

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

MICHELE MIWA FUGIYAMA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO COM BARRAS POLIMÉRICAS
REFORÇADAS COM FIBRA DE BASALTO E FIBRAS
DESCONTÍNUAS**

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
MICHELE MIWA FUGIYAMA

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO COM BARRAS POLIMÉRICAS REFORÇADAS
COM FIBRA DE BASALTO E FIBRAS DESCONTÍNUAS

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

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

CAMPINAS

2022

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

624.183423 Fugiyama, Michele Miwa
F958e

Estudo do comportamento mecânico de vigas de concreto armado com barras poliméricas reforçadas com fibra de basalto e fibras descontínuas / Michele Miwa Fugiyama. - Campinas: PUC-Campinas, 2022.

108 f.: il.

Orientador: Nádia Cazarim da Silva Forti.

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.

Inclui bibliografia.

1. Vigas de concreto. 2. Fibras sintéticas. 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.

CDD - 23. ed. 624.183423

MICHELE MIWA FUGIYAMA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS
DE CONCRETO ARMADO COM BARRAS POLIMÉRICAS
REFORÇADAS COM FIBRA DE BASALTO E FIBRAS
DESCONTÍNUAS**

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

Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.

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

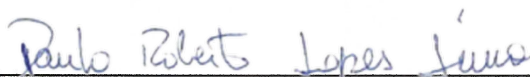
Dissertação defendida e aprovada em 27 de janeiro de 2022 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



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



Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima
Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Luiz e Mitiko, por proporcionarem a continuação dos meus estudos, por me apoiarem e por sempre me incentivarem a não desistir dos meus sonhos. Aos meus irmãos, Jacqueline e Michel, pelo companheirismo e pelo suporte.

À Prof^a. Dr^a. Nádia Cazarim da Silva Forti, orientadora do meu trabalho, pela confiança que me foi dada ao decorrer da pesquisa, por todo o incentivo e apoio prestados.

Aos meus amigos, Isabela Duarte, Jakeline Santos e Guilherme Sumitomo, pelos momentos de descontração, pelo ótimo trabalho em equipe no laboratório e por todo o companheirismo durante o Mestrado.

Ao Prof. Dr. Marco Antonio Carnio, pela orientação ao longo da pesquisa e pelo empréstimo de equipamentos para a realização dos ensaios.

À Haizer Building Solutions, pelo concedimento da bolsa de estudos e pelo fornecimento dos materiais para a realização dos procedimentos experimentais.

À Pontifícia Universidade Católica de Campinas, pelo concedimento de 50% de bolsa do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu*.

RESUMO

FUGIYAMA, M. M. Estudo do comportamento mecânico de vigas de concreto armado com barras poliméricas reforçadas com fibra de basalto e fibras descontínuas. 2022. 108 f. Dissertação, Programa de Pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2022.

Os materiais poliméricos reforçados com fibra (FRP) têm sido amplamente aplicado como elemento de reforço em estruturas de concreto. Polímeros reforçados com fibra de basalto (BFRP) destacam-se pela relação custo benefício, resistência em ambientes corrosivos e baixo peso específico. Também possuem baixa condutividade térmica, transparência eletromagnética, baixo impacto ambiental e a versatilidade com relação à geometria e às propriedades mecânicas. Apesar das vantagens, barras de BFRP apresentam comportamento frágil, com módulo de elasticidade e aderência com o concreto inferiores às das barras de aço. Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de vigas de concreto armado com barras de polímeros reforçados com fibra de basalto (BFRP), com adição de fibras sintéticas descontínuas e confinamento do concreto para melhorar a ductilidade, a rigidez e diminuir o tamanho das aberturas de fissuras. Para isso foram moldadas quatro vigas de concreto armado com barras de BFRP submetidas à flexão, sendo uma sem confinamento e sem adição de fibra, a segunda com confinamento e sem adição de fibra, a terceira com fibra e sem confinamento e, por fim, uma viga de concreto com adição de fibra e confinamento do concreto. Foi analisado a abertura de fissura por meio do software GOM Correlate e realizou-se uma análise teórica comparando os resultados experimentais com os valores determinados pela ACI 440.1R e Prática Recomendada IBRACON/ABECE. Como resultado dos ensaios experimentais, foi observado que tanto a adição de fibra quanto o confinamento do concreto contribuíram com um pequeno aumento da capacidade de carga e ductilidade. A junção da adição de fibra e do confinamento do concreto proporcionaram um aumento significativo na ductilidade e na capacidade de carga última, além de uma pequena contribuição na rigidez. A viga referência apresentou grandes deformações na armadura longitudinal, enquanto as vigas com intervenções mostraram armaduras com menor deformação de tração e rigidez semelhantes. Na carga última, a adição de fibra e o confinamento do concreto contribuíram para diminuir a propagação de fissura na viga, enquanto a fibra descontínua e o confinamento, de maneira isolada, influenciaram de modo similar na restrição de abertura de fissura. As análises teóricas pela ACI 440.1R-15 e pela Prática Recomendada (2021) subestimaram os valores de flecha de vigas de concreto armado com barras de BFRP. A previsão da abertura de fissura pela Prática Recomendada apresentou valores superiores ao resultado experimental, mantendo-se próximos.

Palavras-chave: Barras de BFRP, vigas de concreto armado, fibras sintéticas descontínuas.

ABSTRACT

FUGIYAMA, M. M. Mechanical behavior study of basalt fiber reinforced polymer bars in fiber reinforced concrete beam. 2022. 108 f. Dissertation, Post-graduation Program in Urban Infrastructure Systems, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2022.

Fiber reinforced polymeric materials (FRP) have been used as a reinforcement element in concrete structures. Basalt fiber reinforced polymers (BFRP) stand out for their cost-benefit ratio, resistance in corrosive environments and light weight. They also have low thermal conductivity, electromagnetic transparency, low environmental impact and versatility concerning geometry and mechanical properties. Despite the advantages, BFRP bars have a brittle behavior, elastic modulus and adherence to concrete lower than steel bars. This work aims to analyze the behavior of reinforced concrete beams with basalt fiber reinforced polymer bars (BFRP), with the addition of discontinuous synthetic fibers and concrete confinement to improve ductility, stiffness and reduce cracks width. For this, four reinforced concrete beams reinforced with BFRP bars were subjected to flexure, one without confinement and without addition of fiber, the second one with confinement and without addition of fiber, the third with fiber and without confinement and, fourth one with addition of fiber and concrete confinement. The crack width was analyzed using GOM Correlate software and a theoretical analysis was carried out comparing the experimental results with the values determined by the ACI 440.1R and Recommended Practice IBRACON / ABECE (2021). As a result of the experimental tests, it was observed that both the addition of fiber and the confinement of the concrete contributed with a small increase in load capacity and ductility. The combination of fiber addition and concrete confinement provided a significant increase in ductility and ultimate load capacity, in addition to a small contribution to stiffness. The reference beam showed increased strain in BFRP reinforcement, while the beams with interventions reinforcement had similar lower tensile strain and stiffness. In the ultimate load, the fiber addition and concrete confinement contributed to decrease the crack propagation, while a discontinuous fiber and the confinement, separately, were similarly influenced the crack opening constraint. Theoretical analyzes by ACI 440.1R-15 and by Recommended Practice underestimated the deflection values of reinforced concrete beams with BFRP bars. The prediction of crack opening by Recommended Practice values higher than the experimental result, yet remaining close.

Keywords: BFRP bars, reinforced concrete beam, synthetic fibers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Configuração das vigas: (a) seção transversal e (b) elevação.	21
Figura 2. Geometria e disposição da armadura das vigas ensaiadas.	23
Figura 3. Comparativo entre as vigas reforçadas com barras de aço e com polímeros reforçados com fibra de basalto.	24
Figura 4. Configuração e detalhamento das vigas ensaiadas.	25
Figura 5. Dimensões e detalhamento da armadura: (a) elevação e (b) seção transversal.....	27
Figura 6. Curva momento-flecha no meio do vão.....	28
Figura 7. Esquema de concentração de tensões para um concreto simples (a) e com reforço de fibras (b).	30
Figura 8. Mecanismos de falha em concreto reforçado com fibra.	31
Figura 9. Respostas de ensaio de flexão de vigas de concreto com fibra.	32
Figura 10. Contribuição da fibra no desempenho de tração/flexão, obtida do ensaio de flexão, mostrando comportamentos de softening e hardening.	33
Figura 11. Dimensões e detalhamento da armadura.....	35
Figura 12. Resultados de flecha (a) e abertura de fissura (b).	36
Figura 13. Detalhamento da armadura.....	38
Figura 14. Resultados (a) Carga x Flecha; (b) Carga x Abertura de fissura.	39
Figura 15. Detalhamento e seção transversal das vigas ensaiadas.	40
Figura 16. Gráfico de carga e deslocamento da série GG.	41
Figura 17 - Diagrama retangular aproximado para esmagamento do concreto	44
Figura 18 – Diagrama equivalente para ruptura da barra de FRP.....	45
Figura 19. Configurações na ruptura de vigas submetidas à flexão.	48
Figura 20. Área de concreto circundante efetiva para cálculo da taxa de armadura efetiva.....	50
Figura 21. Fluxograma do programa experimental.....	52
Figura 22. Configuração do corpo de prova do ensaio de resistência à tração.....	53
Figura 23. Aparato de madeira.	54
Figura 24. Gelo ao redor dos tubos.	54
Figura 25. Posicionamento do corpo de prova (a) e extensômetro utilizado (b).....	55
Figura 26. Materiais utilizados para a determinação da área efetiva.....	56
Figura 27. Configuração do corpo de prova do ensaio de arrancamento.....	58
Figura 28. Preparativos para o ensaio (a) e concretagem dos corpos de prova (b).	59

Figura 29. Posicionamento do corpo de prova.	59
Figura 30. Granulometria da areia.	61
Figura 31. Granulometria da brita.	62
Figura 32. Fibras de polipropileno.	63
Figura 33. Ensaio de tração na flexão.	66
Figura 34. Processo de cura das vigas.	67
Figura 35. Armadura das vigas sem confinamento (a) e com confinamento (b).....	68
Figura 36. Detalhamento da viga de concreto sem confinamento.	69
Figura 37. Detalhamento da viga de concreto com confinamento.	69
Figura 38. Seção transversal das vigas.	69
Figura 39. Esquema de ensaio.	70
Figura 40. Extensômetro na barra.	71
Figura 41. Posicionamento do leitor de deslocamento (LVDT) na viga.	72
Figura 42. Sistema de aquisição de dados.	72
Figura 43. Esquema de ensaio para a captação de imagens.	74
Figura 44. Gráfico de Tensão x Deformação específica das barras de BFRP.	75
Figura 45. Ruptura da barra de BFRP.	76
Figura 46. Abatimento de tronco de cone para o concreto sem adição de fibra (a) e com adição de fibra (b).	79
Figura 47- Diagrama tensão-CMOD para o ensaio de tração na flexão para concreto com fibra.	80
Figura 48. Distribuição das fibras.	81
Figura 49. Gráfico Carga x Flecha das vigas ensaiadas.	82
Figura 50. Modos de ruptura: (a) B-SF-SC; (b) B-SF-C; (c) B-F-SC; (d) B-F-C.	84
Figura 51. Detalhe da ruptura da barra.	85
Figura 52. Deformação da armadura longitudinal.	86
Figura 53. Comparação entre CID e experimental para B-SF-SC.	87
Figura 54. Comparação entre CID e experimental para B-SF-C.	87
Figura 55. Comparação entre CID e experimental para B-F-SC.	88
Figura 56. Comparação entre CID e experimental para B-F-C.	88
Figura 57. Leitura da abertura de fissura da viga B-SF-SC.	89
Figura 58. Leitura da abertura de fissura da viga B-SF-C.	89
Figura 59. Leitura da abertura de fissura da viga B-F-SC.	90
Figura 60. Leitura da abertura de fissura da viga B-F-C.	90

