_a) foram adaptados seguindo como base a norma ASTM D7205/D7205M – 06 (Revisada 2016). O comprimento de ancoragem adotado era inferior ao limite de norma, para os diâmetros de Ø6 mm, Ø8 mm, Ø10 mm e Ø12 mm, a redução no comprimento de ancoragem garantiu que o limite do comprimento livre fosse atendido. Com as adaptações o comprimento (L) da barra de Ø16 mm foi inferior ao limite descrito em norma, no qual L deve ser $\geq 40d$, ou seja, maior ou igual a 40 vezes o diâmetro da barra ensaiada. A Tabela 23 apresenta os comprimentos adotados no ensaio de tração.

Tabela 23. Comprimento barra de GFRP para ensaio de tração.

Diâmetro comercial	Comprimento livre (L)	Comprimento de ancoragem (L_a)	Diâmetro do tubo schedule 40
Ø 6 mm	340 cm	250 cm	1¼ pol
Ø 8 mm	420 cm	250 cm	1¼ pol
Ø 10 mm	500 cm	250 cm	1¼ pol
Ø 12 mm	500 cm	250 cm	1¼ pol
Ø 16 mm	500 cm	250 cm	1½ pol

Durante a ancoragem dos tubos na barra de GFRP é necessário garantir o alinhamento da barra com centro do tubo ancorado. Um aparato de madeira projetado foi o responsável por manter o alinhamento das barras com o tubo de ancoragem. A Figura 33 apresenta o esquema em que as barras eram alocadas no aparato no processo de moldagem e cura do material de ancoragem.

Figura 33. Ancoragem das barras de GFRP

Os tubos metálicos foram preenchidos com argamassa expansiva, de marca Splitstar. A argamassa expansiva é um material pulverulento, e para o seu uso deve ser misturado água na proporção de 30% da massa utilizada (exemplo: 1500ml de água para 5000g de argamassa). O preenchimento dos tubos é realizado com a argamassa em estado líquido.

Alguns cuidados são necessários ao trabalhar com a argamassa expansiva como material de preenchimento. Durante o processo de cura, a argamassa reage com a água gerando uma reação exotérmica, responsável por endurecer rapidamente a mistura. Com o objetivo de retardar a reação e o processo de cura, foi utilizado gelo na base dos tubos, como mostra a Figura 34, até finalizar seu preenchimento, sendo retirado o gelo para que a reação ocorresse normalmente.

Como a argamassa está em estado líquido durante o preenchimento dos tubos, é necessário vedar a parte inferior dos tubos para evitar o vazamento da argamassa. Foram desenvolvidas tampas para vedação desta região (inferior), como mostra a Figura 35. Na parte superior dos tubos as tampas foram utilizadas para garantir o alinhamento da barra nos tubos. Após a cura da argamassa as tampas são retiradas e reutilizadas.

Figura 34. Aplicação de gelo para retardar o tempo de pega da argamassa.



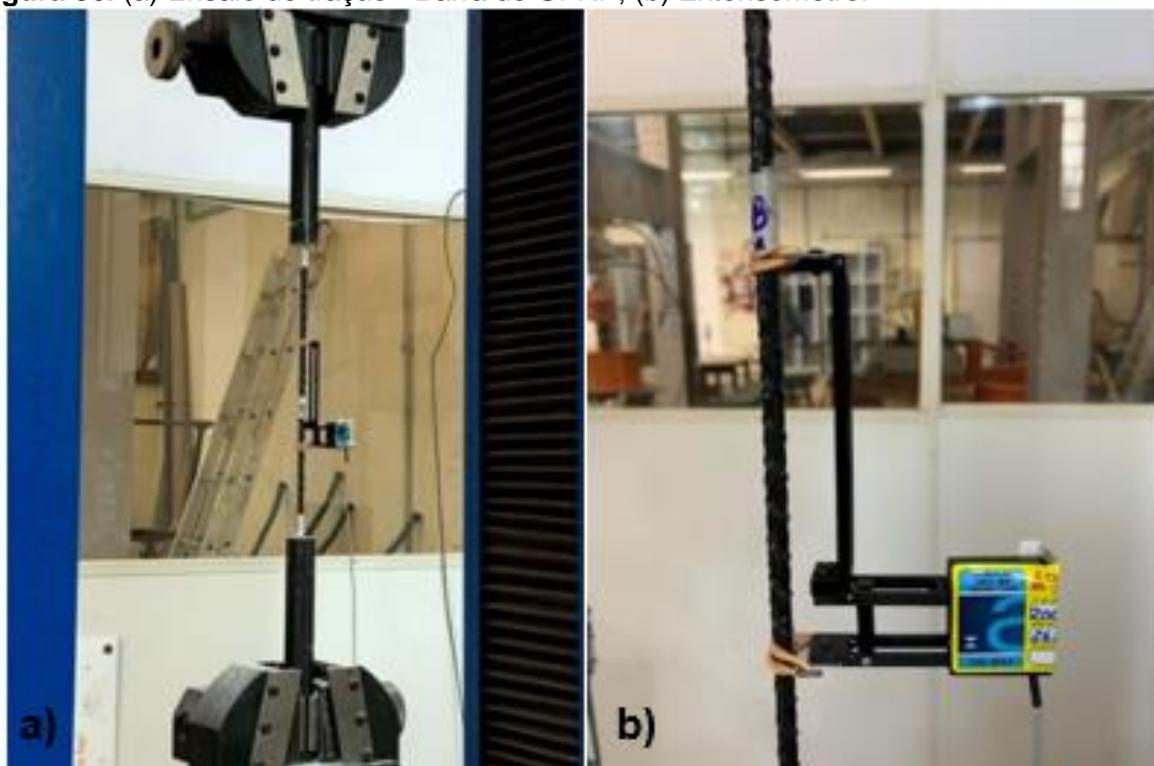
Figura 35. Detalhe das tampas.



O ensaio de tração direta foi realizado na prensa hidráulica Emic DL30000F. A Figura 36a ilustra a barra de GFRP posicionada para o ensaio de tração. O extensômetro utilizado para medir a deformação da barra ao longo do ensaio foi o

modelo EE-GL-10 N.203201, deslocamento de 10 mm, posicionado no centro do comprimento livre da barra (Figura 36b). Para garantir a integridade do extensômetro ele foi retirado antes da ruptura da barra. O critério adotado para a retirada do extensômetro foi a metade da carga final estimada para o ensaio, por exemplo, em uma carga estimada de 50 kN o extensômetro era retirado ao atingir uma carga de 25 kN. A velocidade do ensaio foi de 3 mm/min e o critério de parada foi a ruptura da barra.

Figura 36. (a) Ensaio de tração - Barra de GFRP; (b) Extensômetro.



Os dados obtidos no ensaio permitem o cálculo da resistência à tração e módulo de elasticidade das barras de GFRP. A resistência à tração foi calculada segundo a equação 33

$$\sigma = P/A \quad (33)$$

Onde:

σ = Resistência à tração (MPa)

P = Força aplicada (N)

A = Área da seção transversal da barra (mm²)

O Módulo de Elasticidade foi calculado seguindo as recomendações da ASTM D7205/D7205M – 06 (Revisada 2016), e obtido pela Equação 34. A faixa de deformação utilizada para o cálculo, como recomendado, está entre as deformações de 0,001 e 0,003.

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (34)$$

Onde:

E = Módulo de Elasticidade (MPa).

σ = Relação entre a carga de tração aplicada e a área da barra (MPa).

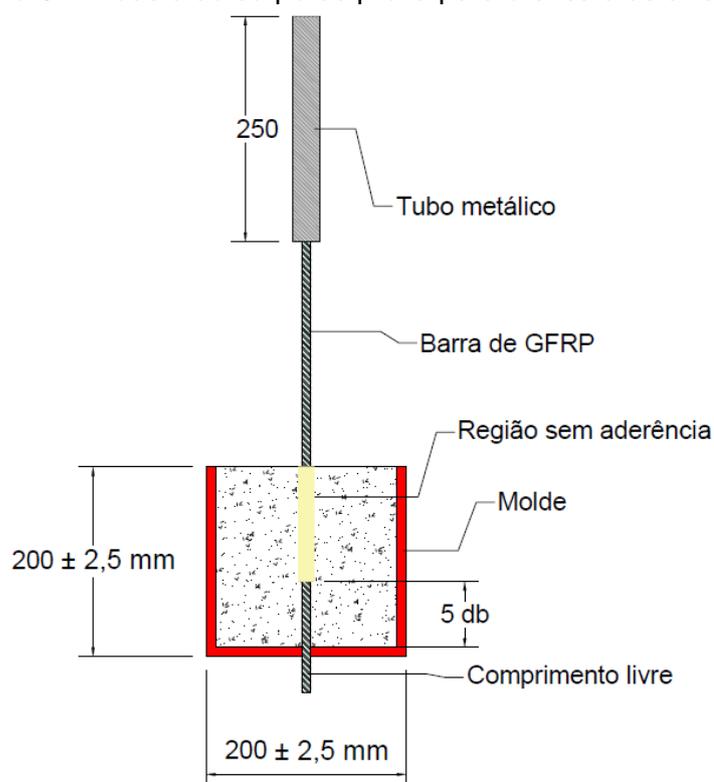
ε = deformação da barra

3.2.3.3. Ensaio de arrancamento em barra de GFRP

Os ensaios de arrancamento seguiram as recomendações da ASTM D7913/D7913M – 14 (Revisada 2020). Para este ensaio as barras de GFRP também precisam ser ancoradas por tubos metálicos, como mostra a Figura 37. Os tubos metálicos foram descritos anteriormente, na Tabela 23.

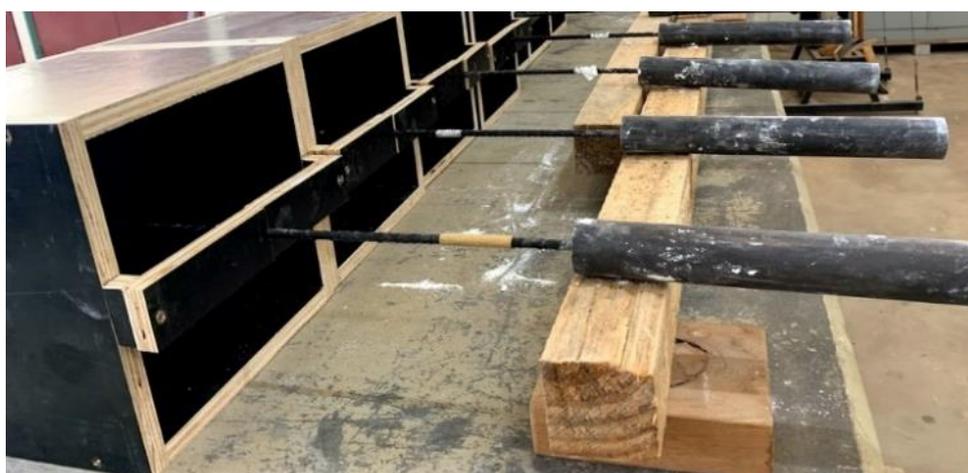
O comprimento do corpo de prova também precisou ser adaptado, porque o equipamento não comportava o tamanho exigido em norma. A ASTM D7913 recomenda que o comprimento de barra não carregada seja de 1200 mm \pm 5 mm. O comprimento adotado foi de 750 mm. As demais características permaneceram como as recomendadas em norma: o corpo de prova de concreto com dimensões de 200 x 200 x 200 mm e o comprimento de barra ancorada ao concreto igual a 5 ϕ . A parte não ancorada da barra, dentro do cubo de concreto, foi respeitada revestindo-a com um tubo plástico, similar a uma mangueira. A velocidade do ensaio foi de 1,2 mm/min e o critério de parada a redução da capacidade de resistir aos esforços, ou seja, o decréscimo da carga resistente.

Figura 37. Modelo do corpo de prova para o ensaio de arrancamento.



O ensaio de arrancamento foi realizado para barra de 10 mm de diâmetro, por ser a barra utilizada como armadura longitudinal. A Figura 38 apresenta as fôrmas utilizadas na moldagem dos corpos de prova e o posicionamento das barras ancoradas.

Figura 38. Forma dos corpos de prova do ensaio de arrancamento.



Os corpos de prova foram ensaiados aos 28 dias, na prensa hidráulica Emic DL30000F e os deslocamentos foram obtidos pela leitura de um sensor LVDT de modelo GEFTRAN de 35 mm, como mostra a Figura 39.

Figura 39. Posicionamento do corpo de prova para o ensaio de arrancamento.



A tensão de aderência entre barra e concreto é obtida por meio da Equação 35, e dever ser expressa com precisão de três dígitos.

$$\tau = \frac{F}{C_b \cdot l} \quad (35)$$

Onde:

τ = Tensão de aderência (MPa);

F = Força aplicada (N);

C_b = Circunferência efetiva da barra, calculada como πd_b , onde d_b é o diâmetro efetivo da barra.

3.3. Segunda Etapa: Vigas armadas com barras de GFRP com adição de fibras e armadura de confinamento.

3.3.1. Arranjo da armadura de GFRP.

Para o dimensionamento das vigas armadas do ensaio experimental, foi adotado um arranjo de armadura e feita a verificação de acordo com a ACI 440.1R-15

e a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) (Apêndice A). A Tabela 24 apresenta a relação entre ρ_f / ρ_{fb} (taxa de armadura pela taxa de armadura balanceada) e o momento resistente utilizando os valores característicos dos materiais, ou seja, sem incluir coeficientes de ponderação.

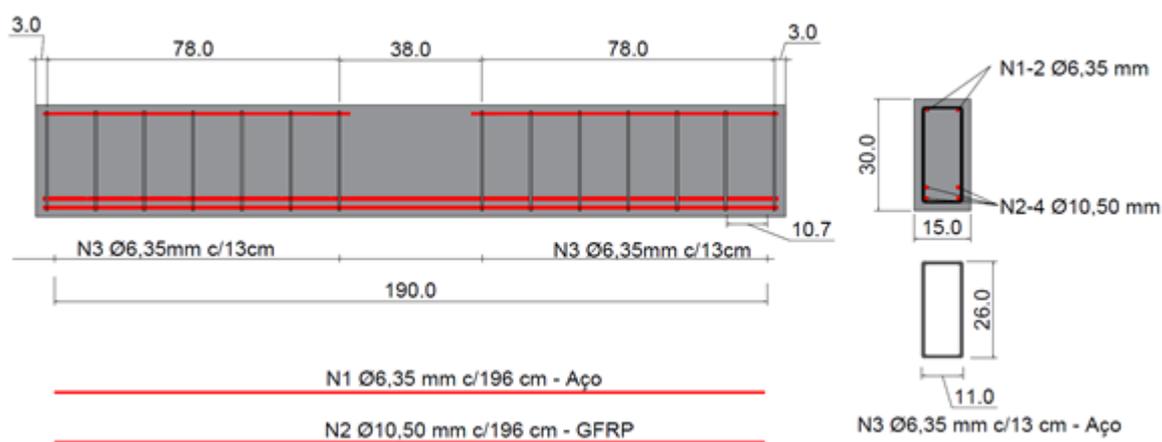
O modo de ruptura esperado para a viga armada adotada é a ruptura por esmagamento do concreto comprimido, pois $\rho_f > 1,4 \rho_{fb}$, caracterizando esse modo de ruptura.

Tabela 24. Taxa de armadura e momento resistente utilizando valores característicos dos materiais.

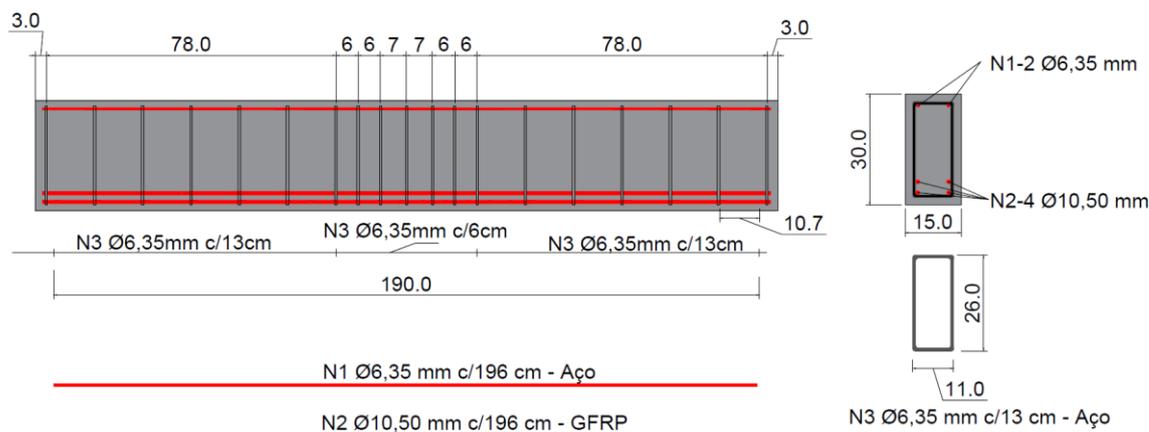
Concreto	A_f (cm ²)	ρ_f (%)	ACI 440.1R-15		Práticas Recomendadas	
			ρ_f / ρ_{fb}	M_r (kNm)	ρ_f / ρ_{fb}	M_r (kNm)
SF	3,46	0,91	2,84	45,13	2,49	47,97

Ao todo foram ensaiadas quatro vigas de concreto armado com armadura longitudinal de GFRP e estribos de aço (dimensionados pela NBR 6118 (ABNT, 2014)). As vigas possuíam seção transversal de 15 x 30 cm e 200 cm de comprimento. A Figura 40 e 41 apresentam os dois arranjos de armadura desta etapa. A Figura 40 apresenta o arranjo de armadura sem estribos na região de flexão (vão central), e foi adotado para as vigas G-SF-SC e G-F-SC, que não apresentam armadura de confinamento.