Figura 61. Gráfico Carga máxima versus Abertura de fissura.	91
Figura 62. Comparação entre o experimental e previsão de flecha.	92
Figura 63. Análise teórica da abertura de fissura.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades das matrizes termorrígidas.	17
Tabela 2. Propriedades da fibra de basalto: comparando com vidro e carbono.	20
Tabela 3. Resultado dos ensaios.	22
Tabela 4. Informações das vigas ensaiadas.	25
Tabela 5. Resultados do programa experimental.	26
Tabela 6. Momento experimental, relação entre Momento experimental e ACI e modo de ruptura.	29
Tabela 7. Detalhes dos modelos ensaiados.	35
Tabela 8. Detalhes das vigas ensaiadas.	37
Tabela 9. Detalhe das vigas.	40
Tabela 10. Resumo dos resultados dos ensaios da série GG.	41
Tabela 11. Dimensões dos corpos de prova do ensaio de resistência à tração.	53
Tabela 12. Diâmetros e áreas nominais de barras reforçadas com fibra.	56
Tabela 13. Propriedades da fibra de polipropileno fornecido pelo fabricante.	63
Tabela 14. Dosagem do concreto.	64
Tabela 15. Ensaio de caracterização do concreto para cada traço da segunda etapa.	65
Tabela 16. Dimensionamento de acordo com a Prática Recomendada (2021) e ACI 440.1R-15.	67
Tabela 17. Resultados do ensaio de resistência à tração.	76
Tabela 18. Resultados do ensaio de módulo de elasticidade.	77
Tabela 19. Resultado do ensaio de arrancamento para barras de Ø10 mm.	78
Tabela 20 – Caracterização do concreto para Traço SF e Traço F.	79
Tabela 21. Resultados do ensaio de resistência à tração por flexão.	80
Tabela 22. Resultados experimentais e comparação com valores teóricos.	82
Tabela 23. Experimental e relação de valores experimentais e previsão de flecha.	93
Tabela 24. Abertura de fissura experimental e relação experimental-teórica.	94

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
	1.1 Justificativa.....	13
	1.2 Hipótese	14
	1.3 Objetivo Geral	14
	1.4 Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
	2.1 Polímeros reforçados com fibra (FRP)	15
	2.1.1 Características	15
	2.1.2 Matriz polimérica	16
	2.1.3 Tipos de FRP	18
	2.1.4 Polímeros Reforçados com Fibra de Basalto (BFRP)	18
	2.1.5 Aplicação de barras poliméricas reforçadas com fibra de basalto	21
	2.2 Concreto reforçado com fibras descontínuas dispersas.....	29
	2.2.1 Vigas de concreto armado com fibras descontínuas e barras de FRP	34
	2.3 Confinamento do concreto	42
	2.4 Dimensionamento de vigas armadas com FRP	43
	2.4.1 ACI 440-1R-15.....	43
	2.4.1.1 Estado limite de serviço	45
	2.4.2 Prática recomendada IBRACON/ABECE (2021)	47
	2.4.2.1 Estado limite de serviço	49
3	METODOLOGIA	51
	3.1 Caracterização das barras	52
	3.1.1 Ensaio de resistência à tração e módulo de elasticidade.....	53
	3.1.2 Ensaio de arrancamento	57
	3.2 Caracterização dos materiais	60

3.3	Ensaio de vigas submetidas à flexão	64
3.3.1	Caracterização do concreto e moldagem das vigas	65
3.3.2	Dimensionamento	67
3.3.3	Detalhamento da armadura	68
3.3.4	Instrumentação	70
3.3.5	Correlação de imagem digital	72
4	RESULTADOS	75
4.1	Ensaio de resistência à tração e determinação do módulo de elasticidade	75
4.2	Ensaio de determinação da tensão de aderência da barra de BFRP	78
4.3	Vigas submetidas à flexão.....	78
4.3.1	Caracterização do concreto	78
4.3.2	Análise do comportamento das vigas e modo de ruptura	81
4.3.3	Deformação da armadura longitudinal	85
4.3.4	Correlação de imagem digital	86
4.3.5	Comparação entre resultados experimentais e previstos por norma	91
5	CONCLUSÃO	95
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	97
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
	APÊNDICE A – DADOS UTILIZADOS NO DIMENSIONAMENTO	103
	APÊNDICE B – CÁLCULO DE PREVISÃO DE FLECHA	106
	APÊNDICE C – CÁLCULO DE PREVISÃO DE ABERTURA DE FISSURA.....	108

1 INTRODUÇÃO

Em estruturas convencionais de concreto armado, o aço é utilizado como elemento de reforço. Inicialmente, o aço é protegido contra a ação da corrosão devido à alcalinidade do concreto, assim, resultando em uma construção mais durável. No entanto, quando sujeito a ambientes mais agressivos, como estruturas a beira mar, pontes e garagens de estacionamento expostos a saís de degelo, além de combinações de umidade, temperatura e cloretos, a alcalinidade do concreto é reduzida e, como consequência, a armadura de aço sofre corrosão. Esta patologia pode ocasionar a deterioração do concreto e perda de serviço da estrutura (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2006).

Uma solução promissora para este problema é a utilização de FRP – Fiber-Reinforced Polymer – que podem ser aplicados como elemento de reforço e fortalecimento de estruturas de concreto. Vidro, carbono e aramida são fibras convencionais que já possuem vasta aplicabilidade na construção civil. Recentemente, desenvolveu-se um novo material compósito, o polímero reforçado com fibra de basalto (Basalt Fiber-Reinforced Polymer (BFRP)) em forma de barra como alternativa para reforço de estruturas de concreto (EL REFAI; ABED; ALTALMAS, 2015).

O basalto é uma rocha ígnea (magmática), formado pelo resfriamento e solidificação do magma sobre a superfície terrestre. É um material pesado, com densidade maior que do vidro, tenaz e apresenta boa resistência, além de ser a rocha vulcânica mais abundante. Pode ser classificado como básico, de acordo com a quantidade de sílica (45 a 52%) (LAPENA; MARINUCCI; CARVALHO, 2012).

A produção de fibra de basalto teve início em 1923 nos Estados Unidos e mais estudos foram desenvolvidos após a Segunda Guerra Mundial para aplicações nos campos militares e aeroespaciais em países como EUA, Europa e União Soviética. Atualmente, a fibra de basalto pode ser utilizada em diferentes áreas devido a sua ampla variedade de propriedades. Pode ser citado como exemplo suas características térmicas, sendo uma alternativa econômica em comparação a outras fibras resistentes a altas temperaturas, como a fibra de carbono, e agem como escudos térmicos,

barreiras de isolamento térmico, oferecendo proteção contra fogo (COLOMBO; VERGANI; BURMAN, 2012).

Além disso, segundo Bi e Wang (2011), o Polímero Reforçado com Fibra de Basalto (BFRP) tem sido amplamente pesquisado em decorrência de suas vantagens como alta resistência, baixo peso, resistência à corrosão, de fácil corte, desempenho não magnético e resistência à fadiga.

No entanto, BFRP se caracterizam por seu baixo módulo de elasticidade, em comparação ao aço e apresentam comportamento elástico linear até sua ruptura. Dessa forma, as estruturas de concreto armado com barras de BFRP apresentam flechas excessivas e maiores fissuras do que as estruturas em aço convencional, portanto, requerem um dimensionamento apropriado.

Algumas tentativas em aumentar o desempenho do FRP no concreto incluem melhorar as propriedades compressivas do concreto para que as altas resistências à tração das barras possam ser melhor aproveitadas. Outra prática adotada é a adição de fibras ao concreto armado com FRP, por apresentar uma distribuição mais uniforme de fissuras, além de reduzir a largura de fissura, melhorando a tenacidade e ductilidade do concreto. Outra alternativa inclui o aumento de reforço transversal no meio do vão com o confinamento do concreto na região central para aumentar capacidade de carga e a ductilidade da viga (ATTIA *et al.*, 2019; BASA; ULICEVIC; ZEJAK, 2018).

1.1 Justificativa

No Brasil, apesar de ainda ser uma novidade, já existem estudos acerca da utilização de materiais poliméricos reforçados com fibra de basalto como elemento de reforço ou como substituto ao aço em concreto. A introdução deste material no país está sendo feito de maneira gradativa, baseada em estudos, normativas internacionais e mais recentemente foi disponibilizado a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021). Neste contexto surge a necessidade de maiores informações sobre as propriedades desse material e seu comportamento mecânico associado ao concreto para que o material seja recorrente na indústria da construção civil.

Por meio dos estudos já existentes, é de conhecimento que algumas intervenções são necessárias para melhorar o desempenho das barras de FRP como armadura em vigas de concreto. A adição de fibras pode alterar a resposta pós-fissuração do concreto de frágil para pseudo-dúctil, além de aumentar a deformação compressiva que o concreto pode atingir. O uso combinado de misturas de concreto com fibra e reforço de BFRP pode beneficiar o desempenho geral das estruturas. Já o confinamento do concreto no meio do vão pode apresentar efeitos positivos quanto ao aumento da capacidade de carga nas vigas, diminuição de flecha e postergação da propagação de fissuras no vão médio do elemento.

1.2 Hipótese

A adição de 1% de fibras sintéticas descontínuas em volume de concreto e o confinamento do concreto (na forma de estribos) na região central da viga armadas com barras de BFRP podem incrementar a ductilidade do elemento e diminuir a abertura de fissura.

1.3 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento à flexão de vigas de concreto armado com polímeros reforçados com fibras de basalto (BFRP), com a adição de fibras sintéticas descontínuas e com confinamento do concreto no meio do vão, como forma de melhorar o comportamento pós fissuração do elemento estrutural e seu desempenho geral.

1.4 Objetivos Específicos

- Avaliar o comportamento mecânicos de barras de polímero reforçado com fibra de basalto (BFRP).
- Avaliar a aderência da barra de BFRP com o concreto.
- Avaliar a influência da adição de fibras sintéticas descontínuas e do confinamento do concreto na análise de flecha e abertura de fissura de vigas de concreto armado com BFRP.
- Verificar as equações de cálculo de previsão de flecha e abertura de fissura pela ACI 440 e Prática Rec. IBRACON/ABECE.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Polímeros reforçados com fibra (FRP)

Estruturas de concreto armado, compostas de barras de aço e concreto, em ambientes agressivos, podem ter seu desempenho a longo prazo deteriorado devido à corrosão da armadura. Essa patologia pode reduzir a resistência e rigidez do aço, ocasionando a diminuição da capacidade da carga e durabilidade das estruturas de concreto armado, afetando sua segurança (HUANG et al., 2021; LI et al., 2021).

Uma alternativa para solucionar o problema da corrosão do aço é a utilização de materiais compósitos feitos com fibras envoltas por uma resina polimérica, conhecidos como FRP (Polímero Reforçado com Fibras). Este material apresenta propriedades não-magnéticas e anti-corrosivas, dessa forma, evitando problemas de interferências eletromagnéticas e de corrosão da armadura (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2006).

2.1.1 Características

O American Concrete Institute, na norma ACI 440.1R (2015), apresenta algumas considerações com relação a utilização das barras de FRP:

I. Características das barras de FRP:

- Impermeáveis aos íons cloreto e aos ataques químicos;
- Resistência à tração superior à do aço;
- Baixo peso;
- Alta resistência à fadiga;
- Em ambientes corrosivos, o estado limite de serviço é muito superior ao aço;

II. Diferenças entre FRP e o aço:

- FRP apresenta ruptura elástico linear, enquanto o aço apresenta escoamento;
- FRP é anisotrópico e o aço é isotrópico;
- Barras de FRP possuem um limiar de ruptura por fluência mais baixo que o aço;

- Coeficiente de expansão térmica é diferente nas direções longitudinais e radiais;
- Tempo de resistência ao fogo e aplicações em altas temperaturas inferiores ao aço;
- Em caso de degradação das barras de FRP, o mecanismo de degradação é benigno para o concreto que o circunda, diferentemente do aço que se expande e ocasiona a falha do elemento.

III. Locais de aplicação para as barras de FRP:

- Qualquer elemento de concreto suscetível à corrosão por íons cloretos ou produtos químicos;
- Qualquer elemento de concreto que necessite de reforço devido aos efeitos eletromagnéticos;
- Uma alternativa econômica para barras que necessitem de revestimentos epóxi e galvanizações;
- Economia de custo se comparado a barra de aço inoxidável;
- Aplicações que requerem não condutividade térmica.

2.1.2 Matriz polimérica

Polímeros reforçados com fibra (do inglês fiber reinforced polymer FRP) são materiais compostos pela matriz polimérica, também conhecida como resina, que podem ser epóxi, vinil éster, polietileno, poliestireno, reforçado com fibras de alta performance (vidro, carbono, aramida, basalto). A matriz polimérica tem como função unir as fibras e proteger sua superfície de danos causados pelo ambiente e por abrasão mecânica, aumentando a vida útil do compósito, além de transferir tensões para as fibras (DUO *et al.*, 2021).

Podem ser classificadas como termorrígidas e termoplásticas. Resinas termoplásticas apresentam como propriedade baixa fluência e resistência térmica, com capacidade de remodelação e podem ser repetidamente amolecidas e endurecidas. As resinas termorrígidas são as mais utilizadas e exibem constância térmica adequada, além de resistência a produtos químicos (FIB Bulletin 40, 2007; AMRAN *et al.*, 2018).

As resinas termorrígidas possuem baixa viscosidade inicial, permitindo que frações de alto volume de fibras possa ser incorporadas enquanto ainda retêm a umidade da fibra, são fáceis de processar e de baixo custo. As propriedades dessas matrizes podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades das matrizes termorrígidas.

Propriedade	Matriz		
	Poliéster	Epóxi	Vinil éster
Densidade (kg/m ³)	1200 – 1400	1200 – 1400	1150 – 1350
Resistência à tração (MPa)	34,5 – 104	55 – 130	78 – 81
Módulo longitudinal (GPa)	2,1 – 3,45	2,75 – 4,10	3,0 – 3,5
Coefficiente de Poisson	0,35 – 0,39	0,38 – 0,40	0,36 – 0,39
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	55 – 100	45 – 65	50 – 75
Teor de umidade (%)	0,15 – 0,60	0,08 – 0,15	0,14 – 0,30

Fonte: Adaptado de FIB Bulletin 40 (2007).

Dentro dos tipos de resinas termorrígidas, o epóxi é qualquer um dos componentes adesivos básicos ou produtos finais curados de resina epóxi. Tem como vantagens altas propriedades mecânicas, fácil processamento, boa ligação de fibra (matriz e fibra), melhora a resistência à flexão e à compressão, alta resistência à corrosão e menores danos causados pela água e calor, o que aumenta a resistência aos impactos (AMRAN *et al.*, 2018; FIB Bulletin 40, 2007).

Vinil éster são resinas termorrígidas que tem como propriedade resistência química e resistência à tração, são altamente resistentes a ácidos, álcalis, solventes e peróxidos, oferecendo maior tenacidade ao FRP e maior resistência à fadiga em relação ao epóxi e ao poliéster (AMRAN *et al.*, 2018; FIB Bulletin 40, 2007).

O poliéster é a resina mais utilizada na produção de compósitos de FRP por apresentar menor custo, resistência à corrosão, rápido processo de cura e resistente a temperaturas extremas de catalisador (AMRAN *et al.*, 2018).

2.1.3 Tipos de FRP

De acordo com Warmling *et al.* (2019), as fibras mais conhecidas e utilizadas na indústria da construção civil como reforço estrutural são as fibras de vidro e carbono.

As barras de polímeros reforçados com fibra de vidro são uma alternativa para substituição de barras aço que podem sofrer corrosão. Entretanto, este material possui desvantagens como, por exemplo, baixo módulo de elasticidade, cinco vezes menor que o aço, e comportamento elástico-linear resultando em uma ruptura frágil (SÁ, 2018).

Os polímeros reforçados com fibra de carbono são utilizados como reforço em estruturas de concreto armado devido às suas propriedades de alta resistência à tração e à corrosão, baixo peso, praticidade e versatilidade. A fibra de carbono apresenta melhor desempenho do que a fibra de vidro, entretanto, possui um custo elevando, sendo utilizados em casos específicos de obras que necessitem aumentar a capacidade de carga, com algum impedimento ou algo diferente do convencional (VIEIRA *et al.*, 2016; WARMLING *et al.*, 2019).

Em um esforço contínuo de desenvolver tecnologias de FRP, novas fibras estão surgindo como, por exemplo, polímeros reforçados com fibra de basalto (BFRP). Esta fibra tem apresentado grande potencial e um melhor custo-benefício se comparado a fibra de carbono (ELGABBAS; AHMED; BENMOKRANE, 2015).

2.1.4 Polímeros Reforçados com Fibra de Basalto (BFRP)

A utilização de materiais reforçados com fibra tem se expandido, com as fibras de vidro, carbono e aramida mais comumente aplicadas. Uma nova fibra foi desenvolvida, conhecida como polímeros reforçados com fibra de basalto (BFRP). Fibras de basalto possuem alta resistência à tração, boa resistência química e são ecologicamente corretas. Segundo Monaldo, Nerilli e Vairo (2019) as fibras de basalto

caracterizam-se pelo processo de produção de menor custo se comparado as outras fibras – carbono e vidro.

O basalto é uma rocha ígnea de cor escura, sendo a mais comum entre as rochas magmáticas. A microestrutura da rocha é influenciada pela taxa de resfriamento da lava. Quando a taxa é baixa, a estrutura de basalto apresenta um arranjo atômico quase regular. Em uma estrutura mórfica, ou seja, não cristalizada, a taxa de solidificação é alta (MONALDO; NERILLI; VAIRO., 2019).

Fibras produzidas por rocha basáltica fundida vêm ganhando cada vez mais interesse em decorrência de suas propriedades físico-química, boas propriedades de resistência e rigidez em altas temperaturas, durabilidade a longo prazo, alta resistência a ácidos e solventes e funcionalidade a uma extensa faixa de temperatura (-200 °C a 700 °C). Em comparação ao GFRP tipo E-glass o BFRP tem maior resistência e módulo, custo semelhante e maior estabilidade química e, comparado ao CFRP (FRP de carbono), o BFRP pode fornecer uma relação custo-benefício significativamente melhor (ELGABBAS; AHMED; BENMOKRANE, 2015; MONALDO; NERILLI; VAIRO., 2019).

Quanto ao processo de produção, a tecnologia de produção atual para fibras de basalto contínuas é muito semelhante à usada para a fabricação de E-glass. A principal diferença é que o vidro tipo E é feito de conjunto complexo de materiais, enquanto o filamento de basalto é feito de rocha basáltica em fusão, sem outros aditivos e, conseqüentemente, com uma vantagem em termos de custo. Esta simplicidade do processo de fabricação requer menos energia (FIORE; BELLA; VALENZA, 2011).

A Tabela 2 apresenta uma comparação das propriedades da fibra de basalto com fibra de vidro (Vidro E para aplicações elétricas e Vidro S com alta resistência mecânica) e fibra de carbono. Por meio dessas comparações, é possível observar que as fibras de basalto preenchem a lacuna entre as fibras de vidro e as fibras de carbono. As fibras de basalto apresentam melhores características do que as fibras de vidro tipo E-glass, com propriedades comparáveis ao tipo S-glass. E, apesar de suas propriedades serem inferiores ao carbono, as fibras de basalto possuem menor custo.

Quando comparadas as propriedades térmicas da fibra de basalto com a fibra de vidro, o basalto pode ser usado em uma faixa mais ampla de temperatura. Com relação à sua estrutura química, se comparado a fibra de vidro, a fibra de basalto é mais resistente aos ácidos e sofrem menor degradação por água e álcalis. Durante o processo de produção não são necessários aditivos químicos ou solvente, portanto, segundo Colombo, Vergani e Burman (2012), os produtos de fibra de basalto não liberam elementos químicos quando aquecidos, visto que são de origem natural, além da possibilidade de reciclagem do basalto, o que o torna mais ecologicamente correto.

Tabela 2. Propriedades da fibra de basalto: comparando com vidro e carbono.

	Fibra de vidro			Fibra de carbono	
	Basalto	Vidro E	Vidro S	Alta resistência	Alto módulo
Resistência à tração (MPa)	4840	3450	4580	3500	2500-4000
Módulo de elasticidade (MPa)	89000	72400	85500	240000	35000-650000
Alongamento na ruptura (%)	3,1	4,7	5,6	1,25	0,5
Temperatura máxima de aplicação (°C)	982	650		–	–
Temperatura operacional sustentada (°C)	820	480		–	–
Temperatura mínima de operação (°C)	-260	-60		–	–
Condutividade térmica (W/mK)	0,031-0,038	0,0324-0,04		–	–
Coefficiente de expansão térmica (ppm/°C)	8	5,4		–	–

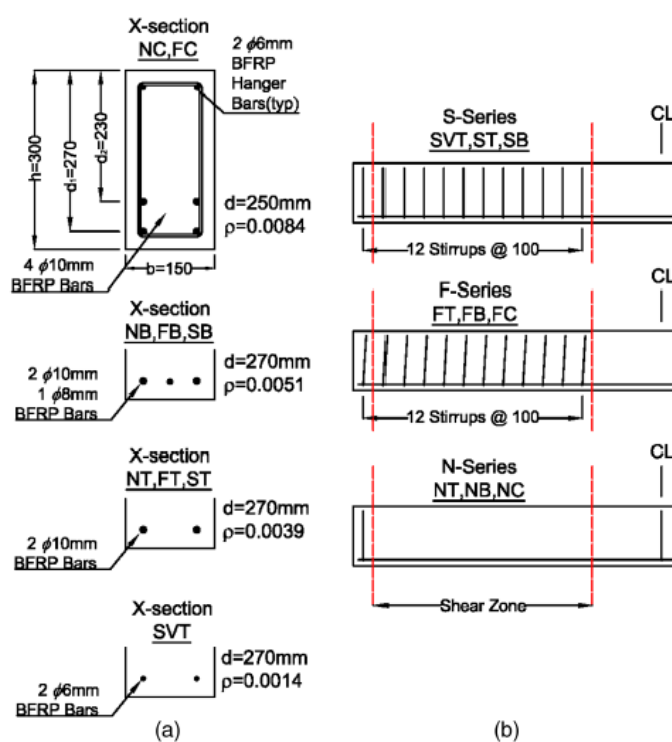
Fonte: Adaptado de Colombo, Vergani e Burman. (2012).

Por se tratar de uma tecnologia nova, são necessários mais estudos e normas para o dimensionamento desse material como reforço. Também os tipos de aplicações ainda são limitados (ELGABBAS; AHMED; BENMOKRANE, 2015; JUMAA; YOUSIF, 2019).

2.1.5 Aplicação de barras poliméricas reforçadas com fibra de basalto

Nos estudos de Tomlinson e Fam (2015) foram ensaiadas vigas de concreto armado à flexão com 3,10 m de comprimento e seção transversal de 15x30 cm. Em três vigas foram utilizados estribos de aço para o reforço ao cisalhamento (série-S), em três foram aplicados estribos de BFRP (série-F) e as restantes não tiveram reforço ao cisalhamento (série-N), como pode ser vista na Figura 1. O reforço longitudinal consistia em barras de BFRP de 10, 8 ou 6 mm de diâmetro. A Tabela 3 resume os resultados obtidos do ensaio experimental.

Figura 1. Configuração das vigas: (a) seção transversal e (b) elevação.



Fonte: Tomlinson e Fam (2015).

Tabela 3. Resultado dos ensaios.

Viga	Carga de ruptura (kN)	Carga última (kN)	Deslocamento (mm)	Modo de ruptura
F1	15,2	72,7	59,8	Cisalhamento – ruptura do estribo
F2	15,7	89,7	67,9	Cisalhamento – ruptura do estribo
F3	15,4	106,9	61,6	Cisalhamento – ruptura do estribo
S1	14,9	38,2	66,4	Flexão – ruptura do BFRP
S2	14,2	79,6	71,1	Flexão – cisalhamento
S3	14,4	96,9	75,8	Flexão – esmagamento do concreto
N1	11,3	41,8	95,8	Cisalhamento – tração
N2	13,5	23,0	92,6	Cisalhamento – tração
N3	12,2	58,4	40,7	Cisalhamento – compressão

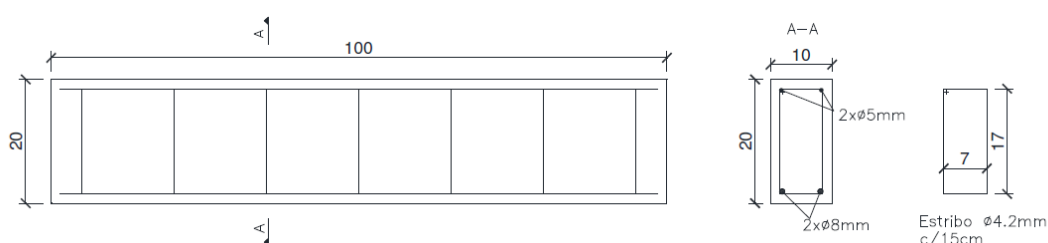
Fonte: Adaptado de Tomlinson e Fam (2015).