Figura 40. Armadura da viga de concreto sem confinamento



A Figura 41 apresenta o arranjo empregado nas vigas G-F-C e G-SF-C, que possuem armadura de confinamento na região central do vão.

Figura 41. Armadura da viga de concreto com confinamento.

3.3.2. Processo de moldagem e cura das vigas.

O processo de mistura do concreto seguiu as etapas a seguir: Primeiro a betoneira foi umedecida, para evitar a absorção de água pela superfície da betoneira. Após a secagem da betoneira, foi adicionado o agregado graúdo e 1/3 do volume total de água, realizando a mistura dos materiais por 2 minutos. Em sequência adicionou-se todo o cimento e mais 1/3 do volume de água, com tempo de mistura de mais 2 minutos. Na etapa seguinte foi adicionado todo o agregado miúdo, o restante da água e 1/2 do volume de fibras de maneira uniforme, durante 2 minutos. As fibras foram adicionadas aos poucos e com a betoneira em funcionamento, para garantir a dispersão das fibras em todo o material e evitar a formação de “ouriços” de fibra. Na sequência foi adicionado o aditivo e realizado a mistura por 5 minutos. Por fim, o restante das fibras é adicionado com tempo de mistura de 3 minutos. Para o concreto convencional foram seguidas as mesmas etapas com exceção a adição de fibras.

Para a moldagem das vigas, as fôrmas foram posicionadas em uma superfície plana em nível. A armadura foi inserida dentro das fôrmas, como mostra a Figura 42, permitindo que o cabo fixo aos extensômetros ficasse fora da região de aplicação de carga.

Figura 42. Posicionamento da armadura na forma.



Para evitar a deformação da fôrma com o peso exercido pelo concreto nas paredes laterais, foi inserido um dispositivo de contenção, mantendo as vigas com as dimensões definidas no programa experimental (Figura 43).

Figura 43. Dispositivo para evitar os deslocamentos na forma.



Após as moldagens, as vigas foram curadas durante 28 dias antes da realização dos ensaios de flexão a quatro pontos. No procedimento de cura, para

garantir que a superfície permaneceria úmida durante todo o processo, as vigas permaneceram enformadas com uma manta de drenagem cobrindo a superfície exposta. Essa manta era umedecida diariamente e coberta com um saco plástico para manter a umidade evitando a evaporação rápida da água, com mostra a Figura 44, durante 28 dias.

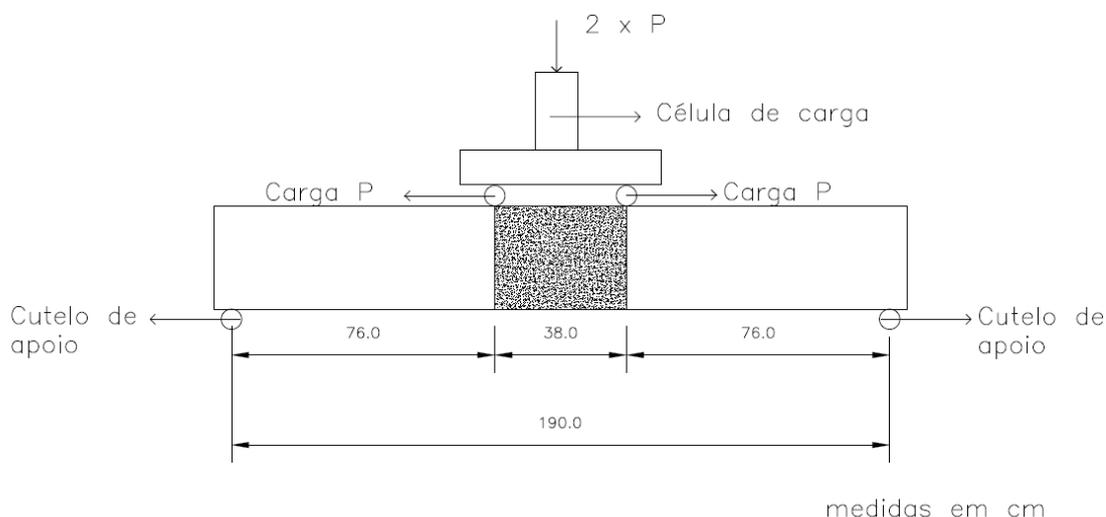
Figura 44. Viga em processo de cura.



3.3.3. Ensaio de flexão a quatro pontos.

A Figura 45 mostra o esquema do ensaio de flexão a quatro pontos realizado nas vigas de concreto armado com barras de GFRP. As vigas apresentavam um vão livre de 190 cm, com distância entre a aplicação de carga e o apoio de 76 cm e distância entre cargas de 38 cm (região de cortante nula).

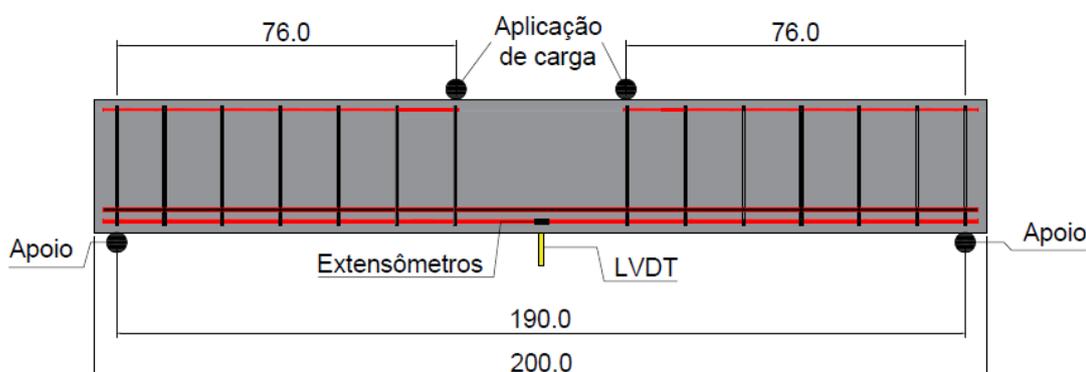
Figura 45. Esquema do ensaio de flexão a quatro pontos.



3.3.3.1. Instrumentação e coleta de dados.

A coleta dos dados dos ensaios experimentais de flexão a quatro pontos foi feita por meio da instrumentação das vigas armadas com barras de GFRP e transdutor de deslocamento. A Figura 46 apresenta o posicionamento dos extensômetros nas vigas e do medidor de deslocamentos LVDT.

Figura 46. Detalhamento da instrumentação das vigas



Dois extensômetros, modelo PA-06-060BA-120-L, foram fixados às armaduras longitudinais das extremidades (direita e esquerda), como mostra a Figura 47. O equipamento utilizado para aquisição dos dados foi o QuantumX-MX840 (Figura 48) da fabricante HBM®, com classe de precisão de 0,05% e taxa de amostragem por canal de até 40kS/s. O aquisitor é ligado a um computador no qual os dados são processados pelo Software CatmanEasy da HBM.

Figura 47. Extensômetro fixo na armadura longitudinal

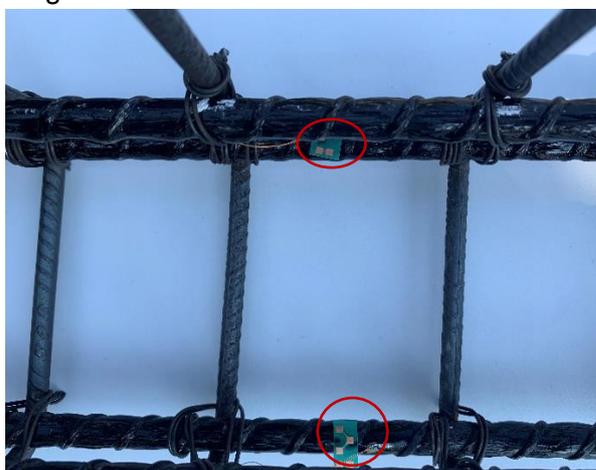
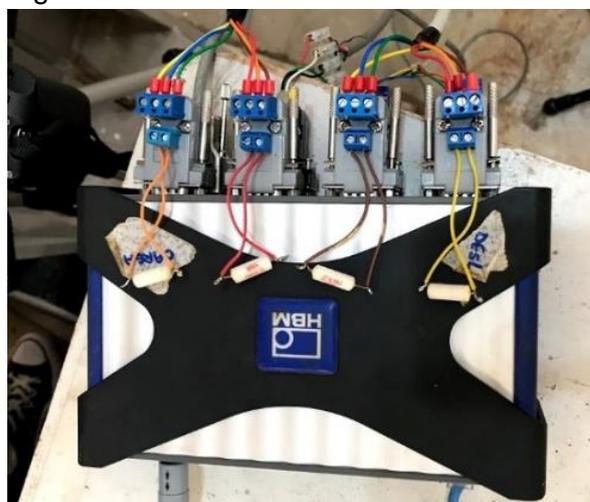
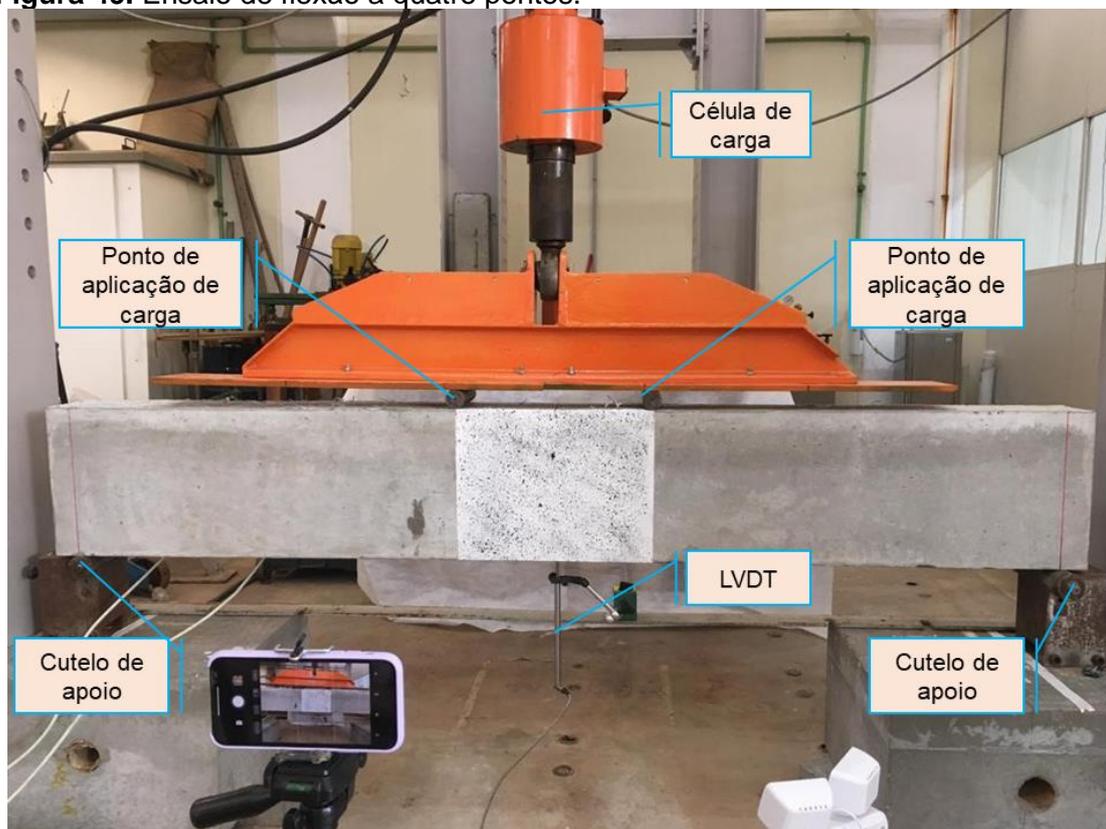


Figura 48. QuantumX-MX840.



Foi posicionado no centro do vão livre um medidor LVDT tipo caneta de modelo #142310083 1-WA/50mm-T, da marca HBM, com cursor de 50 mm, para coleta do deslocamento vertical apresentado pela viga ao longo do ensaio. A Figura 49 mostra uma viga posicionada para o ensaio de flexão a quatro pontos.

Figura 49. Ensaio de flexão a quatro pontos.



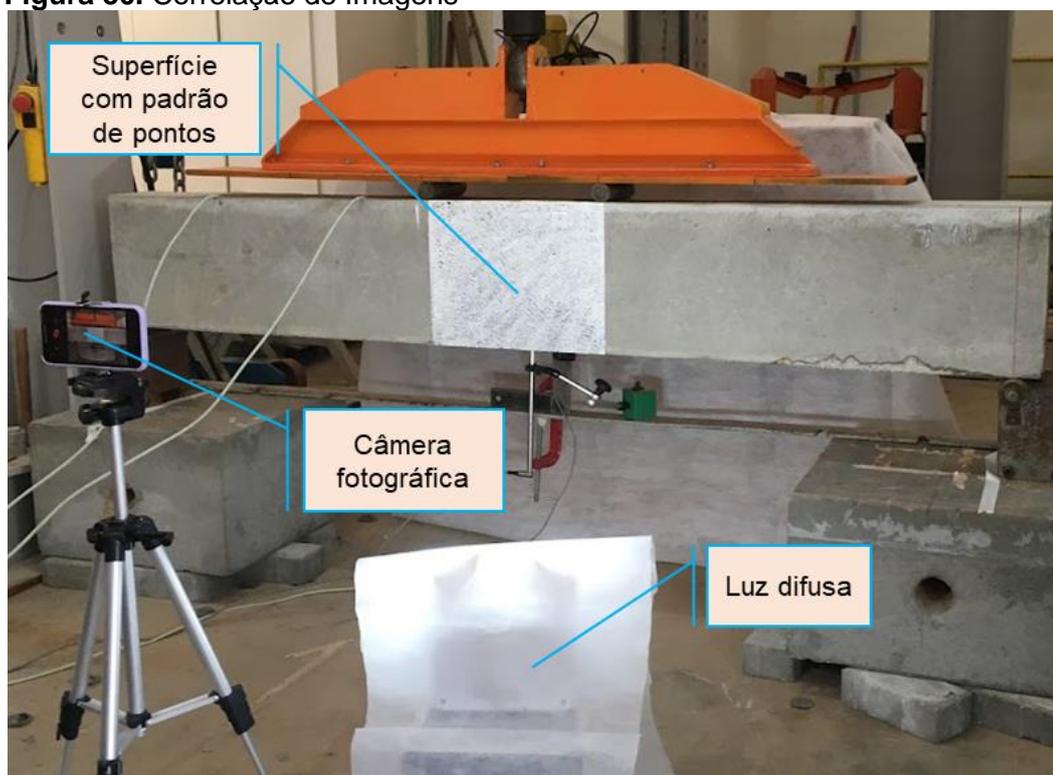
3.3.3.2. Correlação Digital de Imagem (DIC)

Em conjunto com a instrumentação física, também foi utilizado correlação de imagem digital (*Digital Image Correlation*, DIC) no vão central das vigas (30 x 38 cm), com o objetivo de monitorar os deslocamentos verticais e a progressão da abertura de fissuras ao longo do ensaio. A aquisição dos dados teve que ser feita seguindo alguns critérios: a superfície analisada foi exposta à luz difusa; a câmera teve que ser posicionada ortogonalmente ao trecho analisado; a superfície analisada deve ser preparada para que tenha um padrão não repetitivo, isotrópico e de alto contraste, como indicado por Resende (2020).

A superfície foi preparada utilizando como fundo tinta branca fosca e com o uso de uma escova em formato espiral foi inserido pontos espaçados de maneira aleatória (*speckles*).

A captura das imagens foi realizada com um tempo de 5 segundos, ou seja, uma foto a cada 5 segundos, com uma câmera de 12 MP. O programa responsável pela captura contínua das fotos foi o *Lens Buddy* versão 4.17.0 (324). O controle do tempo permite a compatibilização das imagens com os dados coletados pelo aquisitor de dados HBM. A Figura 50 apresenta os equipamentos posicionados para a captura de imagens que foram utilizadas na coleta de dados da DIC. A correlação digital das imagens foi realizada no software GOM Correlate da empresa *ZEISS Group*.

Figura 50. Correlação de Imagens



3.4. Análise dos dados

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização foram analisados por meio de ferramentas estatísticas e comparados com os resultados pesquisados em literatura e norma. As ferramentas utilizadas foram a aplicação do critério de Chauvenet para eliminação de possíveis dados espúrios, e a interpretação dos resultados feita por meio da análise estatística ANOVA, verificando a existência de diferenças de nível significativo de 5% entre os dados obtidos nos ensaios.

A análise dos resultados do ensaio de flexão a quatro pontos foi feita por comparação gráfica em comparação as normas ACI 440.1R-15 e Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste item são apresentados os resultados e análises provenientes das etapas experimentais desenvolvidas ao longo desta dissertação. Inicialmente, são mostrados os resultados da caracterização mecânica dos materiais constituintes das vigas de concreto armado com barras de GFRP e com adição de fibras dispersas

Em continuação, são apresentados com o propósito de avaliação, os resultados dos ensaios de flexão a quatro pontos de vigas de concreto armado com barras de GFRP com e sem adição de fibras dispersas e com e sem adição de confinamento por estribos na região central da viga.