As vigas da série F com estribos de BFRP apresentaram comportamentos similares. Em cargas acima da de serviço, surgiram fissuras de cisalhamento visíveis em que o tamanho e quantidade aumentaram com a carga. As flechas obtidas das vigas eram semelhantes ao que seria esperado para a deformação governada por flexão. A série S eram de vigas com estribos de aço em que cada uma apresentou flechas e deformações consistentes com deformação dominada por flexão. As vigas da série N divergem das vigas com reforço de cisalhamento nas cargas acima da de serviço. Uma grande fissura de cisalhamento diagonal se desenvolveu em todas as três vigas quando as flechas estavam entre 26 e 28 mm. As flechas começaram a mostrar respostas inconsistentes com a viga governada pela flexão e destacaram a contribuição da fissura de cisalhamento para o aumento da flecha. Isso influenciou nas leituras de flechas no meio do vão que, apesar dos grandes aumentos, mostraram diminuição na deformação a cada vez que a carga diminuía devido a ação na região de cisalhamento.

Pode-se concluir que as capacidades últimas das vigas estão diretamente relacionadas com o reforço à flexão, independentemente do modo de ruptura, e as respostas de carga-flecha dentro do limite da carga de serviço não foram afetadas de forma perceptível pelo tipo de reforço ao cisalhamento. As vigas com estribo de polímero reforçado com fibra de basalto romperam ao cisalhamento devido a ruptura do estribo e a capacidade de cisalhamento aumentou proporcionalmente ao aumento da taxa de reforço à flexão do BFRP.

Nos estudos de Warmling *et al.* (2019) foram moldadas vigas de concreto, reforçadas com barras de aço e com barras poliméricas reforçadas com fibra de basalto. As vigas possuem 100 cm de comprimento e seção transversal de 10x20 cm, como mostra a Figura 2. As vigas foram submetidas à ensaio de flexão, podendo observar seus modos de ruptura e as relações carga e deslocamento vertical. A armadura utilizada é constituída por duas barras com diâmetro de 5 mm no porta estribo, 8 mm na armadura longitudinal e estribos com diâmetro de 4,2 mm espaçados a cada 15 cm.

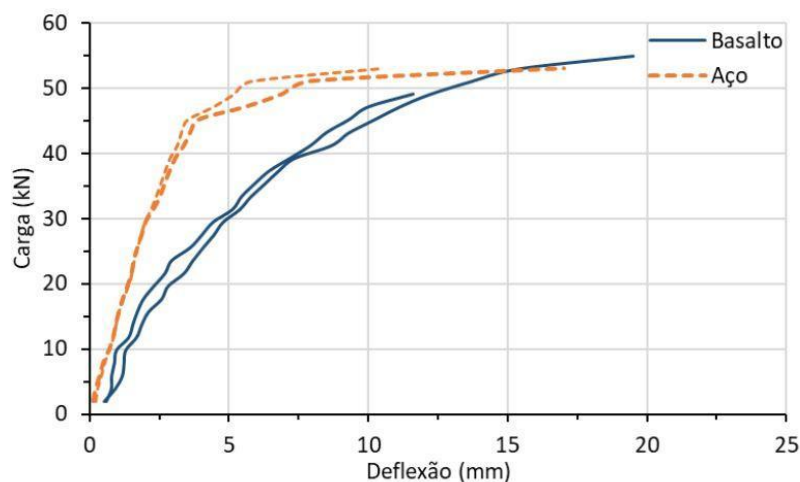
Figura 2. Geometria e disposição da armadura das vigas ensaiadas.



Fonte: Warmling *et al.* (2019).

A Figura 3 apresenta a comparação entre a viga de concreto armado com aço e com BFRP no gráfico de Carga-Deslocamento vertical. Enquanto as curvas das vigas de concreto armado com aço apresentaram patamar de escoamento, configurando um comportamento dúctil, as vigas reforçadas com BFRP apresentaram relação curva sem patamar de escoamento. Foi observado maiores deflexões para uma mesma carga nas vigas de concreto com BFRP em decorrência do menor módulo de elasticidade dessas barras.

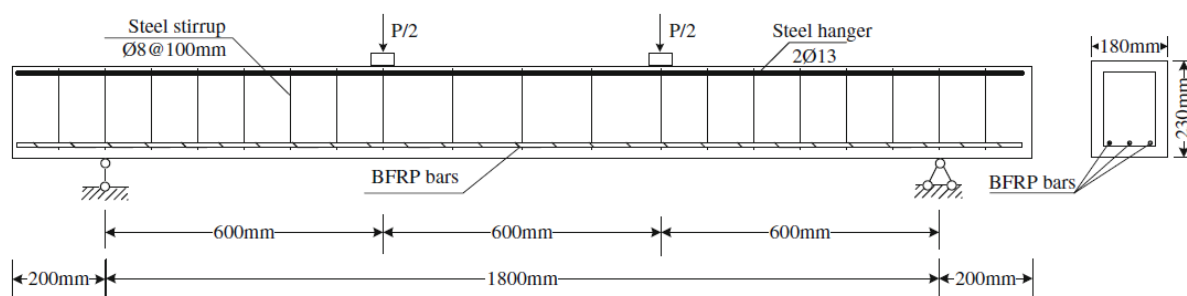
Figura 3. Comparativo entre as vigas reforçadas com barras de aço e com polímeros reforçados com fibra de basalto.



Fonte: Warmling *et al.* (2019).

O comportamento esperado para as vigas armadas com BFRP era linear até a ruptura, o que não ocorreu e pode ser explicado, segundo o autor, pela preponderância dos esforços de cisalhamento e ao possível escorregamento da barra, visto que não houve um comprimento de ancoragem adequado. As cargas últimas das vigas de diferentes materiais ficaram próximas devido ao modo de ruptura na biela comprimida do concreto. Para o dimensionamento de uma viga de concreto armada com BFRP deve-se considerar a ruptura frágil das barras e a deformação causada pelo baixo módulo de elasticidade.

Zhang, Sun e Xiong (2014) realizaram um estudo experimental sobre as deformações à flexão de vigas de concreto armado com barras de BFRP. Foram moldadas vigas com seção transversal de 18x23 cm e 1,80 m de comprimento (Figura 4). As barras de BFRP utilizadas possuíam diâmetros diferentes (6, 8 e 10 mm e nomeadas como R6, R8 e R10, respectivamente) e em cada viga foram utilizadas quantidades diferentes de barras e diâmetros variados, como mostra a Tabela 4.

Figura 4. Configuração e detalhamento das vigas ensaiadas.

Fonte: Adaptado de Zhang, Sun e Xiong (2014).

Tabela 4. Informações das vigas ensaiadas

Viga	Barras de reforço	Taxa de reforço (%)	Resistência do concreto (MPa)
B1	2R6	0,15	23,6
B2	3R6	0,22	28,0
B3	2R8 + R6	0,33	33,9
B4	3R8	0,39	27,0
B5	1R8 + 2R10	0,54	30,0
B6	3R10	0,67	34,0

Fonte: Adaptado de Zhang, Sun e Xiong (2014).

Os resultados encontrados podem ser vistos na Tabela 5. Três vigas foram superdimensionadas ($\rho_f > \rho_{fb}$) com modo de ruptura por esmagamento do concreto, duas vigas foram subdimensionadas ($\rho_f < \rho_{fb}$) com ruptura da barra como modo de falha. A comparação dos resultados mostrou que a capacidade de flexão descritas no código da ACI 440-06 são adequadas para vigas com BFRP, com bastante precisão.

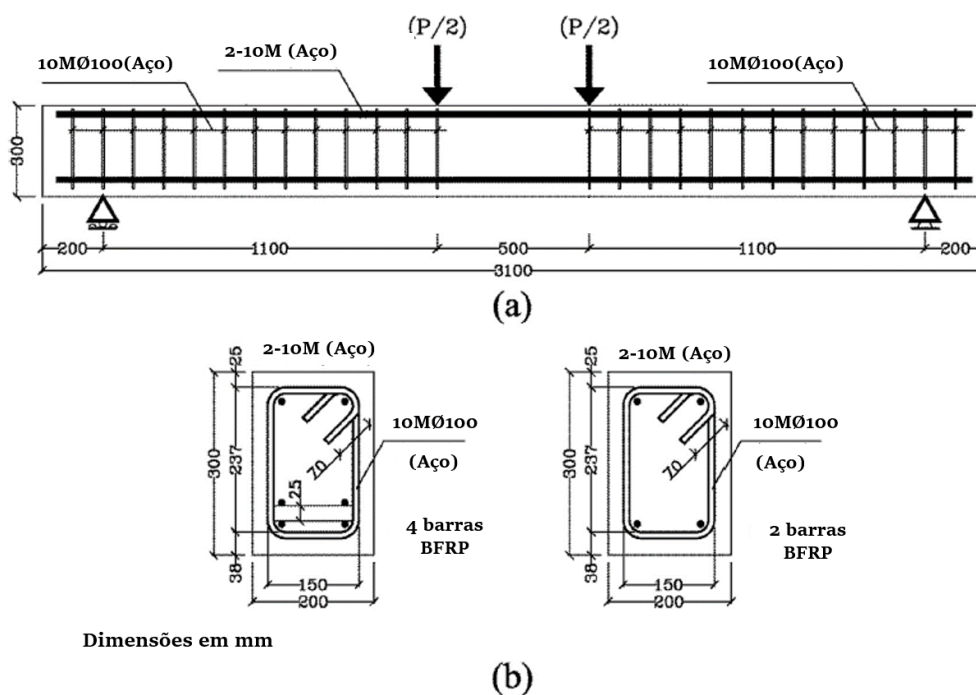
Tabela 5. Resultados do programa experimental.

Viga	Momento Experimental (kNm)	Momento calculado (kNm)	Modo de ruptura	Modo de ruptura previsto pela ACI
B1	16,34	17,93	Ruptura da barra	Ruptura da barra
B2	22,98	21,13	Ruptura da barra	Ruptura da barra
B3	27,67	30,45	Equilibrado	Equilibrado
B4	28,85	28,60	Esmagamento do concreto	Esmagamento do concreto
B5	35,42	34,75	Esmagamento do concreto	Esmagamento do concreto
B6	35,12	35,13	Esmagamento do concreto	Esmagamento do concreto

Fonte: Adaptado de Zhang, Sun e Xiong (2014).

Elgabbas *et al.* (2016) realizou um estudo experimental para determinar o coeficiente de aderência e o desempenho estrutural de barras de BFRP em vigas de concreto. Foram moldadas seis vigas armadas com BFRP com seção transversal 20 x 30 cm e 310 cm de comprimento (Figura 5). Utilizaram-se barras de 10, 12 e 16 mm com superfícies revestidas de areia sobre o envoltório helicoidal.