4.1. Caracterização do concreto

A Tabela 25 apresenta os resultados encontrados na caracterização do concreto utilizado para a concretagem das vigas armadas GFRP com e sem adição de fibras, com os valores médios de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade.

Tabela 25. Resultados caracterização para ensaio de flexão.

	f_{cm} Resistência à Compressão (MPa)	E_i Módulo de elasticidade (GPa)	f_{ctf} Resistência à tração (MPa)
Concreto convencional	42,27	33,843	5,66
Desv. Pad (MPa)	5,68	0,893	0,15
CV(%)	13,42	2,638	2,73
Concreto com adição de fibras	34,16	29,734	5,11
Desv. Pad (MPa)	2,65	4,27	0,69
CV(%)	7,74	14,37	13,59

Os ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração na flexão foram analisados aos pares, concreto sem fibra e concreto com fibra, utilizando a ferramenta estatística ANOVA. Observou-se que o p-valor encontrado nas três análises indica que não existem diferenças significativas entre os resultados dos concretos.

4.1.1. Ensaio de Resistência à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais)

A Tabela 26 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão. A Tabela apresenta os limites de proporcionalidade (LOP) para cada corpo de prova e as resistências residuais à tração na flexão ($f_{R,i}$).

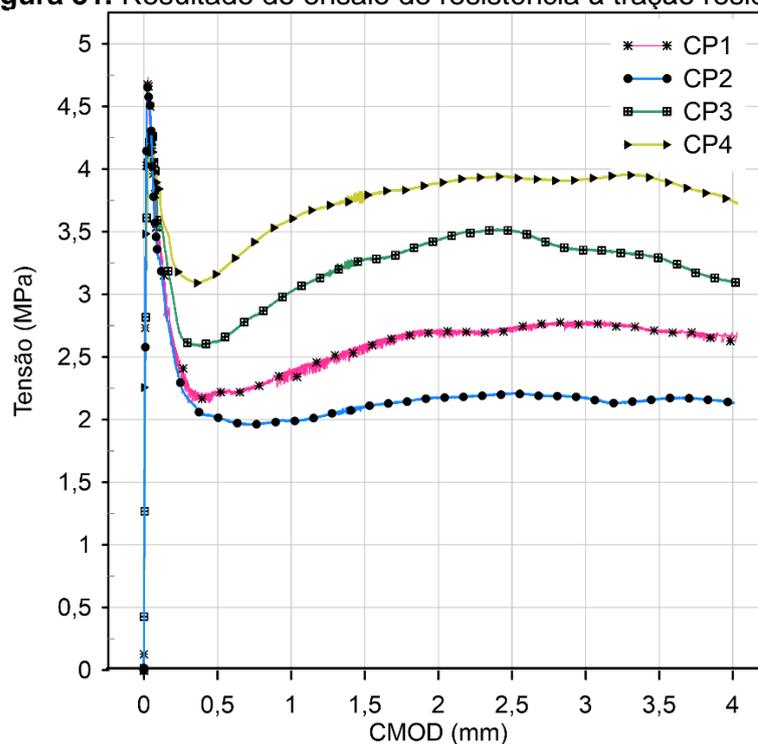
Tabela 26. Resistência à tração residual

Exemplar no.	fL (MPa)	fR1 (MPa)	fR2 (MPa)	fR3 (MPa)	fR4 (MPa)
1	4,73	2,20	2,58	2,71	2,72
2	4,68	2,02	2,08	2,20	2,15
3	4,31	2,62	3,27	3,51	3,31
4	4,17	3,15	3,76	3,94	3,94
Média	4,47	2,50	2,92	3,09	3,03
Desvio Padrão	0,28	0,50	0,74	0,78	0,77
CV (%)	6,15	20,12	25,37	25,31	25,40

A Figura 51 apresenta o comportamento dos corpos de prova durante o ensaio de tração. Após atingirem a tensão máxima, ocorre a fissuração do concreto reduzindo a capacidade do corpo de prova de resistir aos esforços de tração, resultando na queda da tensão. Contudo, a presença das fibras confere resistências residuais ao concreto ao longo do ensaio, apresentando uma resistência residual média de 3,03 kN no CMOD de 3,5 mm.

As curvas tensão-CMOD caracterizam um concreto com comportamento de *deflection softening*, no qual ocorre a redução gradual da tensão após a fissuração do concreto.

Figura 51. Resultado do ensaio de resistência à tração residual.



A variação entre as curvas, observada na Figura 52, ocorre devido a distribuição não homogênea das fibras no concreto. Quando as fibras dispersas estão próximas a região do entalhe, a contribuição para o esforço resistente é maior. A Figura 53 apresenta a seção transversal do CP2, corpo de prova que obteve a menor resistência residual e a Figura 53 a seção do CP4, corpo de prova com a maior resistência residual. Observa-se a presença de espaços com baixa dispersão de fibras próximos a região de entalhe do CP2, enquanto o CP4 apresenta fibras ao longo da região de entalhe.

Figura 52. Corpo de prova CP2



Figura 53. Corpo de prova CP4

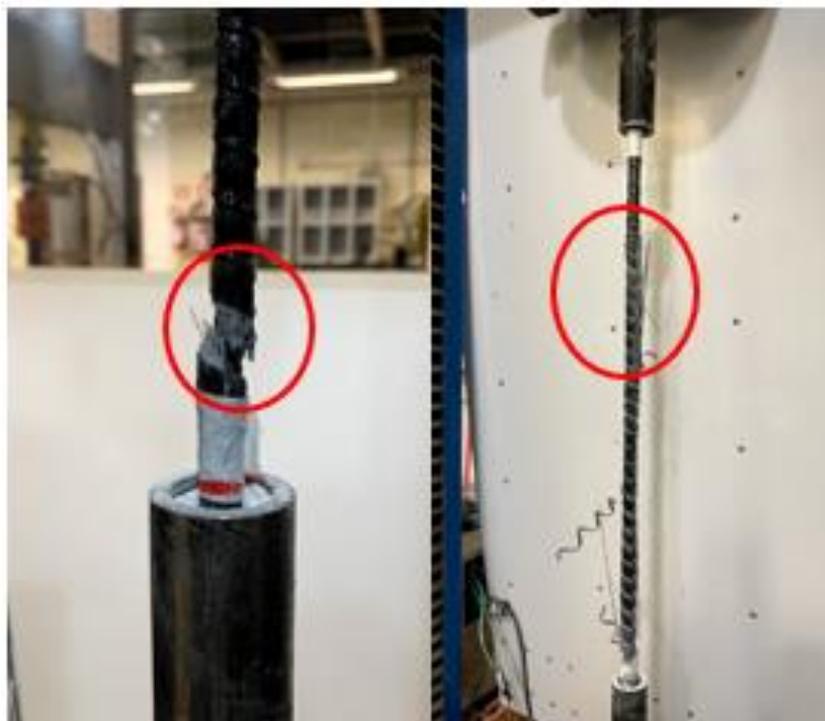


4.2. Caracterização das barras de GFRP

4.2.1. Resistência à tração das barras de GFRP

Por meio do ensaio de tração obteve-se os valores de resistência à tração, deslocamentos e módulos de elasticidade das barras. As barras são ensaiadas até a ruptura do material, como pode ser observado na Figura 54.

Figura 54. Ruptura das barras de GFRP no ensaio de tração.



A Tabela 27 apresenta os resultados de resistência à tração média para cada diâmetro de barra ensaiada.

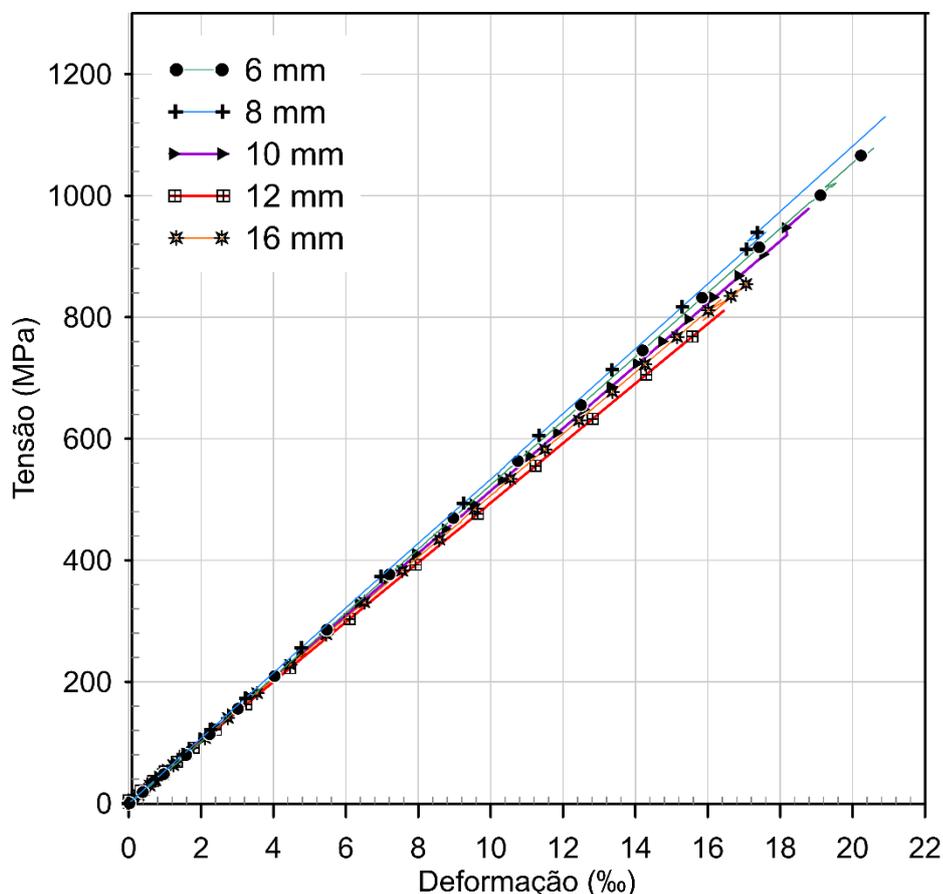
Tabela 27. Resultado do ensaio de tração direta

Diâmetro Nominal(mm)	Diâmetro efetivo (mm)	Área efetiva (mm ²)	Resistência à tração (MPa)	Dev. Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
6	6,44	32,57	1033,03	46,73	4,52
8	7,60	45,36	1085,67	82,15	7,57
10	10,50	86,59	997,11	14,98	1,50
12	11,90	111,12	876,38	37,06	4,23
16	15,70	193,59	865,25	19,29	2,23

Na Figura 55 podemos observar o comportamento à tração do material pelo gráfico de tensão de tração versus deformação específica. Ao observar os gráficos,

nota-se o comportamento elástico-linear das barras, comportamento apresentado por materiais frágeis.

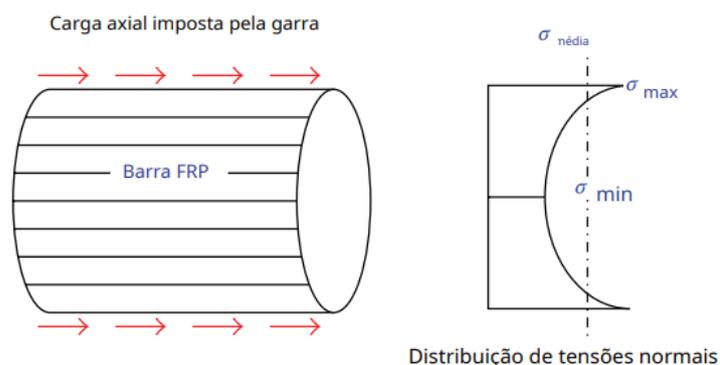
Figura 55. Gráfico tensão de tração x deformação das barras de GFRP.



Os resultados de resistência à tração obtidos para todas as barras ensaiadas são superiores aos recomendados pela norma Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), na qual a resistência à tração mínima das barras de GFRP deve ser de 800 MPa.

Observa-se que a resistência à tração, a partir da barra com diâmetro de 10 mm, apresenta valores decrescente. A literatura descreve esse fenômeno como efeito “*Shear lag*”, que caracteriza a perda de resistência das barras de GFRP com o aumento do diâmetro. Isso ocorre porque as fibras externas absorvem maiores tensões do que as fibras centrais.

Na Figura 56 tem-se o diagrama de distribuição de tensão em uma barra de GFRP. Estudos concluem que devido ao efeito *shear lag*, barras com diâmetros maiores tendem a apresentar resistências à tração inferiores. (BENMOKRANE, *et. al*, 2017; YOU, *et. al*, 2017; PORTNOV; BAKIS, 2008).

Figura 56. Efeito Shear Lag.

Fonte: You, Y. *et. al*, 2015 – modificada.

4.2.2. Módulo de Elasticidade das barras de GFRP

A Tabela 28 apresenta os módulos de elasticidade médio obtidos para cada diâmetro de barra ensaiada.

Como esperado, os resultados obtidos de módulo de elasticidade apresentaram comportamentos semelhantes aos dos resultados de resistência à tração das barras. As barras com maiores valores de resistência à tração apresentaram maiores valores de módulos de elasticidade.

Tabela 28. Resultados dos módulos de elasticidade das barras de GFRP.

Diâmetro Nominal(mm)	Diâmetro efetivo (mm)	Área efetiva (mm ²)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
6	6,44	32,57	52,07	0,80	1,54
8	7,60	45,36	53,42	0,96	1,8
10	10,50	86,59	51,71	4,32	8,35
12	11,90	111,12	50,02	2,19	4,37
16	15,70	193,59	50,91	1,66	3,27

Os resultados de módulos de elasticidades obtidos para todas as barras ensaiadas são superiores aos recomendados pela norma Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), que orienta para um valor mínimo de 50 GPa. Os resultados também atendem aos critérios da ASTM D7957/D7957M-17, que oriente valores mínimos de 44,8 GPa para o módulo de elasticidade das barras de GFRP.

4.2.3. Ensaio de arrancamento

A Tabela 29 apresenta os resultados de tensão de aderência média para a barra de 10 mm.

Tabela 29. Resultados ensaio de arrancamento em barras de GFRP.

\emptyset Efetivo (mm)	Resistência à tração das barras (MPa)	f_{cm} (MPa)	E_f (MPa)	Tensão aderência média (MPa)
10,50	997,11	40,02	51713,44	25,20
Desv. Pad. (MPa)	14,98	3,45	4319,37	2,37
CV(%)	1,50	8,63	8,35	9,39

A tensão de aderência media apresentada pela barra de 10 mm atende aos requisitos mínimos da Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), sendo maior que 12 MPa. Também atende ao valor mínimo exigido pela ASTM D7957/D7957M-17, sendo maior que 7,6 MPa.

4.3. Ensaios de flexão a quatro pontos em vigas armadas com GFRP.

4.3.1. Modo de ruptura

O pré-dimensionamento das vigas foi realizado considerando uma viga sem adição de fibras e sem armadura de confinamento. Portanto, a viga G-SF-SC é a viga de referência.

Como foi descrito no item 3.3.1, o modo de ruptura esperado para todas as vigas era a ruptura por esmagamento do concreto comprimido. Nos itens a seguir será apresentado a ruptura observada para cada viga ensaiada.

4.3.1.1. G-SF-SC

A viga G-SF-SC não possui adição de fibras dispersas e nem armadura de confinamento. Durante o ensaio as primeiras fissuras surgiram na região de flexão, onde o cisalhamento é nulo. Ao longo do ensaio, como pode-se observar na Figura 57, no canto esquerdo, entre o apoio e a forças aplicada, que as fissuras de flexão se inclinam devido à influência das forças cortantes. Observa-se que a ruína ocorreu por esmagamento do concreto.

A viga resistiu a uma carga máxima de 158,65 kN com um deslocamento vertical máximo de 32,38 mm.

Figura 57. Modo de falha da viga G-SF-SC.



4.3.1.2. G-SF-C

A viga G-SF-C não possui adição de fibras dispersas, mas apresenta armadura de confinamento. Durante o ensaio as primeiras fissuras também surgiram na região de flexão, onde o cisalhamento é nulo. Assim como ocorre na viga G-SF-SC o modo de falha ocorre por esmagamento do concreto comprimido, com a presença de fissuras de cisalhamento.

A viga resistiu a uma carga máxima de 173,3 kN com um deslocamento vertical máximo de 43,87 mm. A Figura 58 apresenta o modo de ruptura da viga G-SF-C.

Figura 58. Modo de falha viga G-SF-C.



4.3.1.3. G-F-SC

A viga G-F-SC possui adição de fibras dispersas sem armadura de confinamento. Ao longo de todo o ensaio a concentração de fissuras ocorre na região de flexão, no centro do vão livre. Com o decorrer do ensaio as fissuras se espalham ao longo da viga, contudo nesta viga não se observa a ocorrência de fissuras de cisalhamento acentuadas. A falha do elemento ocorre por flexão com esmagamento do concreto comprimido, como mostra a Figura 59.

Pode-se observar que nesta viga as fissuras são em maior quantidade, se comparada as vigas anteriores, e de menores aberturas.

A viga resistiu a uma carga máxima de 162,07 kN com um deslocamento vertical máximo de 44,15mm.

Figura 59. Modo de falha da viga G-F-SC



4.3.1.4. G-F-C

A viga G-F-C possui adição de fibras dispersas e armadura de confinamento no terço central. Assim como apresentado pela viga G-F-SC, a concentração inicial das fissuras ocorre no vão central prolongando essas fissuras ao longo da viga com o andamento do ensaio. O modo de falha da viga foi por flexão com esmagamento do concreto comprimido, como mostra a Figura 60.

Pode-se observar que nesta viga a formação das fissuras ocorre de maneira semelhante à viga G-F-SC, fissuras em maior quantidade, menor distância entre as fissuras e menores aberturas.

A viga resistiu a uma carga máxima de 202,81 kN com um deslocamento vertical máximo de 48,26mm.

Figura 60. Modo de falha da viga G-F-C.



4.4. Comportamento à flexão: análise comparativa entre teórico e experimental.

A análise do comportamento a flexão das vigas armadas com GFRP faz um comparativo entre os resultados calculados, seguindo a ACI 440.1R-15 (Apêndice B) e a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) (para a viga de concreto sem fibras, Apêndice C e para a viga de concreto com fibras, Apêndice D), e os resultados dos ensaios experimentais. Os comportamentos avaliados foram: a capacidade de carga das vigas, deformações verticais (flecha) e a abertura de fissuras.

Para a análise das deformações verticais e abertura de fissuras também foi avaliado o comportamento até a carga de serviço, representada neste trabalho, como sendo 40% da carga última estimada no dimensionamento:

- ACI – Carga de serviço adotada = 51,40 kN
- Prática Recomendada – Carga de serviço adotada = 56,61 kN
- Prática Recomendada (com fibra) – carga de serviço adotada = 49,76 kN

Para o dimensionamento à flexão da viga estudada, considerando as recomendações da ACI 440.1R-15 e a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), foram considerados, nas propriedades dos materiais, os resultados obtidos nos ensaios de caracterização. A Tabela 30 apresenta dos dados utilizados no dimensionamento. Não foram considerados coeficientes de ponderação.

Tabela 30. Dados usados no dimensionamento teórico.

	DADOS	
	Sem Fibra	Com Fibra
Porta estribo (A's)	0,623	0,623
A_f (cm ²)	3,46	3,46
h (cm)	30	30
b (cm)	15	15
d (cm)	25,32	25,32
f_{cm} (MPa)	42,27	34,16
f_{ff} (MPa)	997,11	997,11
E_f (GPa)	51,71	51,71
$\epsilon_{cuprática}$	0,0035	0,0035
ϵ_{cuACI}	0,0030	0,003
E_{ci} (GPa)	33,84	29,73
E_{cs} (GPa)	30,65	26,33
α_i	0,906	0,885

4.4.1. Capacidade de carga.

A Tabela 31 apresenta um comparativo entre o momento resistente teórico obtidos pela ACI 440.1R-15 e a Prática Recomendada IBRAOCN/ABECE (2021) e os momentos últimos experimentais.

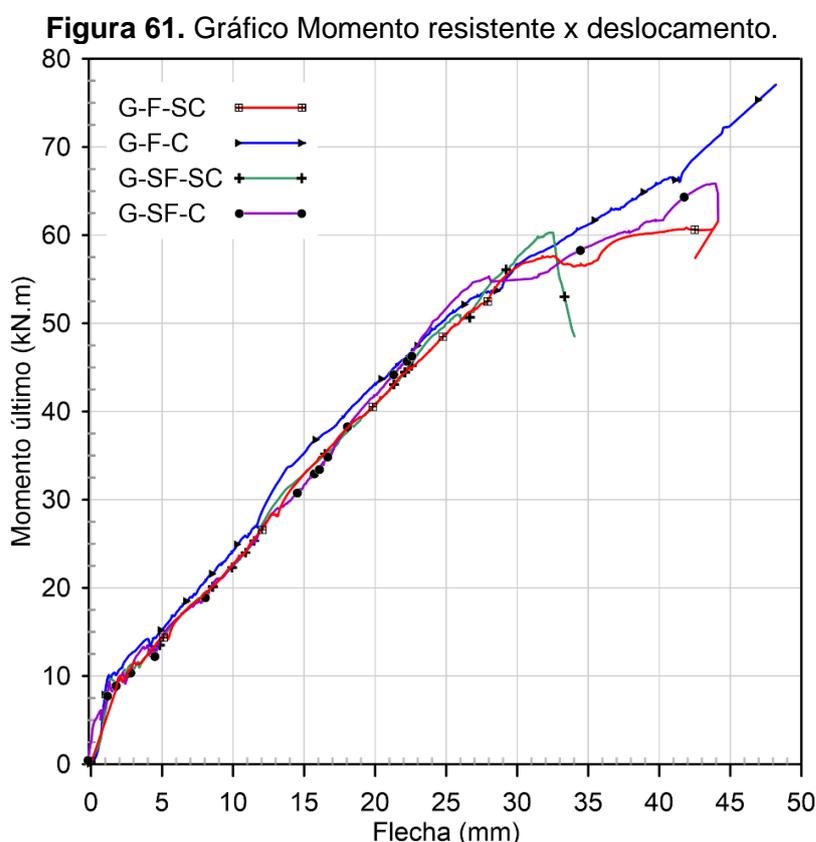
Tabela 31. Momento resistente.

ID viga	$M_{uExperimental}$ (kNm)	M_{rACI} (kNm)	$M_{r_{exp}/M_{u_{aci}}}$ (kNm)	$M_{rPrática}$ (kNm)	$M_{r_{exp}/M_{u_{prática}}}$ (kNm)
G-SF-SC	60,29		1,23		1,12
G-SF-C	65,86	48,82	1,35	53,78	1,22
G-F-SC	61,58		1,26		1,15
G-F-C	77,06		1,58		1,43

Os resultados experimentais mostraram que as duas recomendações, ACI 440.1R-15 e Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), apresentam resultados teóricos abaixo do experimental. Como apenas a viga G-SF-SC possui propriedades do concreto e armadura semelhantes às utilizadas no dimensionamento, esses valores estão subestimados em 23% na ACI 440.1R-15 e em 12% na Prática recomendada IBRACON/ABECE (2021).

As maiores diferenças foram observadas nas vigas G-SF-C e G-F-C, apresentando um aumento na capacidade de carga de 35% e 58% com relação a ACI, respectivamente e de 22% e 43% com relação a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), respectivamente. Esse resultado indica a influência da adição de fibra e da armadura de confinamento no acréscimo de capacidade de carga apresentado pelas vigas. As maiores variações entre $M_{u_{exp}}/M_{r_{teórico}}$ ocorrem com relação a ACI 440.1R-15.

A Figura 61 apresenta a comparação gráfica entre a Força versus o deslocamento vertical apresentado pelas vigas. É possível observar o aumento na capacidade de carga e maior ductilidade antes da ruptura das demais vigas quando comparadas à viga G-SF-SC. A ação conjunta da adição de fibras e da armadura de confinamento conferiram elevado aumento na capacidade de carga da viga. Contudo, a presença da fibra e do confinamento, de forma isolada, contribuiu no aumento da ductilidade das vigas (G-SF-C e G-F-SC). Não foi observado grandes ganhos de rigidez de deslocamento entre as vigas, com relação a viga referencia G-SF-SC.



4.4.2. Deformação da armadura longitudinal

As deformações específicas da armadura longitudinal, medidas pelos extensômetros, apresentaram características semelhantes em todas as vigas ensaiadas, como mostra a Figura 62.

Observa-se que as vigas antes da fissuração (Figura 63) possuem o mesmo comportamento, isso ocorre porque a armadura foi pouco solicitada (Estádio I), sendo o concreto o principal responsável por resistir aos esforços solicitantes.

Após a fissuração do concreto as armaduras começam a ser mais solicitadas apresentando grandes deformações, comportamento esperado devido ao baixo módulo de elasticidade das barras de GFRP e observado em literatura (DOO-YEOL YOO A; NEMKUMAR BANTHIA; YOUNG-SOO YOON, 2016, LIU; SUN; WU, 2019).

A armadura das vigas G-F-C e G-F-SC apresentam deformações menores (pós fissuração) com relação as vigas G-SF-C e G-SF-SC.

Figura 62. Deformação da armadura longitudinal das vigas armadas com GFRP.

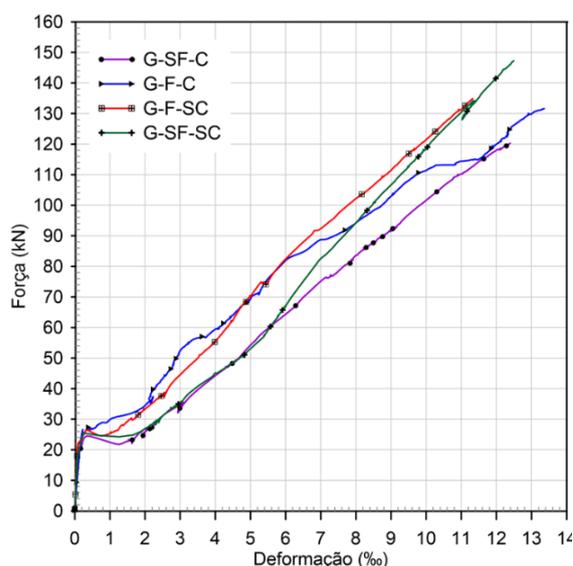
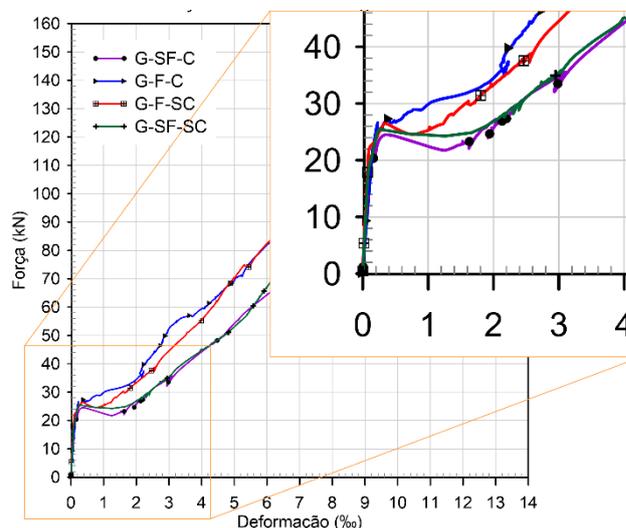


Figura 63. Detalhe da deformação da armadura no Estádio I.



Nas Figuras 64 e 65 são apresentadas as vigas com adição de fibras e sem adição de fibras, respectivamente. Nos dois segmentos é observado um comportamento semelhante. Após a carga solicitante ser aproximadamente metade da carga última, a armadura das vigas sem a presença da armadura de confinamento apresenta deformações menores.

Figura 64. Influência do confinamento na deformação (vigas com adição de fibra).

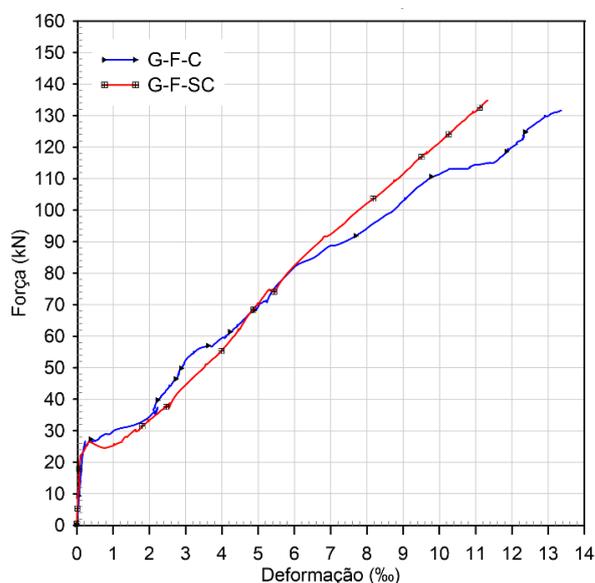
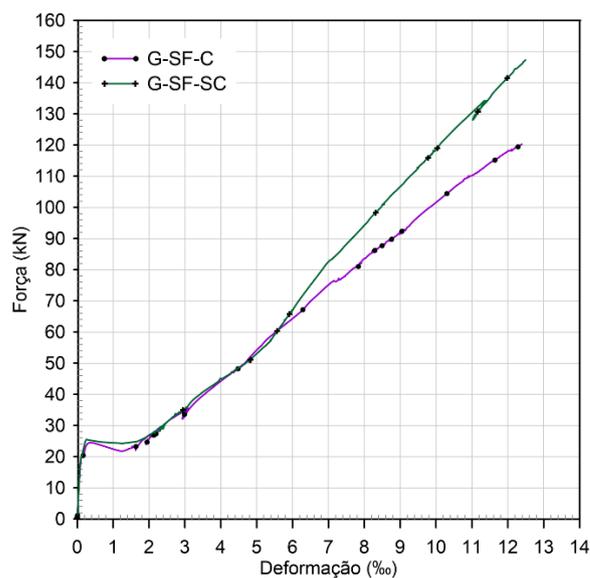


Figura 65. Influência do confinamento na deformação (vigas sem adição de fibra).



Nas Figuras 66 e 67 são apresentadas as vigas com armadura de confinamento e sem armadura de confinamento, respectivamente. Nos gráficos apresentados nas Figuras supracitadas, pode-se observar como parâmetro variante, entre as vigas, a adição de fibras. Nos dois segmentos as vigas com adição de fibras apresentaram deformações menores ao longo da curva.

Figura 66. Influência da adição de fibras na deformação (vigas com confinamento).

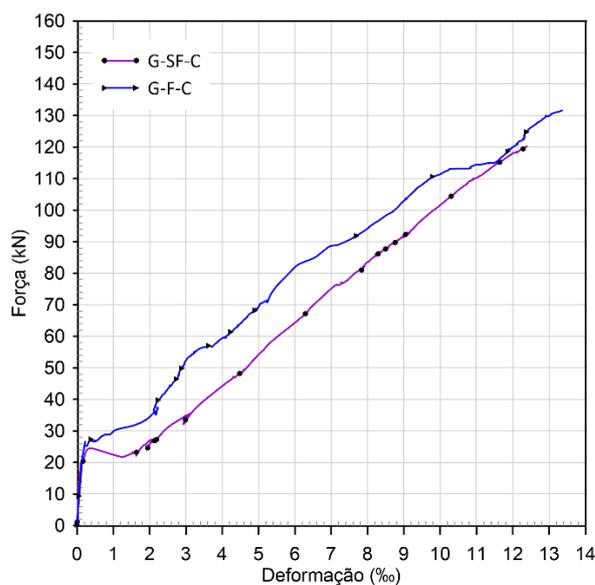
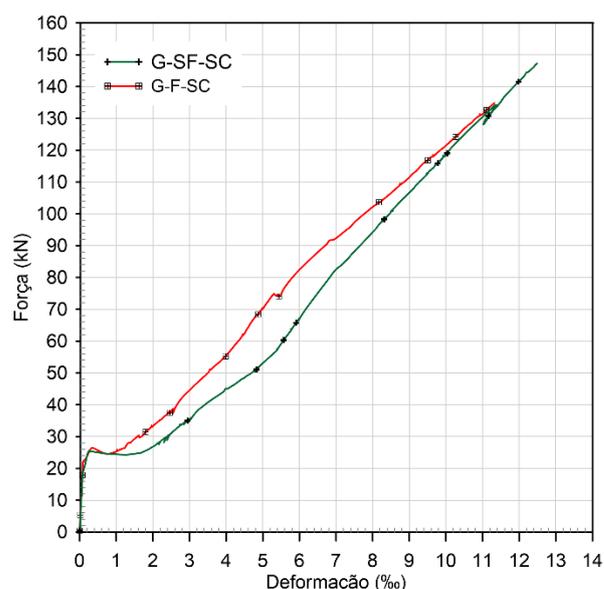


Figura 67. Influência do confinamento na deformação (vigas sem confinamento).



4.4.3. Análise dos deslocamentos verticais.

No dimensionamento de uma viga de concreto armado, uma das verificações que devem ser atendidas é o deslocamento vertical apresentado pelo elemento. Nos itens 2.5.1.5 e 2.5.2.4 desta dissertação, foram apresentadas as equações que estimam os deslocamentos verticais de acordo com a ACI 440.1R-15 e a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) e também seus limites. A Tabela 32 apresenta os valores calculados.

Tabela 32. Valores de flecha máxima segundo as normas.

ACI 440.1R-15			Prática Recomendada		
		Limite			Limite
Carga de serviço* (kN)	51,40	7,92	Carga de serviço* (kN)	56,61	7,60
Flecha serviço (mm)	5,52		Flecha serviço (mm)	2,28	

*estimada em 40% da carga última.