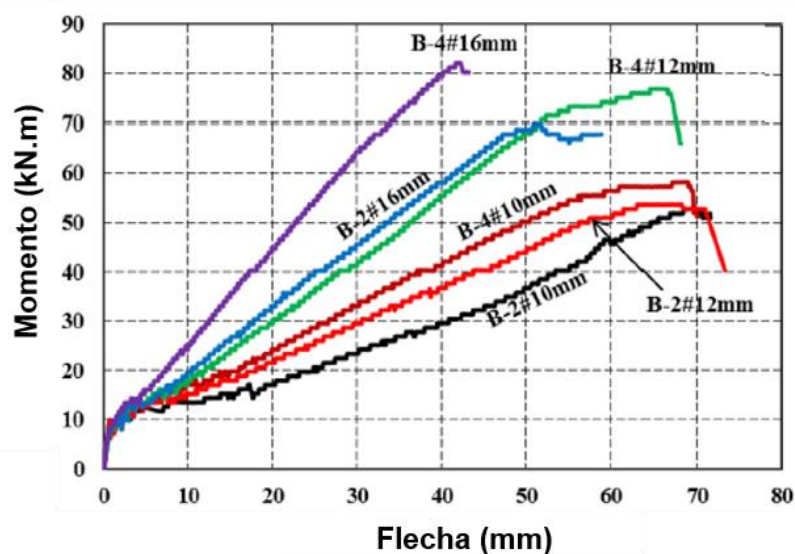
Figura 5. Dimensões e detalhamento da armadura: (a) elevação e (b) seção transversal.



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

A Figura 6 apresenta a curva de Momento-Flecha no meio do vão das vigas ensaiadas. A resposta de pré-fissuração das vigas armadas com BFRP não foram afetadas pela taxa de armadura, visto que o Estádio I é regido pela seção de concreto. Após a fissuração, Estádio II, entretanto, o aumento na rigidez ou aumento nas deformações da armadura foi proporcional à taxa de armadura. Em outras palavras, quanto maior a taxa de reforço, maior a rigidez e menor a deformação com o mesmo nível de carga aplicada. As vigas reforçadas com BFRP com menor taxa de armadura apresentaram aumentos acentuados nas deformações e flechas na fissuração. O aumento repentino das deformações resultou em fissuras mais amplas e profundas. O aumento da taxa de armadura, entretanto, aumentou a quantidade de energia absorvida na primeira fissura, o que potencializou o comportamento, pois controlou o aumento imediato da deformação e da largura da fissura inicial.

Figura 6. Curva momento-flecha no meio do vão.



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

A Tabela 6 apresenta os resultados do ensaio à flexão das vigas obtendo os valores de momento experimental e flecha no meio do vão, modo de ruptura e a relação entre o momento experimental pelo momento obtido pela norma ACI 440.1R-15 (ACI, 2015). As vigas romperam por esmagamento do concreto, com exceção da viga B-2#10 mm, visto que a taxa de reforço estava próxima da taxa balanceada ao calcular segundo a CSA-S806-12 (CSA, 2012). É possível observar que a maior taxa de reforço leva a um aumento da capacidade última, por exemplo, duplicando o reforço na B-4#12 mm, comparado a B-2#12 mm, houve um aumento da capacidade em 43,13%. Realizou-se a análise teórica para prever o momento das vigas utilizando a norma ACI 440.1R-15 (ACI, 2015) e comparado ao momento resistente do programa experimental. As equações da norma subestimaram a capacidade à flexão das vigas de concreto armado com BFRP. A diferença entre o momento experimental e momento previsto pela norma está relacionada ao fato de a norma não considerar a contribuição das barras de aço do porta estribo na zona de compressão.

Tabela 6. Momento experimental, relação entre Momento experimental e ACI e modo de ruptura.

Viga	ρ_f	Mn experimental (kNm)	Flecha (mm)	M_{nEXP}/M_{nACI}	Modo de ruptura
B-2#10mm	0,0030	52,84	69,33	1,36	Equilibrado
B-4#10mm	0,0060	58,30	68,34	1,27	Esmagamento do concreto
B-2#12mm	0,0043	53,72	67,50	1,17	Esmagamento do concreto
B-4#12mm	0,0086	76,89	57,81	1,45	Esmagamento do concreto
B-2#16mm	0,0077	69,74	51,48	1,17	Esmagamento do concreto
B-4#16mm	0,0154	82,06	42,10	1,24	Esmagamento do concreto

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

2.2 Concreto reforçado com fibras descontínuas dispersas

Em estruturas convencionais de concreto armado, as barras de aço resistem as forças de tração após a fissuração do elemento em aplicações estruturais, visto que o concreto é um material frágil, resistente à compressão. Uma forma de melhorar as propriedades do concreto é a utilização de fibras uniformemente distribuídas que, devido à distância menor entre fibras em comparação ao espaçamento entre barras, podem aumentar a capacidade de tração e à flexão pós-fissuração, além de controlar a abertura de fissura em elementos de concreto (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2018).

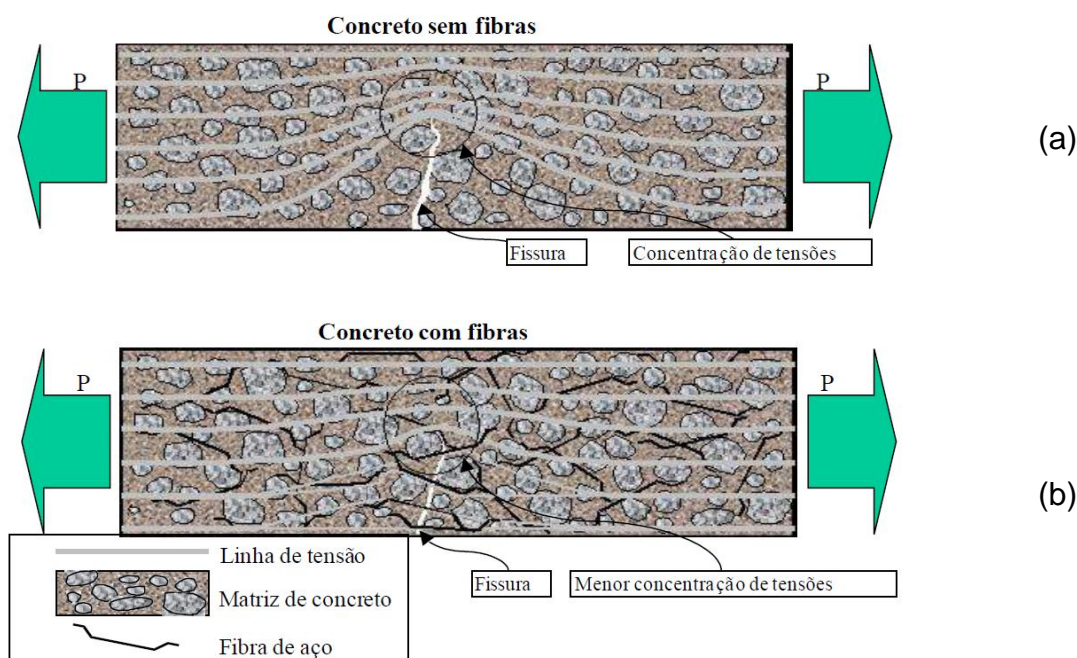
O conceito da utilização de fibras para melhorar as propriedades mecânicas do concreto já é conhecido e sua aplicação vem crescendo. A matriz reforçada com fibra pode resistir a uma quantidade considerável de carga mesmo após a fissuração, devido ao principal papel das fibras de unir as fissuras e resistir à sua formação (HOLSCHEMACHER; MUELLER; RIBAKOV, 2010; Wang, 2006).

A menor capacidade de resistência à tração do concreto pode ser associada à sua grande dificuldade de interromper a propagação de fissuras quando submetido a esse esforço. Então, quando a direção da propagação da fissura é transversal à

direção principal de tensão, a área disponível para suporte de carga é reduzida, ocasionando o aumento das tensões nas extremidades das fissuras (FIGUEIREDO, 2011).

Em concreto simples, como na Figura 7 (a), uma fissura irá representar uma barreira à propagação de tensões, representadas de forma simples pelas linhas de tensão. Dessa forma, ocorrerá um desvio das linhas de tensões que irão se concentrar nas bordas da fissura e, ao superar a resistência da matriz, pode haver a ruptura frágil do material. Ao adicionar fibras de resistência e módulo adequado ao concreto num teor correto, o material não apresentará comportamento frágil. Isso ocorre porque a fibra age como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, diminuindo a concentração das mesmas nas extremidades da fissura, como mostra a Figura 7 (b). Assim, pode-se obter um comportamento pseudo-dúctil, em outras palavras, o concreto reforçado com fibra apresenta certa capacidade resistente mesmo após a fissuração, alterando o comportamento frágil típico do material quando submetido à tração, assegurando menor fissuração do concreto (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 7. Esquema de concentração de tensões para um concreto simples (a) e com reforço de fibras (b).

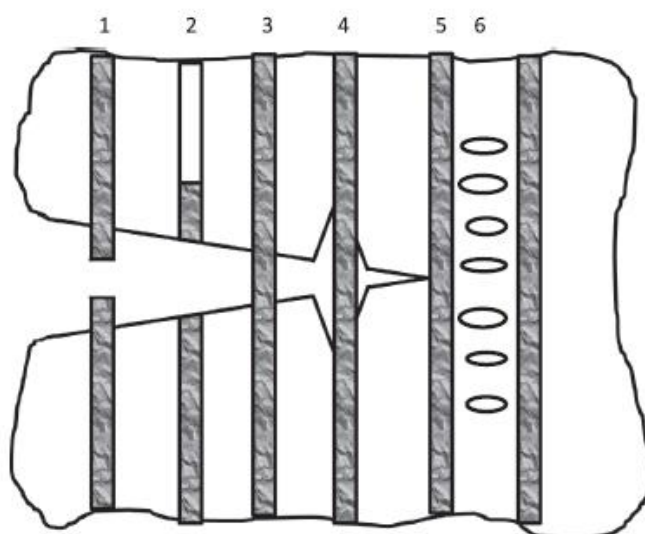


Fonte: Figueiredo (2011).

Os estágios relacionados à ruptura do concreto reforçado com fibras (CFR) podem ser resumidos da seguinte forma: (a) fissuras na matriz de cimento; (b) descolamento e deslizamento entre a fibra e a matriz; (c) fibra aderida fazendo a ponte sobre a fissura; (d) deslizamento por atrito, deformação da ancoragem e eventual arrancamento da fibra; (e) ruptura potencial da fibra sob tensão. O termo “falha” pode ser atribuído ao estágio final quando as fibras não são mais capazes de resistir às tensões e para alguns tipos específicos ou geometrias de fibras, apenas alguns dos estágios podem ocorrer (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2018).

O diagrama esquemático da Figura 8 apresenta os diferentes modos de falha associados ao CRF. A ruptura da fibra (1), arrancamento (2) e descolamento da fibra da matriz (4) podem absorver e dissipar energia de forma efetiva para estabilizar a propagação de fissuras no concreto. A fibra que faz a ponte de transferência (3) pode reduzir a intensidade da tensão na ponta da fissura. Ademais, a ponte de transferência das fibras pode diminuir a abertura de fissura, prevenindo a entrada de água e contaminantes na matriz de cimento de causar corrosão na armadura de aço e degradar o concreto. A fibra na matriz (5) impede a propagação de uma ponta da fissura, conseqüentemente, pequenas fissuras serão distribuídas em outros locais da matriz (6). Ainda que cada fibra individualmente contribua pouco, o efeito geral da adição do reforço é cumulativo (YIN *et al.*, 2015)

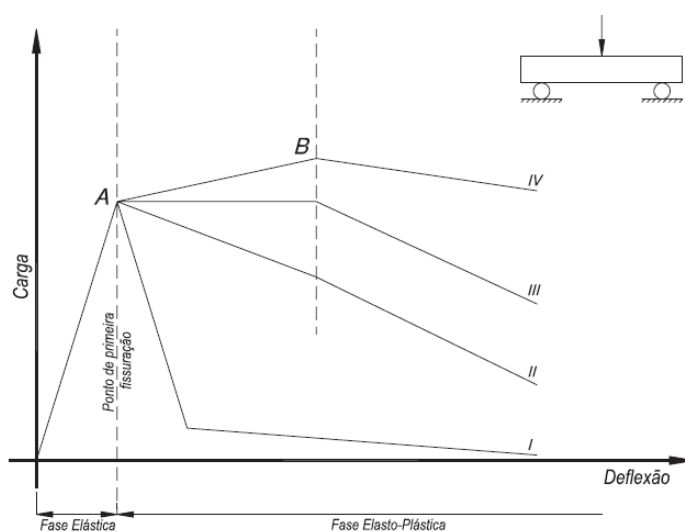
Figura 8. Mecanismos de falha em concreto reforçado com fibra.