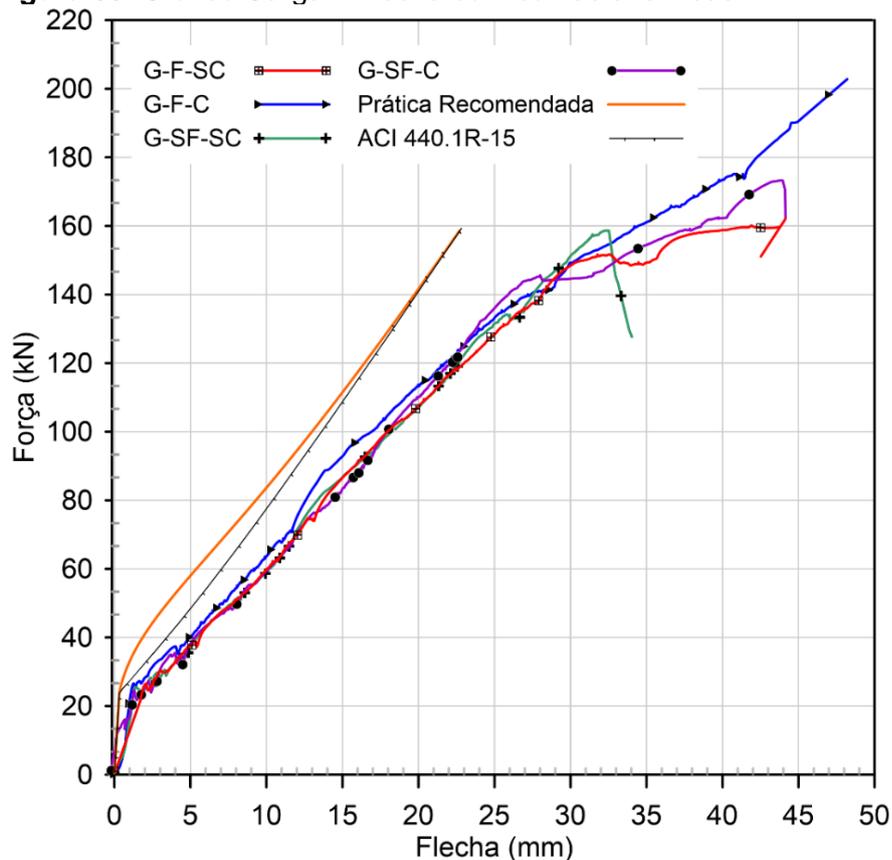
Na análise dos deslocamentos foi verificado o comportamento das vigas até atingirem a carga de serviço. A Tabela 33 apresenta os deslocamentos medidos nas vigas para as duas cargas de serviço (ACI e Prática Recomendada).

Tabela 33. Deslocamentos apresentados pelas vigas.

ID viga	Carga _{ACI} (kN)	Flecha _{exp} (mm)	Flecha _{exp} Limite _{aci}	Carga _{prática} (kN)	Flecha _{exp} (mm)	Flecha _{exp} Limite _{prática}
G-SF-SC		8,33	1,05		9,44	1,24
G-SF-C	51,40	8,19	1,03	56,61	9,37	1,23
G-F-SC		8,13	1,03		9,36	1,23
G-F-C		7,47	0,94		8,41	1,11

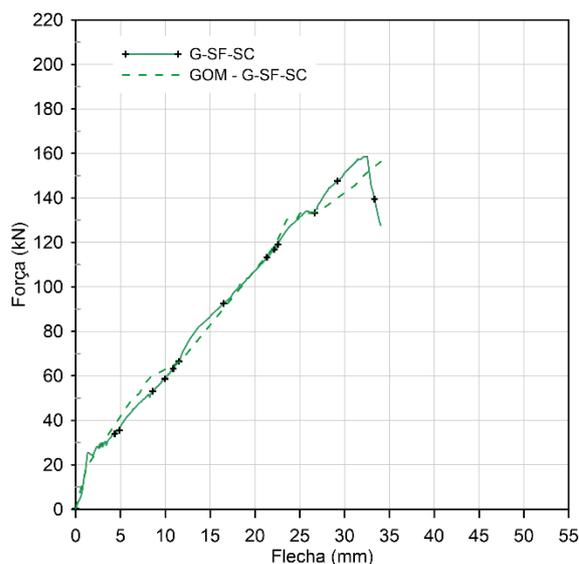
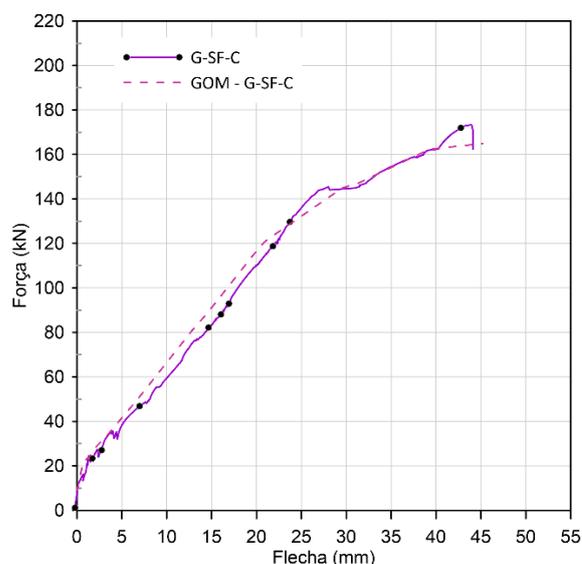
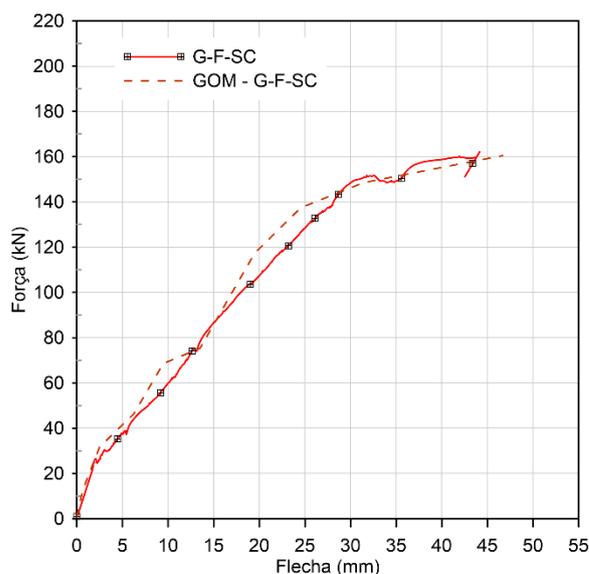
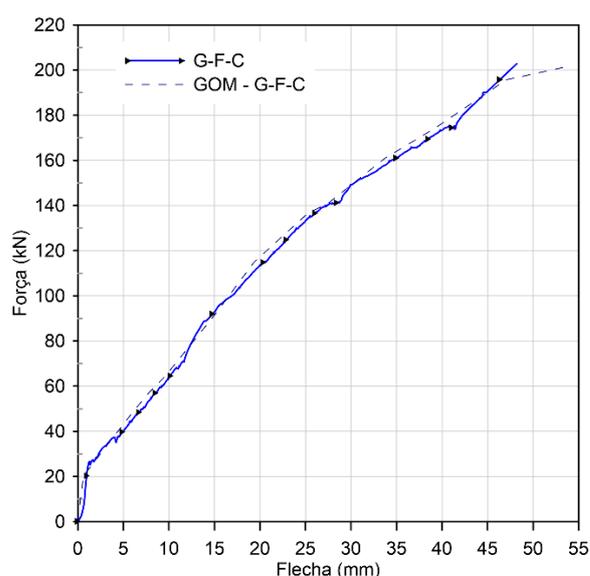
Em média os deslocamentos foram superiores ao limite da Prática Recomendada em 20%. Os resultados foram mais próximos ao limite da ACI 440.1R-15, sendo em média 4% superior ao limite. Apenas a viga G-F-C, com relação a ACI 440.1R-15, apresentou deslocamento vertical dentro do limite.

A Figura 68 apresenta uma análise gráfica e analítica do comportamento carga-deslocamento descritos pela ACI 440.1R-15 e pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021). Pode-se observar que as curvas analíticas apresentam um comportamento mais rígido quando comparadas as curvas experimentais. Sendo assim, as normas apresentaram valores subestimados para flechas.

Figura 68. Gráfico Carga x Flecha com curvas analíticas.

Nas Figuras 69 a 72 são apresentados os comportamentos carga-deslocamento das vigas. Os deslocamentos foram medidos pelos transdutores de deslocamentos (LVDT) posicionados no vão central das vigas. Os resultados foram comparados com os obtidos por correlação de imagem digital (DIC) pelo software GOM correlate.

Os resultados encontrados por meio da correlação de imagens são semelhantes aos medidos pelo LVDT e, como a concordância entre as curvas é satisfatória, permitiu o uso da correlação de imagem digital para determinar a abertura de fissuras.

Figura 69. Gráfico Carga x Flecha G-SF-SC**Figura 70.** Gráfico Carga x flecha G-SF-C.**Figura 71.** Gráfico Carga x flecha G-F-SC.**Figura 72.** Gráfico Carga x flecha G-F-C.

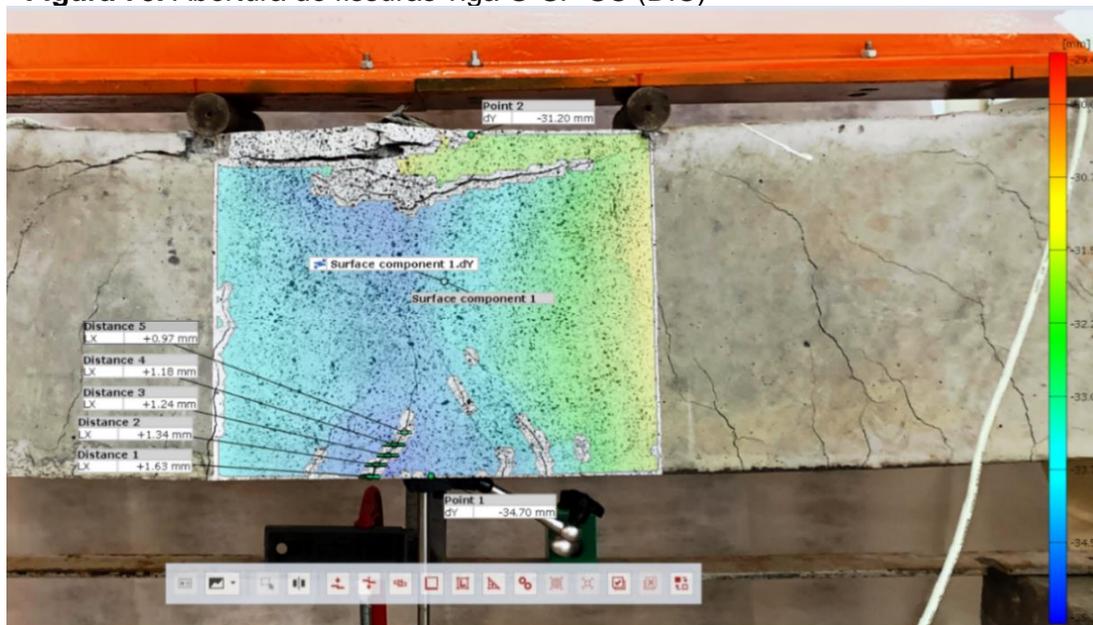
4.4.4. Abertura de fissuras

A análise da abertura de fissuras das vigas ensaiadas no programa experimental foi realizada pelo uso da Correlação de Imagem Digital (DIC). As imagens coletadas durante os ensaios foram inseridas no software GOM Correlate, no qual pode-se observar a progressão da abertura das fissuras ao longo do carregamento. Para todas as vigas foi medida a abertura da maior fissura aparente no vão central, entre os pontos de aplicação de carga.

A Figura 73 apresenta a DIC com a fissura analisada na viga G-SF-SC. A abertura máxima medida foi de 1,63 mm, localizada em uma região próxima ao centro

do vão livre. Pela análise das imagens ao longo do tempo de ensaio é possível observar que o surgimento da fissura de cisalhamento restringe o crescimento da abertura da fissura de flexão. Não é possível determinar a abertura da fissura de cisalhamento pois ela não está contida na superfície preparada para leitura.

Figura 73. Abertura de fissuras viga G-SF-SC (DIC)



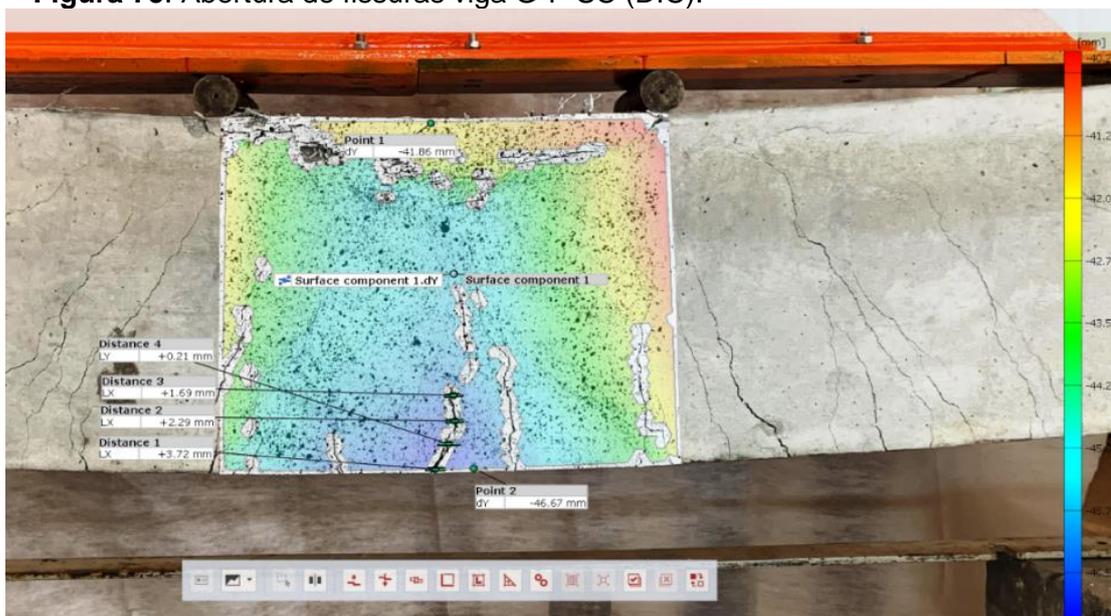
A Figura 74 apresenta a DIC com a fissura analisada na viga G-SF-C, a abertura máxima medida foi de 2,27 mm, localizada em uma região próxima ao centro do vão livre. Assim, como ocorreu na viga G-SF-SC a fissura de cisalhamento influenciou na abertura da fissura de flexão, aliviando as tensões nesta região.

Figura 74. Abertura de fissuras viga G-SF-C (DIC).



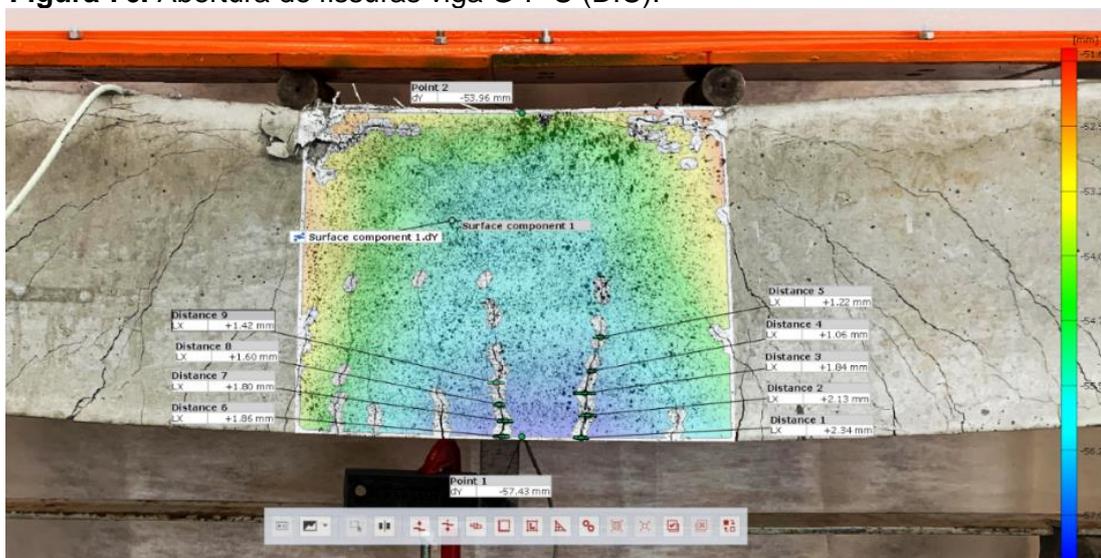
Figura 75 apresenta a DIC com a fissura analisada na viga G-F-SC, a abertura máxima medida foi de 3,72 mm, localizada em uma região próxima ao centro do vão livre. Nesta viga não ocorreu fissuras de cisalhamento. Pode-se observar que as fissuras aparecem em maiores quantidades e distâncias menores em comparação as vigas G-SF-SC e G-SF-C.

Figura 75. Abertura de fissuras viga G-F-SC (DIC).



A Figura 76 apresenta a DIC com a fissura analisada na viga G-F-C, a abertura máxima medida foi de 2,34 mm, localizada em uma região próxima ao centro do vão livre. Também não ocorreu fissuras de cisalhamento. Assim como na viga G-F-SC as fissuras se distribuíram ao longo de viga em maior quantidade e menores distâncias.

Figura 76. Abertura de fissuras viga G-F-C (DIC).



Em conjunto a Correlação e Imagem foi realizada uma análise teórica da abertura de fissuras como mostra a Tabela 34.

Tabela 34. Valores de norma abertura de fissuras para carga de serviço.

ACI 440.1R-15		Prática Recomendada			
		Limite			Limite
			Carga serviço (kN)	56,61	
			Fissura serviço (mm)	0,73	
Carga serviço (kN)	51,40	0,7	Carga serviço* (kN)	49,76	0,7
			Fissura serviço* (mm)	0,37	

* Considerando a contribuição da fibra

Na análise da abertura de fissuras, assim como foi realizado para o deslocamento vertical, foi verificado o comportamento das vigas até atingirem a carga de serviço. A Tabela 35 apresenta a abertura de fissuras medida em todas as vigas obtidas por meio dos dados coletados na correlação de imagem digital.

Tabela 35. Abertura de fissuras pela Prática Recomendada.

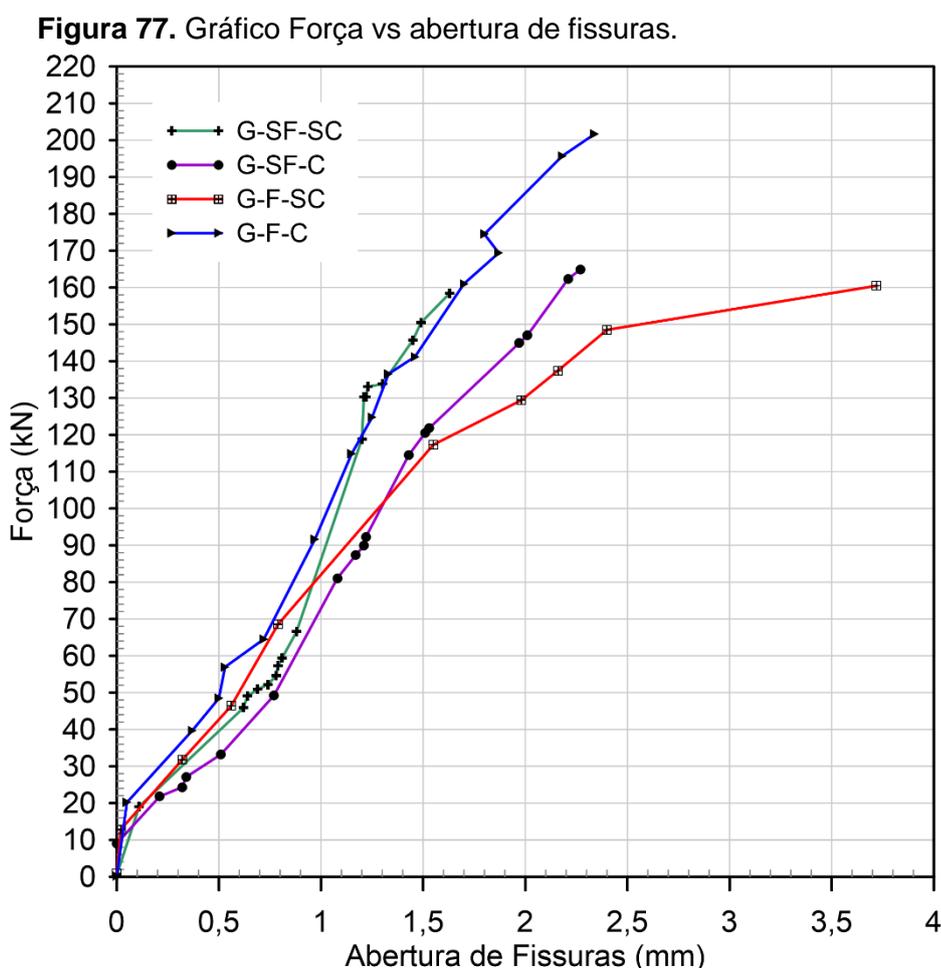
Prática Recomendada IBRACON/ABECE			
ID viga	Abertura de fissura (mm)	Carga de serviço (kN)	$\frac{\text{Fissura}_{\text{exp}}}{\text{Limite}_{\text{prática}}}$
G-SF-SC	0,78	56,61	1,11
G-SF-C	0,85		1,21
G-F-SC	0,60	49,76	0,86
G-F-C	0,51		0,73

A Tabela 36 apresenta a abertura de fissuras considerando a carga de serviço adotada pelo dimensionamento segundo a ACI 440.1R-15.

Tabela 36. Abertura de fissuras pela ACI 440.

ACI 440.1R		
ID viga	Abertura de fissura (51,40 kN)	$\frac{\text{Fissura}_{\text{exp}}}{\text{Limite}_{\text{ACI}}}$
G-SF-SC	0,71 mm	1,01
G-SF-C	0,80 mm	1,14
G-F-SC	0,61 mm	0,87
G-F-C	0,51 mm	0,73

A adição de fibras ao concreto garantiu que as vigas atendessem ao limite estabelecido pelas normas, inferior a 0,7 mm. A ação conjunta da fibra e armadura de confinamento conferiram à viga G-F-C uma redução de 27% na abertura das fissuras, com relação ao limite, para a ACI 440 e Fib Model Code (2010). A Figura 77 apresenta o comportamento de força vs abertura de fissuras das vigas ao longo do ensaio.



Na Figura 78 pode-se observar o comportamento de Força-abertura de fissuras das vigas ensaiadas e o comportamento previsto no dimensionamento pela Fib Model Code (2010), considerando a viga sem adição de fibras ao concreto e sem armadura de confinamento. Nota-se que até a carga de 60 kN a curva analítica apresenta aberturas menores com relação às obtidas no ensaio experimental. Após a carga de 60 kN a abertura experimental reduz seu crescimento apresentando aberturas menores que a prevista no dimensionamento.

A Figura 79 apresenta o comportamento força- abertura de fissuras da viga com adição de fibras e sem armadura de confinamento. Contudo, nesta análise o dimensionamento previsto pelo Fib Model Code (2010) contém a parcela

correspondente a influência da adição de fibras no cálculo da abertura de fissura prevista. Observa-se que o comportamento analítico difere do apresentado na Figura 78. Com a adição da parcela de contribuição das fibras, o Fib Model Code (2010) prevê um comportamento mais rígido com relação ao previsto na Figura 78. Embora as vigas com adição de fibras atendam ao limite de abertura indicado pela Prática, para as cargas de serviço, as curvas analíticas provêm aberturas menores às observadas no ensaio experimental.

Figura 78. Abertura de fissuras e comportamento teórico (concreto sem fibras).

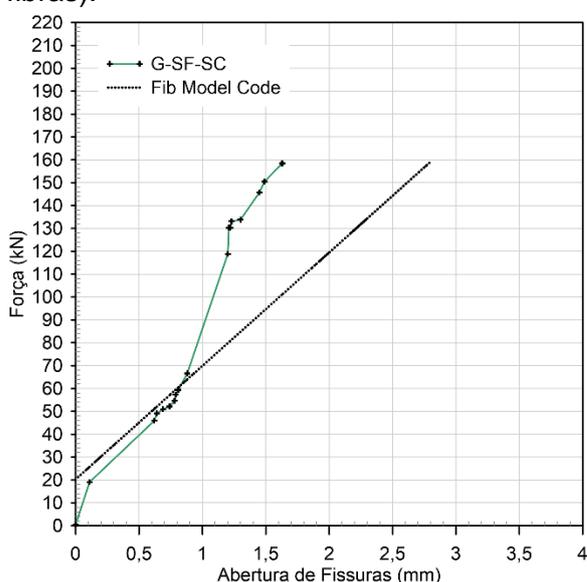
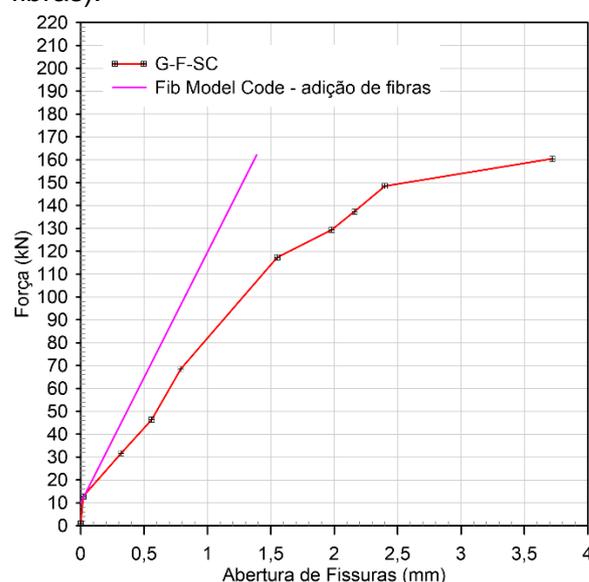
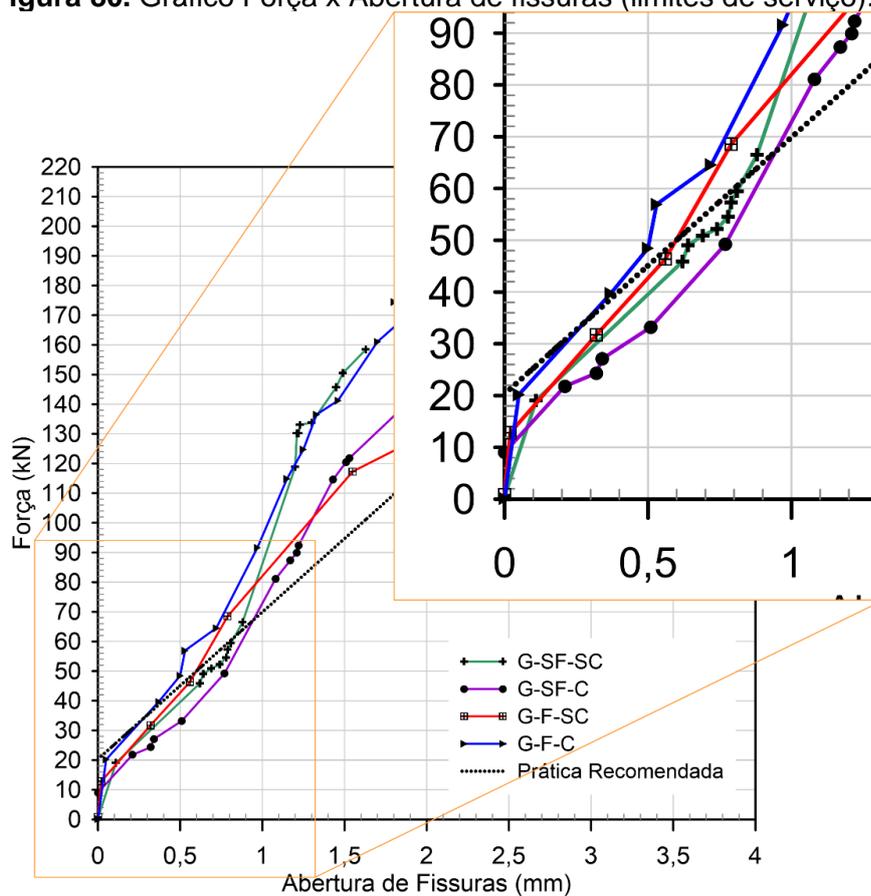


Figura 79. Abertura de fissuras e comportamento teórico (concreto com fibras).



Analisando o comportamento gráfico da abertura de fissuras nas vigas (Figura 80), durante a carga de serviço, observa-se que as vigas com adição de fibras possuem aberturas menores que as vigas sem adição de fibras ao longo de todo o intervalo. Contudo, com o acréscimo de carga, as fissuras das vigas G-SF-SC e G-SF-C apresentam aberturas semelhantes (G-SF-SC e G-F-C) ou inferiores (G-SF-C e G-F-SC) às vigas com adição de fibras. Relacionando as imagens digitais com o tempo de ensaio e a carga correspondente, pode-se observar que esse comportamento inicia em concordância com o aumento da abertura das fissuras de cisalhamento que ocorrem nas vigas sem fibra (G-SF-SC e G-SF-C).

Figura 80. Gráfico Força x Abertura de fissuras (limites de serviço).



As Figuras 81 e 82 mostram as fissuras de cisalhamento nas vigas G-SF-SC e G-SF-C, respectivamente.

Figura 81. Fissura de cisalhamento na viga G-SF-SC

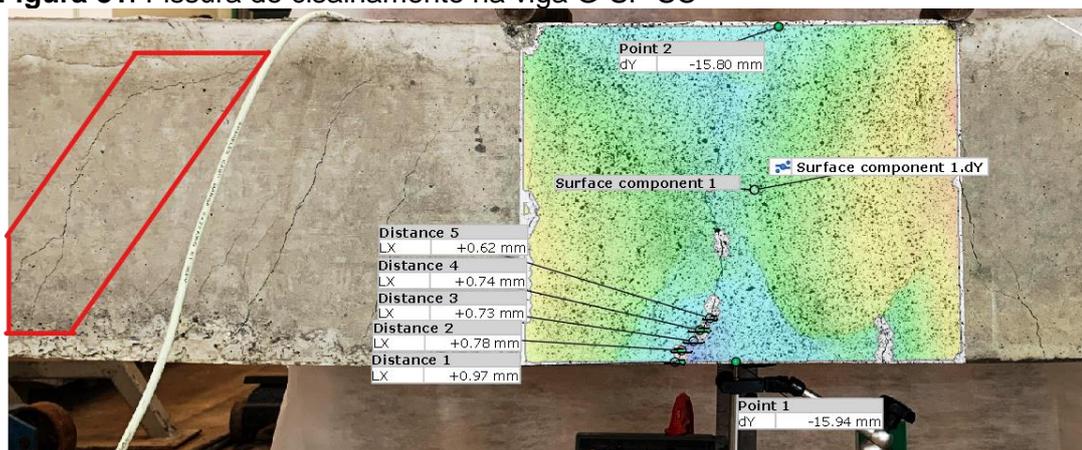
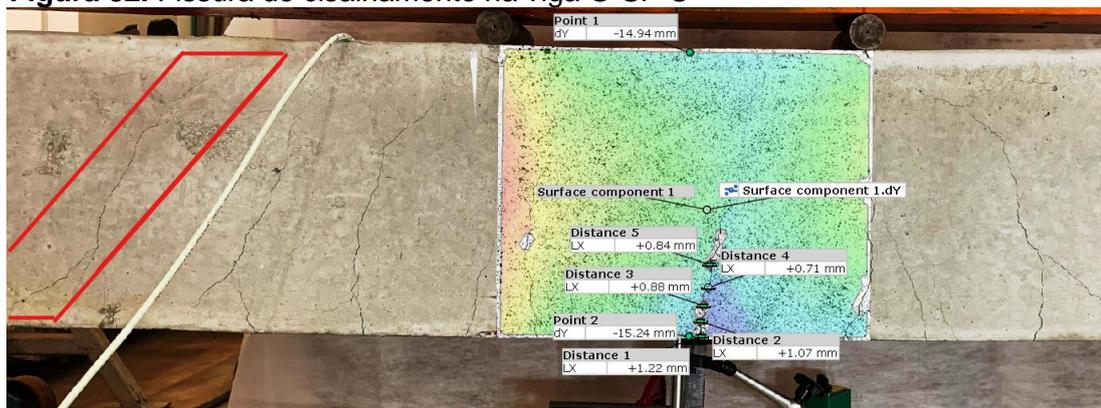


Figura 82. Fissura de cisalhamento na viga G-SF-C

Quando a carga atinge valores superiores a 80 kN e 90 kN nas vigas G-SF-SC e G-SF-C, respectivamente, a abertura das fissuras de cisalhamento aumenta progressivamente até a ruptura das vigas. Ao longo do ensaio, com o aumento da abertura da fissura de cisalhamento as fissuras na região de flexão diminuíram a velocidade de abertura.

5. CONCLUSÃO

As barras de polímeros reforçadas com fibras vêm sendo utilizadas mundialmente com o intuito de aumentar a durabilidade de estruturas de concreto, por seu comportamento não eletromagnético entre outras aplicações vantajosas. Também apresentam valores superiores de resistência à tração e menor peso específico que as barras de aço.

Esse trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico de vigas de concreto armado com barras de Polímero Reforçado com Fibras de Vidro (GFRP) submetidas a flexão com adição 1 % de fibras de polipropileno descontínuas, em volume de concreto, na perspectiva de melhorar o comportamento pós fissuração das vigas. Também avaliou se o incremento da armadura de confinamento no vão central das vigas, confere ao elemento estrutural um comportamento pseudo-ductil, para que a ruptura não ocorra de maneira abrupta.

Para tanto, o programa experimental foi dividido em duas etapas: caracterização dos materiais e ensaios de flexão a quatro pontos em vigas de concreto armado com barras de GFRP.

Para a caracterização dos materiais foram realizados ensaios de: resistência à tração, módulo de elasticidade e arrancamento nas barras de GFRP; e ensaio de resistência à tração na flexão do concreto com fibras de polipropileno.

- *Ensaio de resistência à tração das barras de GFRP.*

Os resultados mostraram que o aumento do diâmetro influenciou no comportamento à tração das barras de GFRP. Foi possível notar que a resistência diminuiu com o aumento do diâmetro. Esse fenômeno é descrito na literatura como efeito de *shear lag*, onde as fibras externas absorvem maiores tensões que as fibras mais internas. As resistências à tração obtida para todos os diâmetros ensaiados foram superiores ao recomendado pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), acima dos 800 MPa.

- *Módulo de Elasticidade das barras de GFRP.*

O módulo de elasticidade das barras apresentou comportamento semelhante aos resultados de resistência à tração. Com o aumento do diâmetro das barras

observa-se a redução no módulo de elasticidade do material. Todos os diâmetros ensaiados apresentaram módulo de elasticidade superior a 50 GPa, mínimo recomendado pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

- *Ensaio de arrancamento.*

Apenas o diâmetro de 10 mm foi analisado, por ser o diâmetro correspondente a barra longitudinal utilizada como armadura das vigas ensaiadas à flexão. A tensão de aderência média foi superior aos requisitos mínimos da Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) e pela ASTM D7957/D9757M-17, sendo superior a 12 MPa e 7,6 MPa, respectivamente.