Fonte: Yin *et al.* (2015).

A Figura 9 representa as possíveis respostas, obtidas por meio de ensaios de flexão, de elementos de concreto reforçados com fibra, com gráfico de Carga x Deslocamento vertical. A curva I apresenta o comportamento de um concreto simples, caracterizado por um comportamento típico de um material frágil, uma vez que se atinge a carga de primeira fissuração, ocorre o colapso. A curva II mostra o comportamento de um concreto reforçado com fibra, em que o reforço absorve certa carga após o ponto de primeira fissuração, ainda que baixa (A-B), para depois sofrer o colapso mais lentamente e suavizado. A curva III representa um material dúctil, assim como as curvas II e IV, demonstrando a capacidade do concreto de suportar um deslocamento (A-B) sob carga constante, a partir do ponto de primeira fissuração, muito antes de ocorrer o colapso, que ocorre de maneira mais lenta, com comportamento plástico. A curva IV evidencia um concreto reforçado com fibras com certo incremento de carga, com amplo deslocamento (A-B) após o ponto de primeira fissuração, ou seja, um comportamento enrijecido (SARZALEJO *et al.*, 2015).

Figura 9. Respostas de ensaio de flexão de vigas de concreto com fibra.



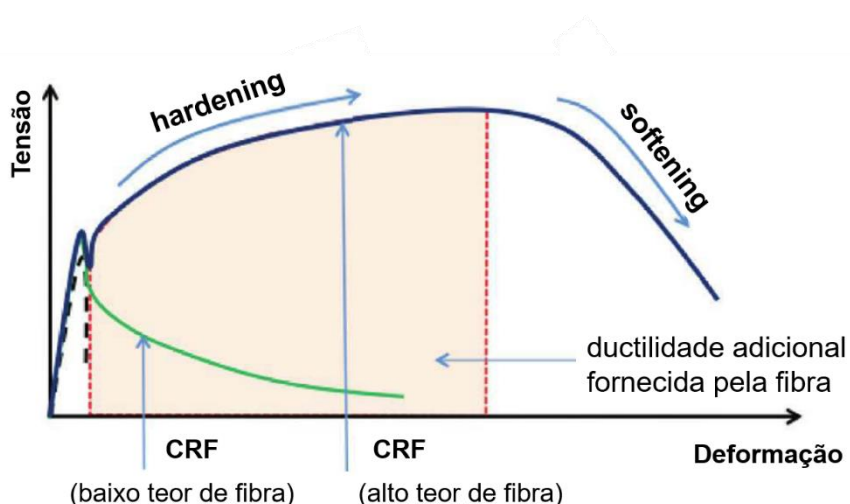
Fonte: Sarzalejo *et al.* (2015).

Teores de fibra baixo a moderado fornecem resistência suficiente para atuar como ponte de transferência nas principais fissuras em ensaios à flexão, obtendo como resposta deformação softening. Durante esse tipo de deformação, a resistência residual diminui gradativamente à medida que se aumenta a deflexão e a abertura de fissura. Deformação “softening” do concreto reforçado com fibra (CRF) apresenta uma tensão de tração pós-fissuração inferior à sua resistência à tração final. Com altos teores de fibra incorporados ao concreto, mecanismos de ancoragem e tensão de

aderência aprimoradas, as fibras podem fornecer resistência extra como ponte de transferência em diversas fissuras e redistribuir tensões, resposta conhecida como deformação hardening. Durante essa deformação, a resistência residual aumenta gradualmente à proporção que deformações e abertura de fissuras aumentam até atingir a ruptura (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2018).

A Figura 10 mostra as curvas à flexão de tensão-deformação para dois diferentes teores de fibra. A linha pontilhada, correspondente ao concreto simples, apresenta uma ruptura frágil uma vez que se atinge a carga de fissuração. A linha verde corresponde ao CRF com teor de fibra relativamente baixo; não tem indício de uma ruptura frágil, mas uma vez que surge a primeira fissura, a capacidade de carga reduz gradativamente (comportamento softening). A linha azul representa o comportamento do FRC com altos teores de fibra; após alcançar a carga de fissuração, o concreto suporta a carga e as fibras possibilitam a resistência de cargas crescentes (trecho hardening) até que um valor máximo de tensão (carga final) seja atingido na região pós-pico, superior à carga de fissuração do concreto. Após isso, a capacidade de carga diminui gradualmente (trecho softening). Devido a contribuição das fibras, o material é capaz de absorver uma grande quantidade de energia de deformação adicional (região sombreada sob a curva) comparado ao concreto simples (ACI544.4R-18).

Figura 10. Contribuição da fibra no desempenho de tração/flexão, obtida do ensaio de flexão, mostrando comportamentos de softening e hardening.



Fonte: ACI544.4R-18.

As fibras podem ser de diferentes tipos de materiais, geometrias e tamanhos que variam de 3 a 65 mm de comprimento. Pode-se classificar também como microfibras ou macrofibras, com 0,3 mm de diâmetro como o limite que separa as duas categorias. Há diversos tipos de fibra que podem ser utilizados como reforço do concreto como, por exemplo, fibras de aço, fibras de vidro, fibras naturais, fibras sintéticas, fibras de basalto (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2018; AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1996; NANA *et al.*, 2021).

Fibras de aço podem melhorar bastante a resistência à tração e à flexão do concreto devido a sua capacidade de absorver energia e controlar a abertura de fissura, além de suas propriedades de condutividade elétrica, magnética e térmica, sendo adequados em algumas aplicações especiais. No entanto, a corrosão das fibras de aço pode ser prejudicial ao contribuir para a deterioração das estruturas de concreto. As fibras de vidro têm excelente efeito de reforço, entretanto, baixa propriedade álcali resistente. Fibras naturais, como madeira, sisal, sisal, bagaço de cana de açúcar e fibras vegetais apresentam baixo custo e com fácil disponibilidade, contudo, pouca durabilidade (YIN *et al.*, 2015).

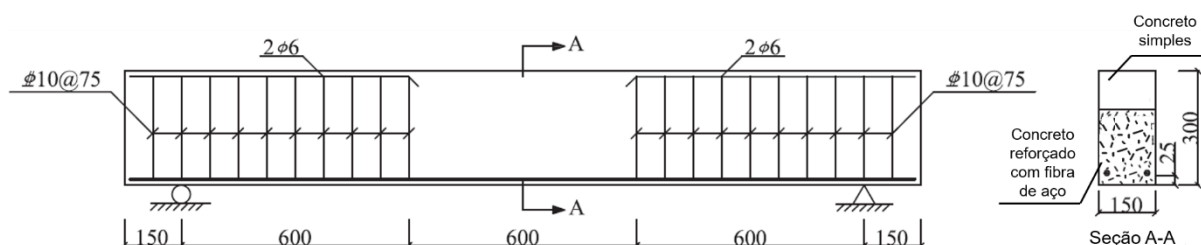
As fibras sintéticas, como polipropileno (PP) e álcool polivinílico (PVA), têm ganhado popularidade devido a sua resistência à corrosão, propriedade álcali resistente, relativo menor custo e sua durabilidade. Algumas aplicações comuns para as fibras sintéticas são as microfibras (diâmetros de 0,01 a 0,3 mm e comprimento de 3 a 50 mm) para controle de fissuração por retração plástica e melhora na resistência ao fogo. As macrofibras sintéticas (diâmetros de 0,3 a 1,0 mm e comprimento de 12 a 65 mm) podem ser utilizadas para controle de fissuras causadas por aplicação de cargas ou retração por secagem (NANA *et al.*, 2021; AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2018).

2.2.1 Vigas de concreto armado com fibras descontínuas e barras de FRP

No estudo de Zhu *et al.* (2018) analisou-se o comportamento à flexão de vigas de concreto de alta resistência parcialmente reforçado com fibras e armado com barras de BFRP. Foram ensaiadas 11 vigas variando a altura da camada de concreto com fibra, frações volumétricas de fibra de aço e diferentes taxas de armadura, além de uma viga referência de concreto com fibra armada com aço. As informações sobre

as vigas podem ser vistas na Tabela 7. Todas com seção transversal 150 x 300 mm e 2100 mm de comprimento, como na Figura 11.

Figura 11. Dimensões e detalhamento da armadura



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

Tabela 7. Detalhes dos modelos ensaiados.

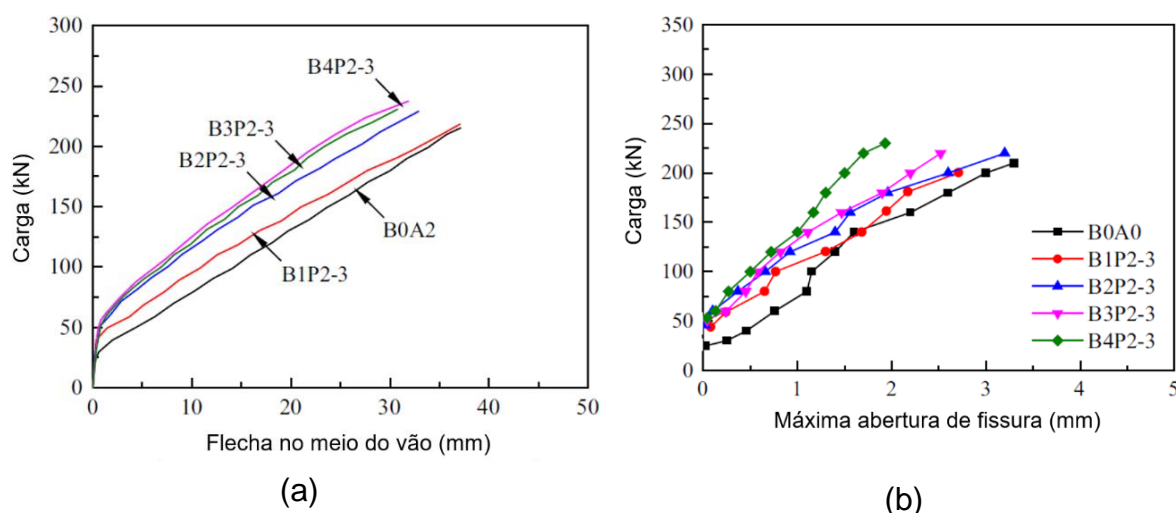
ID da viga	Tipo de armadura	Taxa de armadura	Volume de fibra (%)	Altura da camada (mm)
B0A2	BFRP	2Ø14	0	0
B2P2-1	BFRP	2Ø14	0/1,0	90
B2P2-2	BFRP	2Ø14	0/1,0	130
B2P2-3	BFRP	2Ø14	0/1,0	170
B2A2	BFRP	2Ø14	1,0	300
B1P2-3	BFRP	2Ø14	0/0,5	170
B3P2-3	BFRP	2Ø14	0/1,5	170
B4P2-3	BFRP	2Ø14	0/2,0	170
B2P1-3	BFRP	2Ø12	0/1,0	170
B2P3-3	BFRP	3Ø14	0/1,0	170
B2P4-3	BFRP	4Ø14	0/1,0	170
S2A2	AÇO	2Ø14	1,0	300

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

A Figura 12 (a) apresenta o gráfico de Carga - Flecha analisando a influência dos diferentes volumes de fibra. As curvas mostram que a redução da rigidez foi contida pela adição de fibra de aço nos teores de 1,0%, 1,5% e 2,0%, além disso, a capacidade de carga aumentou significativamente, enquanto a flecha reduziu. Para as amostras B1P2-3, B2P2-3, B3P2-3 e B4P2-3, as flechas no meio do vão foram cerca de 23,5%, 42,93%, 48,22% e 52,33%, respectivamente, menores do que a deflexão no meio do vão de B0A2.

No gráfico de Carga e Abertura de fissura, Figura 12 (b), a adição de fibra de aço levou a um maior número de fissuras nas vigas ensaiadas. Porém, com o aumento da fração volumétrica da fibra de aço, o número de fissuras não variou significativamente. No gráfico pode-se observar que as larguras das fissuras foram efetivamente contidas pelas fibras de aço. Em comparação com B0A2, as larguras de fissuras máximas para B1P2-3, B2P2-3, B3P2-3 e B4P2-3 foram reduzidas em 22,74% - 55,97% pela adição de fibras de aço com fração de volume de 0,5 - 2,0%.

Figura 12. Resultados de flecha (a) e abertura de fissura (b).



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

A adição de fibra de aço na zona de tração se mostrou uma solução efetiva e econômica para superar as grandes flechas e abertura de fissura de vigas de concreto armado com barras de BFRP.

Abed e Alhafiz (2019), em sua pesquisa, investigaram o efeito da adição de microfibras de basalto ao concreto no comportamento à flexão de vigas de concreto armado longitudinalmente com barras de BFRP.

Foram moldadas 12 vigas de seção transversal 180 x 230 mm e 2000 mm de comprimento, com vão de 1700 mm. Nove vigas foram reforçadas com armadura longitudinal de barras de BFRP, duas com GFRP e uma com aço. A Tabela 8 apresenta os detalhes das vigas ensaiadas e a Figura 13 o detalhamento do modelo.

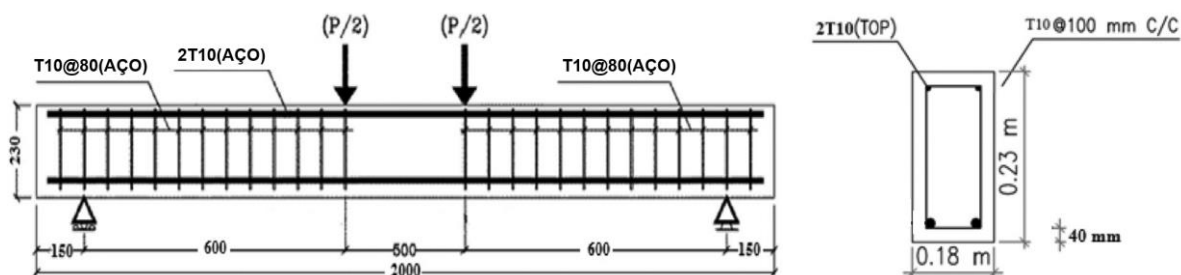
Tabela 8. Detalhes das vigas ensaiadas.

ID viga	Tipo de fibra	Barra	pf/pfb	Parâmetros investigados
2T12BB1	Basalto ^a	BFRP	2,8	Fibra, barra, ρ
2T16BB1	Basalto ^a	BFRP	5,2	ρ
2T10BB1	Basalto ^a	BFRP	1,8	ρ
3T10BB1	Basalto ^a	BFRP	2,75	ρ
3T8BB1	Basalto ^a	BFRP	1,96	ρ
2T12BS	Sintético	BFRP	2,8	Fibra
2T12BP	-	BFRP	2,8	Fibra
2T12GB1	Basalto ^a	GFRP	2,15	Fibra, barra
2T12GB2	Basalto ^b	GFRP	2,15	Fibra, barra
2T12SB1	Basalto ^a	Aço	0,17	Barra
2T12BB2	Basalto ^b	BFRP	2,8	Fibra, ρ
2T16BB2	Basalto ^b	BFRP	5,2	Fibra, ρ

a: Fibra de basalto de 24mm; b: Fibra de basalto de 12 mm.

Fonte: Adaptado de Abed e Alhafiz (2019).

Figura 13. Detalhamento da armadura



Fonte: Adaptado de Abed e Alhafiz (2019).

O gráfico Carga x Flecha, Figura 14 (a), apresenta os efeitos do tipo de fibra a uma mesma taxa de armadura. Comparando o comportamento à flexão de vigas de concreto reforçado com fibra com concreto simples (sem fibra), observa-se que a adição de fibras de basalto e fibras sintéticas apresentaram uma ligeira melhora na capacidade de carga. A adição de fibras ao concreto ajudou a controlar a ruptura à compressão da viga de concreto com reforço de fibras pelo efeito de ponte da fibra (restringindo a propagação de fissuras), permitindo a alta resistência do reforço de FRP seja mais utilizada. Isso pode ser considerada a principal razão pelo aumento da capacidade à flexão observada nas vigas com adição de fibra.

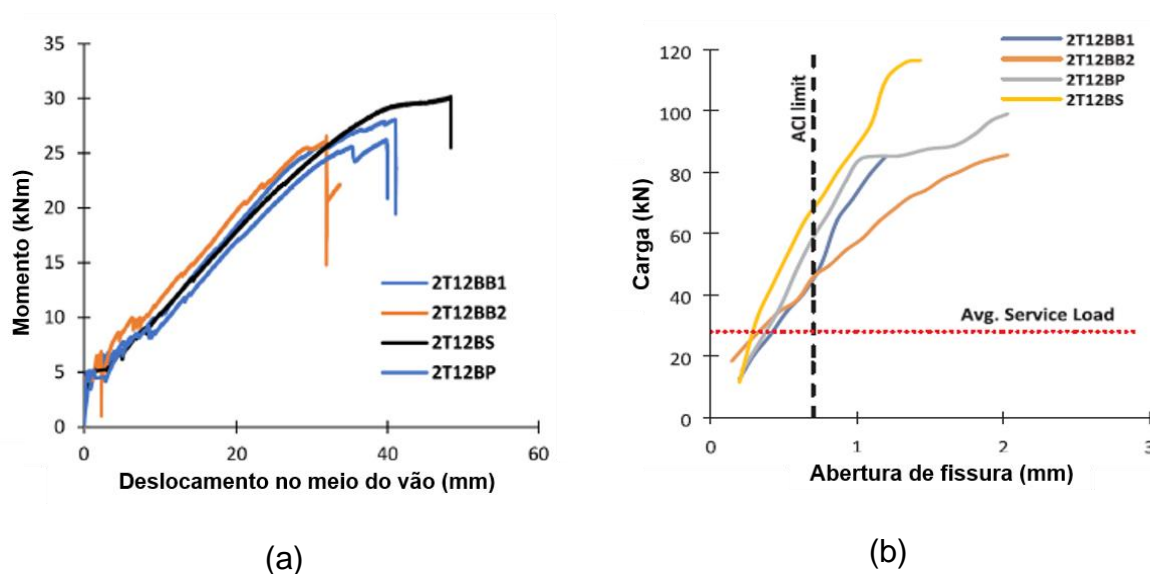
Comparando os resultados obtidos com a adição de fibra de basalto e fibra sintética, o maior aumento na capacidade de carga foi de 19% para as vigas de concreto armado com fibras sintéticas (2T12BS). Isso pode ser atribuído ao menor módulo de elasticidade das fibras sintéticas que resultaram em maior tensão de ruptura comparado as fibras de basalto. Conseqüentemente, a deformação de ruptura da fibra será maior do que a deformação de tração final do concreto na ruptura. As vigas de concreto CRF irão romper muito antes que a resistência da fibra seja atingida.

No gráfico de carga x abertura de fissura (Figura 14), a viga de concreto simples exhibe um aumento repentino na largura da fissura após a carga de 82 kN. Isso pode ser atribuído à ausência do efeito de ponte com o aumento das tensões no concreto.

No gráfico da Figura 14 (b), as fibras de basalto não apresentaram potencial de restringir a propagação da largura da fissura na fase de carga de serviço, enquanto as fibras sintéticas melhoraram o comportamento da fissuração. A viga com fibras de basalto de 12 mm de comprimento, 2T12BB2, apresentou pouco efeito de ponte em

comparação com a viga com fibras de basalto de 24 mm de comprimento, 2T12BB1, que apresentou um aumento considerável na largura da fissura após o estágio de carregamento de serviço. Isso significa que o uso de fibras de comprimento maior pode melhorar sua capacidade de cobrir fissuras de flexão nas seções de viga CRF.

Figura 14. Resultados (a) Carga x Flecha; (b) Carga x Abertura de fissura.



Fonte: Adaptado de Abed e Alhafiz (2019).

Adição de fibra de basalto e sintética ao concreto aumentaram a capacidade máxima de vigas de concreto e melhorou a curvatura de ductilidade. O aumento percentual foi maior para vigas de concreto com fibra sintética. A capacidade de seção foi aumentada devido ao aumento da deformação final à compressão do concreto, o que resultou em uma maior contribuição de resistência das barras de BFRP.

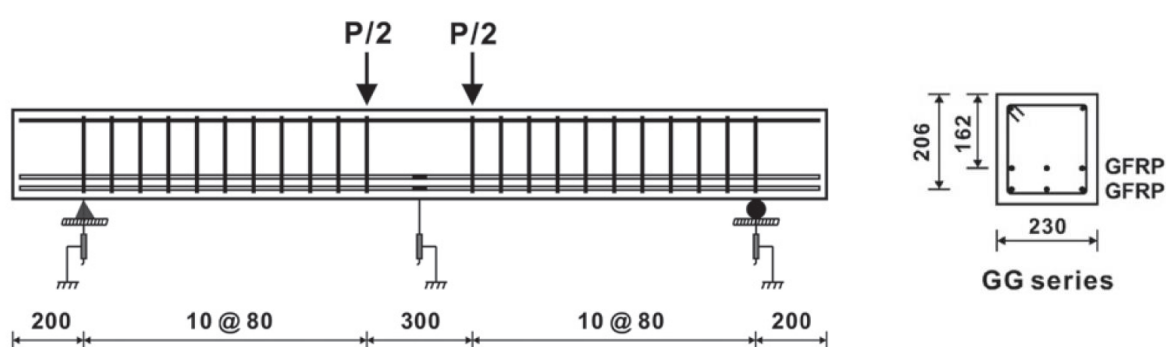
O comportamento de fissuração das vigas FRC em termos de espaçamentos e números foi melhorado nas fases de serviço e carregamento final em comparação com a viga de concreto simples. O efeito das fibras de basalto no controle do número de fissuras foi ligeiramente melhor do que o das fibras sintéticas particularmente no estágio de carga de serviço. Largura de fissura estavam de acordo com o limite especificado pela norma ACI440-1R-06.

Yang *et al.* (2012) estudaram o efeito de fibras no comportamento de vigas de concreto armado com barras de FRP. Barras de polímeros reforçado com fibra de

vidro (GFRP) foram utilizadas como armadura longitudinal, além de fibras descontínuas de aço e sintéticas de poliolefina.

Ensaíram-se seis vigas de seção transversal de 230 x 250 mm e 2300 mm de comprimento, como pode ser visto na Figura 15. As principais variáveis analisadas foram a armadura longitudinal (GFRP e CFRP) e a fibra (aço e poliolefina). A Tabela 9 apresenta os detalhes das amostras ensaiadas.

Figura 15. Detalhamento e seção transversal das vigas ensaiadas.



Fonte: Yang *et al.* (2012).

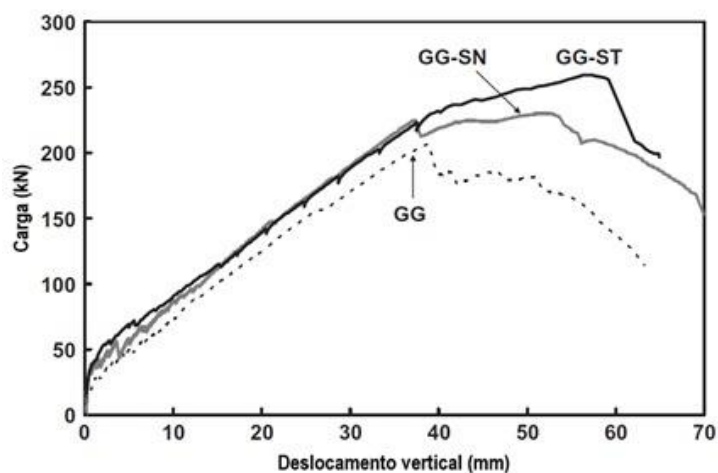
Tabela 9. Detalhe das vigas.

ID viga	Barra	Af (mm ²)	Tipo de fibra	Vf (%)
GG	GFRP	762	-	0,0
GG-SN	GFRP	762	Sintética	2,0
GG-ST	GFRP	762	Aço	1,0

Fonte: Adaptado de Yang *et al.* (2012).