- *Ensaio de Resistência à tração na flexão*

A presença das fibras no concreto conferiu resistências residuais aos corpos de prova ensaiados. Após a fissuração do concreto, as tensões não atingiram valores superiores ao limite de proporcionalidade, caracterizando um comportamento de *deflection softening*. Os resultados mostram que a dispersão não homogênea das fibras ao longo do corpo de prova influência nas resistências residuais.

- *Ensaio de flexão a quatro pontos.*

Nos ensaios de flexão a quatro pontos foram avaliados: o modo de ruptura das vigas, a capacidade de carga, deformações verticais e abertura de fissuras e deformação da armadura longitudinal.

As vigas de concreto armado com barras de GFRP apresentaram comportamento bilinear para a carga versus deslocamento vertical. No primeiro estágio a resistência aos esforços é governada pelo concreto, após a fissuração inicia-se o segundo estágio, no qual a armadura de tração resiste aos esforços solicitantes.

- ◊ *Modo de falha.*

Todas as vigas apresentaram modo de falha por esmagamento do concreto. Nas vigas sem adição de fibras (G-SF-SC e G-SF-C), fissuras de cisalhamento se desenvolveram com o aumento da carga de ensaio até a ruptura das vigas.

◊ *Capacidade de carga.*

Os momentos resistentes experimentais foram superiores aos momentos resistentes obtidos pelos dimensionamentos. Observa-se que a adição de 1% de macrofibras e a armadura de confinamento contribuiu para o aumento da capacidade de carga. E a ação da adição de fibras e da armadura de confinamento, de forma separada, garantiu acréscimo de ductilidade, com relação a viga G-SF-SC. Contudo, não foi observado ganho de rigidez de deslocamento significativo entre as vigas ensaiadas em comparação a viga G-SF-SC

◊ *Deslocamentos verticais.*

A análise dos deslocamentos verticais e abertura de fissuras foi realizada considerando o comportamento das vigas até atingirem as cargas de serviço, representada neste trabalho, como sendo 40% da carga última estimada nos dimensionamentos.

A ação conjunta da adição de 1% de macrofibra de polipropileno ao concreto com a armadura de confinamento contribuiu para a redução dos deslocamentos verticais em serviço, com relação a viga G-SF-SC

Para os limites da Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), os deslocamentos verticais obtidos foram acima do recomendado. Quando comparado os deslocamentos previstos por norma e os deslocamentos verticais, observa-se que as normas apresentam valores subestimados para os deslocamentos.

Também foi realizada a comparação com entre as deformações verticais medidas pelos transdutores LVDT e a correlação de imagem digital (DIC). Os resultados obtidos por meio dos dois métodos apresentaram respostas semelhantes.

◊ *Abertura de fissuras.*

A abertura de fissura das vigas ensaiadas foi realizada pelo uso da Correlação de Imagens Digital (DIC). Em todos os casos foi medido a maior fissura aparente na região entre a aplicação de carga.

Apenas as vigas com adição de fibras (G-F-SC e G-F-C) apresentaram abertura de fissuras dentro dos limites estabelecidos pela ACI 440.1R-15 e Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021). A adição de 1% de macrofibras de

polipropileno em conjunto com a armadura de confinamento contribuiu para que a viga G-F-C apresentasse a menor abertura de fissura até a carga de serviço. Com o aumento dos carregamentos, as vigas sem adição de fibras apresentaram fissuras de cisalhamento que influenciaram na abertura das fissuras no vão central, reduzindo a velocidade das aberturas de flexão.

◇ *Deformação da armadura longitudinal.*

As vigas com a adição de fibras (G-F-SC e G-F-C) apresentam deformações específicas menores com relação as vigas sem adição de fibras, ao longo de todo o ensaio.

Na comparação entre as vigas com e sem a presença da armadura de confinamento, nota-se que a armadura de confinamento reduziu as deformações finais das armaduras longitudinais.

Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar ensaios de flexão a quatro pontos em vigas armadas com GFRP com adição de fibras que apresentem comportamento de *deflection hardening*.
- Realizar ensaios em vigas armadas com GFRP com armadura longitudinal híbrida (aço e GFRP), para redução dos deslocamentos verticais e incremento de ductilidade.
- Avaliar o comportamento do concreto com fibras à compressão, tendo em vista que a ruptura das vigas deve ocorrer por esmagamento do concreto.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELKARIM, O. I. et al. Flexural strength and serviceability evaluation of concrete beams reinforced with deformed GFRP bars. **Engineering Structures**, v. 186, n. May 2018, p. 282–296, 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE Committee 318. Building Code Requirements or Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14). Farmington Hills, MI (2014).

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE 440.1R. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars (ACI 440.1R-15). v. 22.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D7205/D7205M: Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D7957/D7957M: Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D7913/D7913M Standard Test Method for Bond Strength of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Bars to Concrete by Pullout Testing, 2020

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 16935: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras — Procedimento, 2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 16889: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, 2020.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7211 – Agregados para Concreto – Especificação, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 8522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água, 2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR12142: Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos, 2010

ATTIA, K. et al. Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips reinforced with BFRP and GFRP bars. **Composite Structures**, v. 211, n. December 2018, p. 1–12, 2019.

BAŠA, N.; ULIČEVIĆ, M.; ZEJAK, R. (2018): Experimental Research of Continuous Concrete Beams with GFRP Reinforcement. In: *Advances in Civil Engineering*, v. 2018 (2018), pp. 1-16.

BENMOKRANE, B. et al. Characterization and Comparative Durability Study of Glass/Vinylester, Basalt/Vinylester, and Basalt/Epoxy FRP Bars. **Journal of Composites for Construction**, v. 19, n. 6, p. 04015008, 2015.

BENMOKRANE, B. Recent Developments of FRP Bars as Internal Reinforcement in Concrete Structures & Field Applications. **International Conference On Sustainable Construction Materials And Technologies**. Las Vegas, p. 1-10. 7 nov. 2016.

BENMOKRANE, B. et al. Physical, mechanical, and durability characteristics of newly developed thermoplastic GFRP bars for reinforcing concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 276, p. 122200, 2021.

BENMOKRANE, B. et al. Effects of Diameter on the Durability of Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars Conditioned in Alkaline Solution. *Journal of Composites for Construction*, v. 21, n. 5, p. 04017040, 2017

BISCHOFF, P. Reevaluation of Deflection Prediction for Concrete Beams Reinforced with Steel and Fiber-Reinforced Polymer Bars. *Journal of Structural Engineering*, v. 131, n. 5, Maio/2005, p. 752-767.

BRANDT, A. M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. **Composite Structures**, v. 86, n. 1–3, p. 3–9, nov. 2008.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION - CSA S807: Specification for fibre-reinforced polymers, 2019.

CHELLAPANDIAN, M.; MANI, A.; SURIYA PRAKASH, S. Effect of macro-synthetic structural fibers on the flexural behavior of concrete beams reinforced with different ratios of GFRP bars. **Composite Structures**, v. 254, n. August, p. 112790, 2020.

COUTO, I. A. Análise teórica e experimental do comportamento da aderência entre o concreto e barras de fibra de vidro impregnada por polímero. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2007.

CUNHA, D. R. DA. **Estudo da aderência de barras poliméricas reforçadas com fibras de vidro (GFRP) ao concreto.** [s.l.] Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2019.

DELALIBERA, R. G.; GIONGO, J. S. Theoretical and numerical analysis of reinforced concrete beams with confinement reinforcement. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 1, n. 1, p. 17–30, 2008.

DI PRISCO, M.; PLIZZARI, G.; VANDEWALLE, L. **Fibre reinforced concrete: New design perspectives.** Materials and Structures/Materiaux et Constructions. **Anais...**nov. 2009

DOO-YEOL YOO A; NEMKUMAR BANTHIA; YOUNG-SOO YOON. Flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars. **Engineering Structures**, v. 111, p. 246–262, 2016.

EL-HASSAN, H. et al. Durability of glass fiber-reinforced polymer bars conditioned in moist seawater-contaminated concrete under sustained load. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 1–13, 2018.

EL-MOGY, M.; EL-RAGABY, A.; EL-SALAKAWY, E. Effect of Transverse Reinforcement on the Flexural Behavior of Continuous Concrete Beams Reinforced with FRP. **Journal of Composites for Construction**, v. 15, n. 5, p. 672–681, 2011.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). **FRP reinforcement in RC structures Bulletin 40.** Lausanne, Switzerland: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.fib-international.org/publications/fib-bulletins/frp-reinforcement-in-rc-structures-115-detail.html>>.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. fib (CEBFIP) Model Code for Concrete Structures 2010. Lausanne: Ernst & Sohn, 2013.

FIGUEIREDO, A. D. DE. Concreto com fibras. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, n. January 2011, p. 1328–1366, 2011.

FIORE, V.; VALENZA, A. **Epoxy resins as a matrix material in advanced fiber-reinforced polymer (FRP) composites.** [s.l: s.n.].

GOLDSTON, M.; REMENNIKOV, A.; SHEIKH, M. N. Experimental investigation of the behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars under static and impact loading. **Engineering Structures**, v. 113, p. 220–232, 2016.

HAJILOO, H.; GREEN, M. F. Bond Strength of GFRP Reinforcing Bars at High Temperatures with Implications for Performance in Fire. **Journal of Composites for Construction**, v. 22, n. 6, 2018.

ISIS, Canada. Design 3: Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers. Canadá, 2007.

ISSA, M. S.; METWALLY, I. M.; ELZEINY, S. M. Influence of fibers on flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with GFRP rebars. **Engineering Structures**, v. 33, n. 5, p. 1754–1763, 2011.

JUNAID, M. T. et al. Experimental study on the effect of matrix on the flexural behavior of beams reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) bars. **Composite Structures**, v. 222, n. November 2018, p. 110930, 2019.

LIU, X. et al. Flexural cracks in steel fiber-reinforced lightweight aggregate concrete beams reinforced with FRP bars. **Composite Structures**, v. 253, n. June, p. 112752, 2020.

LIU, X.; SUN, Y.; WU, T. Flexural capacity and deflection of fiber-reinforced lightweight aggregate concrete beams reinforced with GFRP bars. **Sensors (Switzerland)**, v. 19, n. 4, 2019

MARANAN, G. B. et al. Flexural behavior of geopolymer-concrete beams longitudinally reinforced with GFRP and steel hybrid reinforcements. **Engineering Structures**, v. 182, n. December 2018, p. 141–152, 2019.

MATOS, B. et al. Structural response of hyperstatic concrete beams reinforced with GFRP bars: Effect of increasing concrete confinement. **Composite Structures**, v. 94, n. 3, p. 1200–1210, 2012.

MAZZÚ, A. D. E. **Estudo sobre a substituição de armadura metálica por barras de grfp em vigas de concreto armadas à flexão quando submetidas ao ataque acelerado de ions cloreto.** [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2020.

NANNI, A.; DE LUCA, A.; JAWAHERI ZADEH, H. **Reinforced Concrete with FRP Bars.** Broken Sound Parkway NW, Suite 30: CRC Press, 2014.

PORTNOV, G.; BAKIS, C. E. Analysis of stress concentration during tension of round pultruded composite rods. **Composite Structures**, v. 83, n. 1, p. 100–109, 2008.

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

REICHENBACH, S. et al. A review on embedded fibre-reinforced polymer reinforcement in structural concrete in Europe. **Construction and Building Materials**, v. 307, 2021.

RESENDE, T. L. DE. **Contribuição dos mecanismos resistentes à força cortante em vigas de concreto armado sem e com fibras de aço.** [s.l.] PUC-Rio, 2020.

RENIĆ, T.; KIŠIČEK, T. **Ductility of concrete beams reinforced with FRP rebars**

Buildings, 2021.

SÁ, F. R. G. DE. Influência da adição de fibras de polipropileno no comportamento de elementos estruturais de concreto armado com barras de GFRP. [s.l.] Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2018.

SUN, Q. et al. Flexural behavior of PVA-FRC GFRP reinforced concrete beams. **Polymer Composites**, v. 42, n. 7, p. 3331–3348, 2021.

TAVARES, D. H. **Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de GFRP**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2006.

VAKILI, S. E.; HOMAMI, P.; ESFAHANI, M. R. Flexural Behavior of Lightweight Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars and Effects of the Added Micro and Macro Fiber. **Civil Engineering Infrastructures Journal-Ceij**, v. 52, n. 2, p. 349–363, 2019.

WU, T. et al. Flexural Behavior of Steel Fiber–Reinforced Lightweight Aggregate Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber–Reinforced Polymer Bars. **Journal of Composites for Construction**, v. 23, n. 2, p. 04018081, 2019.

YANG, J. M. et al. Effect of steel and synthetic fibers on flexural behavior of high-strength concrete beams reinforced with FRP bars. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 3, p. 1077–1086, 2012.

YOU, Y. J. et al. Modification of rule of mixtures for tensile strength estimation of circular GFRP rebars. **Polymers**, v. 9, n. 12, 2017.

YOU, Y. J. et al. Tensile Strength of GFRP Reinforcing Bars with Hollow Section. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2015, 2015

APÊNDICE A – Pré-dimensionamento para determinação da armadura de flexão e cisalhamento.

Esta seção apresenta o dimensionamento realizado para a determinação da armadura longitudinal adotada nas vigas armadas com GFRP, por meio da Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) e ACI 440.1R-15. Também apresenta o dimensionamento da armadura transversal de cisalhamento, considerando as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Dimensionamento pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

Para o dimensionamento, inicialmente, foram adotados os seguintes dados apresentados na Tabela A1.

Tabela A1. Dados dos materiais para o dimensionamento.

Propriedades	
A_f (cm ²)	3,46
h (cm)	30
b (cm)	15
d (cm)	25,32
f_{ck} (MPa)	35
f_{fd} (MPa)	952,15
E_f (MPa)	51713,44
ϵ_{cu} (Prática)	0,0035
ϵ_{cu} (ACI)	0,003
E_{ci} (MPa)	33256
E_{cs} (MPa)	30119

Para o dimensionamento foi considerado uma viga com 4 barras longitudinais de \varnothing 10 mm. A relação entre a taxa de armadura (ρ_f) e a taxa de armadura balanceada (ρ_{fb}) esperada era superior a $\rho_f > 1,4\rho_{fb}$, para que a ruptura do elemento ocorresse por esmagamento do concreto.

Determinação das taxas de armadura

$$\rho_f = \frac{3,46}{15 \times 25,32} = 0,00912$$

$$\rho_{fb} = 0,85 * 0,80 * \frac{35,00}{997,11} * \frac{51713 * 0,003}{51713 * 0,003 + 997,11} = 0,0037$$

$\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} = 2,49$, sendo assim, como esperado o modo de falha é governado pelo esmagamento do concreto.

Determinação da linha neutra e do momento nominal.

$$x = \frac{1}{2 \cdot 150} \frac{0,0035 \cdot 346,36 \cdot 51713,44}{0,8 \cdot 0,85 \cdot 35} \left(-1 + \sqrt{1 + 4 \frac{0,8 \cdot 0,85 \cdot 35}{0,0035 \cdot 346,36 \cdot 51713,44} 150 * 253,2} \right)$$

$$= 58,48 \text{ mm}$$

$$\sigma_{fd} = \frac{58,48 * 150 * 0,85 * 0,8 * 35}{346,36} = 602,72 \text{ MPa}$$

$$M_n = 602,72 * 346,36 \left(150 - \frac{0,8 * 58,48}{2} \right) \div 10^6 = 47,97 \text{ kNm}$$

Dimensionamento pela ACI 440.1R-15

Assim como realizado no dimensionamento pela Prática Recomendada, o dimensionamento pela ACI 440.1R-15 adotou os dados apresentados anteriormente na Tabela A1.

Também foi considerado uma viga com 4 barras longitudinais de $\varnothing 10$ mm. A relação entre a taxa de armadura (ρ_f) e a taxa de armadura balanceada (ρ_{fb}) esperada era superior a $\rho_f > 1,4\rho_{fb}$, para que a ruptura do elemento ocorresse por esmagamento do concreto.

Determinação das taxas de armadura.

$$\rho_f = \frac{3,46}{15 \times 25,32} = 0,00912$$

$$\rho_{fb} = 0,85 * 0,748 * \frac{35}{997,11} * \frac{51713 * 0,003}{51713 * 0,003 + 997,11} = 0,0032$$

$\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} = 2,84$, sendo assim, como esperado o modo de falha é governado pelo esmagamento do concreto.

Determinação da tensão de tração:

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(51713 \cdot 0,003)^2}{4} + \frac{0,85 \cdot 0,748 \cdot 35}{0,00912} \cdot 51713 \cdot 0,003 - 0,5 \cdot 51713 \cdot 0,003} \right) =$$

$$563,44 \text{ MPa} < 997,11 \text{ MPa} \therefore \text{verificado}$$

Por meio da tensão de tração é possível determinar o momento resistente nominal:

$$\begin{aligned} M_n &= 0,00912 \cdot 563,44 \cdot \left(1 - 0,59 \frac{0,00912 \cdot 564,44}{42,27} \right) 150 \cdot 253,2 \\ &= 451331102,25 \text{ Nmm} = 45,13 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Dimensionamento para solicitações Tangenciais e determinação da armadura transversal – NBR 6118 (ABNT, 2014)

Para o dimensionamento ao cisalhamento, foram consideradas as hipóteses:

- Modelo de treliça com bielas de compressão inclinadas de $\theta = 45$ graus;
- Contribuição do concreto apenas na zona comprimida;
- Estribos orientados perpendicularmente ao eixo da viga.

O cálculo consiste nas seguintes etapas:

1) Verificação da falha por compressão diagonal:

$$V_{Rd2} \geq V_{sd}$$

$$V_{sd} = 50$$

$$\alpha_{v2} = \left(1 - \frac{35}{250} \right) = 0,86$$

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot 0,86 \cdot \frac{35}{14} \cdot 15 \cdot 25,34 = 308,66$$

$$V_{Rd2} \geq V_{sd} = 308,66 \text{ kN} > 50 \text{ kN} \therefore \text{Verificado}$$

2) Verificação da ruptura por tração

$$V_{Rd3} = V_c + V_f$$

$$V_c = 0,6f_{ctd}bx_{II}$$

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot 35^{\frac{2}{3}} = 3,21 \text{ MPa}$$

$$f_{ck,inf} = 0,7 \cdot 3,21 = 2,25 \text{ MPa};$$

$$f_{ctd} = 2,25 \text{ MPa } 0,225 \text{ MPa}$$

$$V_c = 0,6 \cdot 0,225 \cdot 15 \cdot 25,32 = 51,20 \text{ kN}$$

$$V_{sw} = 50 - 51,204 = -1,204 \text{ kN}$$

$$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right) = \frac{-1,204}{0,9 \cdot 25,32 \cdot 50} = -0,0011 \text{ cm}^2/\text{cm}$$

$$\left(\frac{A_{swmin}}{s}\right) = \frac{0,2 \cdot 0,321}{50} \cdot 15 = 0,0193 \text{ cm}^2/\text{cm}$$

A armadura mínima foi adotada como taxa de armadura transversal. Sendo adotado estribos com Ø6,35 mm de diâmetro.

3) Espaçamento entre estribos

O espaçamento máximo entre os estribos está limitado a duas condições $V_{sd} > 0,67 V_{Rd2} = 0,3 \cdot d = 0,3 \cdot 25,32 = 7,59 \text{ cm}$ e $V_{sd} < 0,67 V_{Rd2} = 0,6 \cdot 25,32 = 15,19 \text{ cm}$. Como $V_{sd} = 50 < 0,67 V_{Rd2} = 308,66$, o espaçamento máximo é de 15,19 cm.

Foi adotado como armadura transversal estribos de Ø6,35 mm de aço espaçados a cada 13 cm.

APÊNDICE B - Dimensionamento da viga de concreto sem fibra armada com GFRP – ACI 440.1R-15

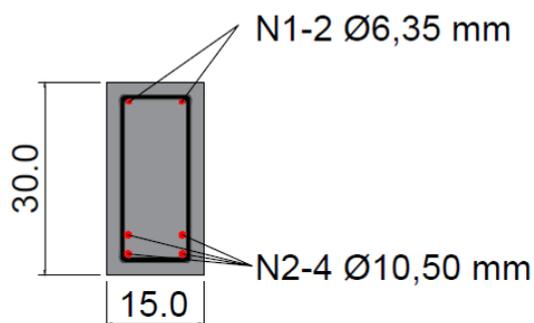
Esta seção apresenta o dimensionamento da viga de concreto sem adição de fibras e sem armadura de confinamento. A viga possui seção transversal de 15 x 30 cm e altura útil $d = 25,32$ cm. A Tabela B1 apresenta os dados adotados no dimensionamento à flexão

Tabela B1. Dados para o dimensionamento à flexão

Dados dos materiais
$f_{fm} = 997,11$ MPa.
$A_f = 3,46$ cm ²
$f_{cm} = 42,27$ MPa
$\varepsilon_{cu} = 0,003$
$\varnothing_l = 10,5$ mm
$\varnothing_t = 6,35$ mm

A Figura B1 apresenta a seção transversal das vigas dimensionadas.

Figura B1. Seção transversal da viga.



Dimensionamento à flexão

Determinação da taxa de armadura e taxa de armadura balanceada

$$\rho_f = \frac{3,46}{15 \times 25,32} = 0,00912$$

$$\rho_{fb} = 0,85 * 0,748 * \frac{42,27}{997,11} * \frac{51713 * 0,003}{51713 * 0,003 + 997,11} = 0,0036$$

$\rho_f > \rho_{fb}$, o modo de falha é governado pelo esmagamento do concreto.

Determinação da tensão de tração:

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(51713 \cdot 0,003)^2}{4} + \frac{0,85 \cdot 0,748 \cdot 42,27}{0,00912} \cdot 51713 \cdot 0,003 - 0,5 \cdot 51713 \cdot 0,003} \right) =$$

$$603,06 \text{ MPa} < 997,11 \text{ MPa} \therefore \text{verificado}$$

Por meio da tensão de tração é possível determinar o momento resistente nominal:

$$\begin{aligned} M_n &= 0,00912 \cdot 603,06 \cdot \left(1 - 0,59 \frac{0,00912 \cdot 603,06}{42,27} \right) 150 \cdot 253,2 \\ &= 48827694,16 \text{ Nmm} = 48,83 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Estado limite de Serviço (ELS).

a) *Deformação Vertical.*

$$I_{cr} = \frac{150 \cdot 253,2^3}{3} + 1,687 \cdot 346,361 \cdot 253,2^2 \cdot (1 - 0,16)^2 = 2,98 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$k = \sqrt{2 \cdot 0,00912 \cdot 0,1687 + (0,00912 \cdot 0,1687)^2} - 0,00912 \cdot 0,1687 = 0,16$$

$$\gamma = 1,72 - 0,72 \cdot \left(\frac{9,07 \cdot 10^6}{1,95 \cdot 10^7} \right) = 1,39$$

O momento de fissuração corresponde ao especificado na ACI 318 e pode ser calculado por:

$$M_{cr} = \frac{0,62 \cdot 1\sqrt{42,27} \cdot 3,38 \cdot 10^8}{150} = 9,07 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

A inércia equivalente é dada por:

$$I_e = \frac{2,98 \cdot 10^7}{1 - 1,39 \cdot \left(\frac{9,07 \cdot 10^6}{1,95 \cdot 10^7} \right)^2 \cdot \left[1 - \frac{2,98 \cdot 10^7}{3,38 \cdot 10^8} \right]} = 4,09 \cdot 10^7$$

APÊNDICE C - Dimensionamento da viga de concreto sem fibra armada com GFRP – Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021)

Esta seção apresenta o dimensionamento da viga de concreto sem adição de fibras e sem armadura de confinamento. A viga possui seção transversal de 15 x 30 cm e altura útil $d = 25,32$ cm. A Tabela C1 apresenta os dados adotados no dimensionamento à flexão

Tabela C1. Dados para o dimensionamento à flexão

Dados dos materiais
$f_{fm} = 997,11$ MPa.
$A_f = 3,46$ cm ²
$f_{cm} = 42,27$ MPa
$\varepsilon_{cu} = 0,0035$
$\varnothing_l = 10,5$ mm
$\varnothing_t = 6,35$ mm

Dimensionamento à flexão

Determinação da taxa de armadura e taxa de armadura balanceada

$$\rho_f = \frac{3,46}{15 \times 25,32} = 0,00912$$

$$\rho_{fb} = 0,85 * 0,80 * \frac{42,27}{997,11} * \frac{51713 * 0,003}{51713 * 0,003 + 997,11} = 0,0044$$

$\rho_f > \rho_{fb}$, o modo de falha é governado pelo esmagamento do concreto.

Determinação da linha neutra e do momento nominal.

$$x = \frac{1}{2 \cdot 150} \frac{0,0035 \cdot 346,36 \cdot 51713,44}{0,8 \cdot 0,85 \cdot 42,27} \left(-1 + \sqrt{1 + 4 \frac{0,8 \cdot 0,85 \cdot 42,27}{0,0035 \cdot 346,36 \cdot 51713,44} 150 * 253,2} \right)$$

$$= 53,84 \text{ mm}$$

$$\sigma_{fd} = \frac{53,84 * 150 * 0,85 * 0,8 * 42,27}{346,36} = 670,20 \text{ MPa}$$

$$M_n = 670,20 * 346,36 \left(150 - \frac{0,8 * 53,84}{2} \right) \div 10^6 = 53,78 \text{ kNm}$$

Verificações no Estado Limite de Serviço.

No dimensionamento de estruturas armadas com FRP duas verificações de serviço devem ser realizadas: deformações excessivas e abertura de fissuras.

As verificações no ELS foram realizadas considerando a carga de serviço adotada como 40% da carga nominal do dimensionamento.

a) Deformações

Dados para a verificação no ELS

Tabela C2. Dados para a verificação das deformações.

Propriedades
$f_{ctm} = 0,396 \text{ kN.cm}^2$
$I_c = 33750 \text{ cm}^4$
$Y_t = 15 \text{ cm}$
$\beta_d = 0,75$
$M_a = 2151 \text{ kN.cm}$ (40% do momento nominal M_n)
$n = \alpha e = 1,69$
$E_{cs} = 3065 \text{ kN/cm}^2$

Determinação do M_r , x_{II} , e I_2 .

$$M_R = \frac{1,5 * 0,396 * 33750}{15} = 1337,18 \text{ kNcm}$$

$$x_{II} = \frac{1,69 * 3,49}{15} * \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{1,69 * 0,00912}} \right) = 4,069 \text{ cm}$$

$$I_2 = \frac{15 * 4,069^3}{3} + 1,69 * 3,49 * (25,32 - 4,069)^2 = 2975,95 \text{ cm}^4$$

A rigidez equivalente do elemento pode ser calculada por meio:

$$\begin{aligned} (EI)_{eq,t0} &= 3065 \left\{ \left(\frac{1337,18}{2151} \right)^3 * 0,75 * 33750 + \left[1 - \left(\frac{1337,18}{2151} \right)^3 \right] 2975,95 \right\} \\ &= 2556,71 * 10^4 \text{ kNcm}^2 \end{aligned}$$

Os deslocamentos verticais limites são iguais aos prescritos na NBR 6118 (ABNT, 2014), levando em consideração as características do FRP em serviço.

$$f = \frac{28 * 76}{24 * 2556,71 * 10^4} (3 * 190^2 - 4 * 76^2) = 0,298 \text{ cm} = 2,98 \text{ mm}$$

a) *Abertura de Fissuras.*

A Tabela C3 apresenta os dados para o cálculo da abertura de fissura para a carga de serviço.

Tabela C3. Dados para a verificação da abertura de fissuras.

Propriedades	
C = 2 cm	$f_{ctm} = 0,396 \text{ kN/cm}^2$
$f_{bk} = 1,15 * 0,277 = 0,319$	$E_{cs} = 3065 \text{ kN/cm}^2$
$h_{ef} = 2,5d'$ ou $(h-x_{II})/3$ (menor valor)	$M_{nserviço} = 21510 \text{ kNcm}$
$h_{ef} = 8,64 \text{ cm}$	$X_{II} = 4,069 \text{ cm}$
$f_{ctk} = 0,277 \text{ kN/cm}^2$	

Determinação da taxa de armadura efetiva e tensão de aderência.

$$\rho_{ef} \frac{3,46}{15 * 8,64} = 0,027$$

$$\tau b = 1,3 * 0,319 = 0,4147 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_f \frac{21510}{\left(15 - \frac{4,069}{3}\right) * 3,46} = 25,92 \text{ kN/cm}^2$$

A abertura de fissuras é calculada por meio da equação que segue o modelo do Fib Model Code (2010)

$$w_k = \frac{2}{3065} \left[1 * 2 + \frac{1}{4} * \frac{0,396}{0,415} * \frac{1,05}{0,027} \right] \left[25,92 * -0,6 * \frac{0,396}{0,027} \left(1 + \frac{5171}{3065} * 0,027 \right) \right]$$

$$w_k = 0,073 \text{ cm} = 0,73 \text{ mm}$$

APÊNDICE D - Dimensionamento da viga de concreto com fibra armada com GFRP – Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021)

Esta seção apresenta o dimensionamento da viga de concreto sem adição de fibras e sem armadura de confinamento. A viga possui seção transversal de 15 x 30 cm e altura útil $d = 25,32$ cm. Os dados são apresentados na Tabela D1.

Tabela D1. Dados dos materiais para o dimensionamento.

Dados dos materiais
$f_{fm} = 997,11$ MPa.
$A_f = 3,46$ cm ²
$f_{cm} = 34,16$ MPa
$\varepsilon_{cu} = 0,0035$
$\varnothing_l = 10,5$ mm
$\varnothing_t = 6,35$ mm

Dimensionamento à flexão

Determinação da taxa de armadura e taxa de armadura balanceada

$$\rho_f = \frac{3,46}{15 \times 25,32} = 0,00912$$

$$\rho_{fb} = 0,85 * 0,80 * \frac{34,16}{997,11} * \frac{51713 * 0,003}{51713 * 0,003 + 997,11} = 0,0036$$

$\rho_f > \rho_{fb}$, o modo de falha é governado pelo esmagamento do concreto.

Determinação da linha neutra e do momento nominal.

$$x = \frac{1}{2 \cdot 150} \frac{0,0035 \cdot 346,36 \cdot 51713,44}{0,8 \cdot 0,85 \cdot 34,16} \left(-1 + \sqrt{1 + 4 \frac{0,8 \cdot 0,85 \cdot 34,16}{0,0035 \cdot 346,36 \cdot 51713,44} 150 * 253,2} \right)$$

$$= 59,10 \text{ mm}$$

$$\sigma_{fd} = \frac{59,10 * 150 * 0,85 * 0,8 * 34,16}{346,36} = 594,49 \text{ MPa}$$

$$M_n = 594,49 * 346,36 \left(150 - \frac{0,8 * 59,10}{2} \right) \div 10^6 = 47,27 \text{ kNm}$$

Verificações no Estado Limite de Serviço.

No dimensionamento de estruturas armadas com FRP duas verificações de serviço devem ser realizadas: deformações excessivas e abertura de fissuras.

As verificações no ELS foram realizadas considerando a carga de serviço adotada como 40% da carga nominal do dimensionamento.

b) Deformações

A Tabela D2 apresenta os dados utilizados para a verificação no ELS.

Tabela D2. Dados para a verificação do ELS.

Propriedades
$f_{ctm} = 0,358 \text{ kN.cm}^2$
$I_c = 33750 \text{ cm}^4$
$Y_t = 15 \text{ cm}$
$\beta_d = 0,75$
$M_a = 1891 \text{ kN.cm}$ (40% do momento nominal M_n)
$n = \alpha e = 1,96$
$E_{cs} = 2632 \text{ kN/cm}^2$

Determinação do M_r , x_{II} , e I_2 .

$$M_R = \frac{1,5 * 0,358 * 33750}{15} = 1337,18 \text{ kNcm}$$

$$x_{II} = \frac{1,96 * 3,49}{15} * \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{1,96 * 0,00912}} \right) = 4,36 \text{ cm}$$

$$I_2 = \frac{15 * 4,36^3}{3} + 1,96 * 3,49 * (25,32 - 4,36)^2 = 3403 \text{ cm}^4$$

A rigidez equivalente do elemento pode ser calculada por meio:

$$(EI)_{eq,t0} = 3065 \left\{ \left(\frac{1337,18}{1891} \right)^3 * 0,75 * 33750 + \left[1 - \left(\frac{1337,18}{1891} \right)^3 \right] 3403 \right\}$$

$$(EI)_{eq,t0} = 2896,2 * 10^4 \text{ kNcm}^2$$

Os deslocamentos verticais limites são iguais aos prescritos na NBR 6118 (ABNT, 2014), levando em consideração as características do FRP em serviço.

$$f = \frac{25 * 76}{24 * 2896,2 * 10^4} (3 * 190^2 - 4 * 76^2) = 0,28 \text{ cm} = 2,28 \text{ mm}$$

b) *Abertura de Fissuras.*

A tabela D3 apresenta os dados para o cálculo da abertura de fissura para a carga de serviço.

Tabela D3. Dados para verificação da abertura de fissuras.

Propriedades	
$C = 2 \text{ cm}$	$f_{ctm} = 0,358 \text{ kN/cm}^2$
$f_{bk} = 1,15 * 0,25 = 0,288$	$\phi = 1,05 \text{ cm}$
$h_{ef} = 2,5d'$ ou $(h-x_{II})/3$ (menor valor)	$E_{cs} = 2632,6 \text{ kN/cm}^2$
$h_{ef} = 8,54 \text{ cm}$	$M_{nserviço} = 18908 \text{ kNcm}$
$f_{ctk} = 0,25 \text{ kN/cm}^2$	$X_{II} = 4,069 \text{ cm}$

Determinação da taxa de armadura efetiva e tensão de aderência.

$$\rho_{ef} \frac{3,46}{15 * 8,64} = 0,027$$

$$\tau_b = 1,3 * 0,288 = 8,55 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_f \frac{21510}{\left(15 - \frac{4,069}{3}\right) * 3,46} = 25,92 \text{ kN/cm}^2$$

A abertura de fissuras é calculada por meio da equação que segue o modelo do Fib Model Code (2010)

$$w_k = \frac{2}{2632,6} \left[1 * 2 + \frac{1}{4} * \frac{(0,358 - 0,64 * 0,25)}{0,37} * \frac{1,05}{0,027} \right] * \left[25,92 * -0,6 * \frac{(0,358 - 0,64 * 0,25)0}{0,027} \left(1 + \frac{5171}{2632,6} * 0,027 \right) \right]$$

$$w_k = 0,037 \text{ cm} = 0,37 \text{ mm}$$