A Figura 16 apresenta o gráfico de Carga x Flecha. A Tabela 10 apresenta um resumo das cargas e das flechas na formação da primeira fissura e na carga máxima para todas as vigas ensaiadas. Todas as vigas apresentaram comportamento similar, alta rigidez, até o surgimento da primeira fissura. As vigas com adição de fibra mostraram maior carga de fissuração do que as vigas de concreto sem fibra, indicando que houve um aumento da resistência à tração. Com relação à série GG, todas as vigas romperam por esmagamento do concreto e a carga última das vigas GG-SN e GG-ST foram 11% e 25% maiores, respectivamente, do que a viga GG.

Figura 16. Gráfico de carga e deslocamento da série GG.



Fonte: Yang *et al.* (2012).

Tabela 10. Resumo dos resultados dos ensaios da série GG.

ID viga	P_{cr} (kN)	Δ_{cr} (mm)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	Modo de ruptura
GG	23	0,67	207	38,85	Compressão
GG-SN	35	0,65	230	50,88	Compressão
GG-ST	39	0,79	259	56,19	Compressão

Fonte: Adaptado de Yang *et al.* (2012).

Em suma, a adição de fibra adiou o início da fissuração e diminuiu a abertura de fissuras. As cargas iniciais de fissuração dos corpos de prova com fibra de aço foram maiores em duas vezes do que a viga GG. Devido ao aumento da deformação compressiva e do comportamento pós pico mais suavizado do concreto com fibra, as vigas de concreto armado com barras de GFRP com fibra de aço e sintética exibiram comportamentos inelásticos e dúcteis próximos à ruptura e maior capacidade de carga do que a viga de concreto sem fibra. Os índices de ductilidade das vigas GFRP com fibras de aço e fibras sintéticas foram aproximadamente 70% e 80% maiores, respectivamente, do que o índice de ductilidade das vigas GFRP sem fibras. A adição de fibras pode ser um método possível para superar a baixa ductilidade das vigas reforçadas com barras de FRP.

2.3 Confinamento do concreto

O confinamento pode ser utilizado em elementos estruturais visando aumentar a resistência, melhorar a ductilidade de elementos de concreto e suportar ações sísmicas ou cíclicas. Pode ser feito por meio de estribos circulares, quadrados, retangulares, armadura transversal contínua (helicoidal, envoltórios de FRP e tubos de aço). A importância do confinamento pode ser observada em elementos estruturais altamente carregados, em que este carregamento inicia um processo de fissuração provocado por deformações transversais normais ao carregamento. As deformações transversais do elemento são impedidas pela armadura transversal, assim, o elemento estrutural aumenta sua capacidade de carga e ganha ductilidade (HAO; FENG; ZHENG, 2021; DELALIBERA, 2002).

Delalibera e Giongo (2008) estudaram vigas de concreto superarmadas com a utilização de confinamento, que consiste de estribos quadrados, localizados na zona de compressão da viga, como meio de melhorar a ductilidade. Como resultado, observaram que, com o aumento da taxa volumétrica da armadura transversal de confinamento, houve um aumento do índice de ductilidade pós-pico. A armadura de confinamento, além de aumentar a ductilidade dos elementos estruturais, também aumenta a resistência à compressão do concreto do interior do núcleo de confinamento, sendo este aumento, proporcional ao aumento da taxa volumétrica de armadura de confinamento.

Matos *et al.* (2012) realizaram um estudo experimental sobre o comportamento de vigas hiperestáticas de concreto armado com barras de GFRP. Para melhorar a ductilidade, avaliou-se a eficácia do confinamento de concreto na seção transversal crítica. Os resultados dos ensaios mostraram que, aumentando o confinamento de concreto na seção crítica, tanto a resistência quanto a ductilidade de vigas hiperestáticas de concreto armado com GFRP aumentaram. Esse melhor desempenho foi alcançado ao reduzir o espaçamento entre os estribos na região crítica, dessa forma, apresentando maior resistência e estendendo sua capacidade de deformação.

Basa, Ulicevic e Zejak (2018) realizaram uma pesquisa com o objetivo de estimar a possibilidade de vigas contínuas de concreto armado com GFRP de

redistribuir forças internas, de forma a melhorar a ductilidade. Para isso, variou-se a taxa de reforço transversal no meio do vão. Obteve-se como resultado que o aumento de reforço de GFRP no meio do vão, em relação aos momentos, não houve influência negativa na capacidade de carga e influenciou principalmente na redução da flecha.

2.4 Dimensionamento de vigas armadas com FRP

2.4.1 ACI 440-1R-15

No dimensionamento de vigas armadas com FRP, o momento resistente (M_n), multiplicado por um coeficiente (ϕ) que depende do tipo de falha do elemento, deve ser maior do que o momento calculado (M_u), garantindo com segurança que a capacidade resistente não será menor que as solicitações, como apresenta a Equação 1.

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

A capacidade à flexão de elementos reforçados com FRP depende se é controlado pelo esmagamento do concreto ou ruptura da barra de FRP, que pode ser determinado comparando a taxa de armadura (ρ_f) pela taxa de armadura balanceada (ρ_{fb}), que é uma razão em que o esmagamento do concreto e a ruptura da FRP ocorrem simultaneamente. A taxa de armadura pode ser determinada por meio da Equação 2 e a taxa de armadura balanceada pela Equação 3.

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

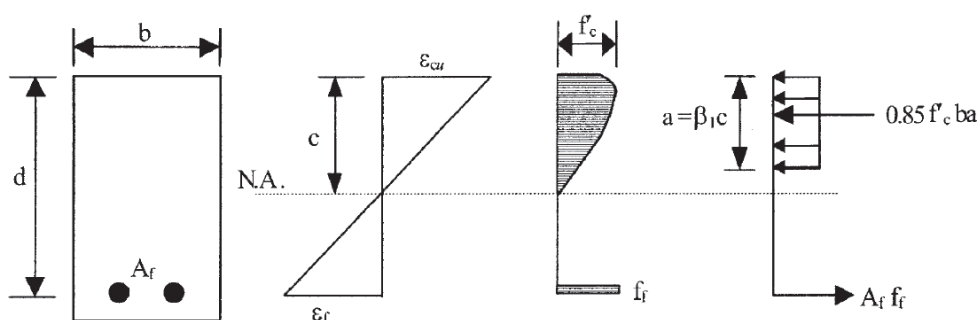
$$\rho_{fb} = 0,85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (3)$$

Na Equação 2, A_f é a área das barras de FRP em mm², b a largura da viga de concreto em mm e d altura útil da viga de concreto em mm. Na Equação 3, β_1 é um fator de redução (0,85 para concretos de resistência característica menor ou igual a 27,6 MPa, reduzindo 0,05 a cada 6,9 MPa), f'_c resistência à compressão do concreto

em MPa, E_f o módulo de elasticidade da barra de FRP, f_{fu} resistência à tração de cálculo da barra de FRP e ε_{cu} a deformação última do concreto.

Quando a taxa de armadura é maior do que a balanceada ($\rho_f > \rho_{fb}$), ocorre a ruptura por esmagamento do concreto e o diagrama de tensões pode ser aproximado para uma forma retangular. Baseado no equilíbrio de forças e compatibilidade das deformações, apresentado na Figura 17, obteve-se as Equações 4 e 5 para a determinação da tensão de tração na barra e o momento resistente nominal, respectivamente.

Figura 17 - Diagrama retangular aproximado para esmagamento do concreto



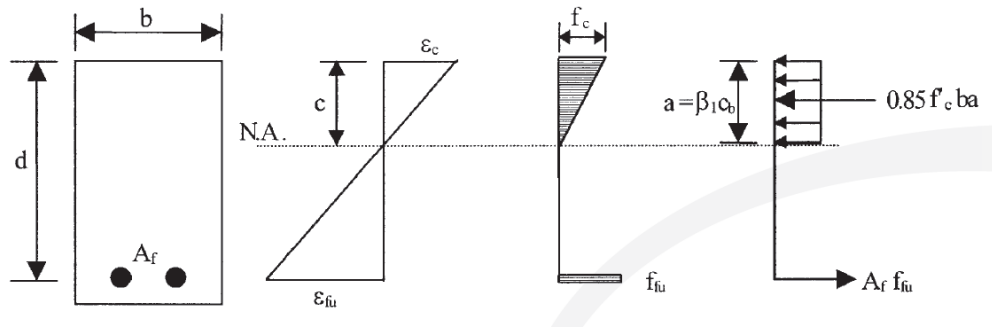
Fonte: ACI 440.1R (2015).

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

$$M_n = \rho_f f_f \left(1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2 \quad (5)$$

Se a taxa de armadura é menor do que a taxa balanceada ($\rho_f < \rho_{fb}$) ocorre a ruptura da barra de FRP. Nesse caso no diagrama de tensões não é aplicável o parâmetro de blocos retangulares equivalentes, visto que a deformação máxima do concreto pode não ser alcançada ($\varepsilon_c < \varepsilon_{cu}$). Então, seria necessário um diagrama equivalente, como mostra a Figura 18, usando o parâmetro do bloco de tensões retangulares equivalente que aproxima o centroide da distribuição de tensões no concreto no nível de deformação atingido. A resistência nominal à flexão pode ser dada pelas Equações 6 e 7.

Figura 18 – Diagrama equivalente para ruptura da barra de FRP.



Fonte: ACI 440. 1R (2015).

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) \quad (6)$$

$$c_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d \quad (7)$$

O fator de redução da resistência (ϕ) pode ser calculado por meio da Equação 8.

$$\text{Para } \rho_f \leq \rho_{fb} \quad \phi = 0,55$$

$$\text{Para } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4 \rho_{fb} \quad \phi = 0,3 + 0,25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \quad (8)$$

$$\text{Para } \rho_f \geq 1,4 \rho_{fb} \quad \phi = 0,65$$

2.4.1.1 Estado limite de serviço

Para a seção não fissurada considera-se o momento de inércia como o momento de inércia bruto I_g . A fissuração acontece quando o momento máximo de ação da carga de serviço (M_s) excede o momento de fissuração (M_{cr}), ocasionando a redução na rigidez do elemento. O momento de inércia da seção fissurada (I_{cr}) de uma seção retangular pode ser calculada para uma seção fissurada transformada utilizando uma análise elástica dada pela Equação 9 e Equação 10.

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3}k^3 + n_f A_f d^2 (1 - k)^2 \quad (9)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (10)$$

Onde η_f corresponde à razão entre o módulo de elasticidade das barras de FRP e o módulo de elasticidade do concreto.

A rigidez à flexão global E_{cl} de um elemento fissurado varia entre E_{clg} e E_{clcr} , dependendo da magnitude do momento de serviço aplicado e a extensão de fissuração ao longo do elemento. Branson (1965) apresentou o conceito de um momento de inércia efetivo (I_e) permitindo uma transição gradual de I_g a I_{cr} . Bischoff (2005) propôs uma expressão alternativa para o momento de inércia efetivo (I_e) que pode ser aplicada para elementos de concreto armado com aço e FRP, sem a necessidade de fatores de correção empíricos. A Equação 11 mostra a expressão de Bischoff (2005) modificada para incluir um fator adicional γ para explicar a variação da rigidez ao longo do comprimento do elemento. Esse fator depende da carga e das condições de contorno, responsável pelo comprimento das regiões não fissuradas do elemento e pela mudança na rigidez nessa mesma região. Pode ser obtido por meio da formulação $\gamma = 1,72 - 0,72(M_{cr}/M_a)$ que é o resultado da integração da curvatura ao longo do comprimento de uma viga simplesmente apoiada com uma carga uniformemente distribuída. O momento de fissuração pode ser calculado utilizando a Equação 12.

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2 \left[1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right]} \leq I_g \text{ onde } M_a \geq M_{cr} \quad (11)$$

$$M_{cr} = \frac{0,62\lambda\sqrt{f'_c}I_g}{y_t} \quad (12)$$

As flechas de curta duração (deflexão instantânea sob a ação de cargas de serviço) de um elemento armado com FRP podem ser calculadas utilizando o

momento efetivo de inércia do elemento juntamente com as técnicas de análise estrutural usuais.

2.4.2 Prática recomendada IBRACON/ABECE (2021)

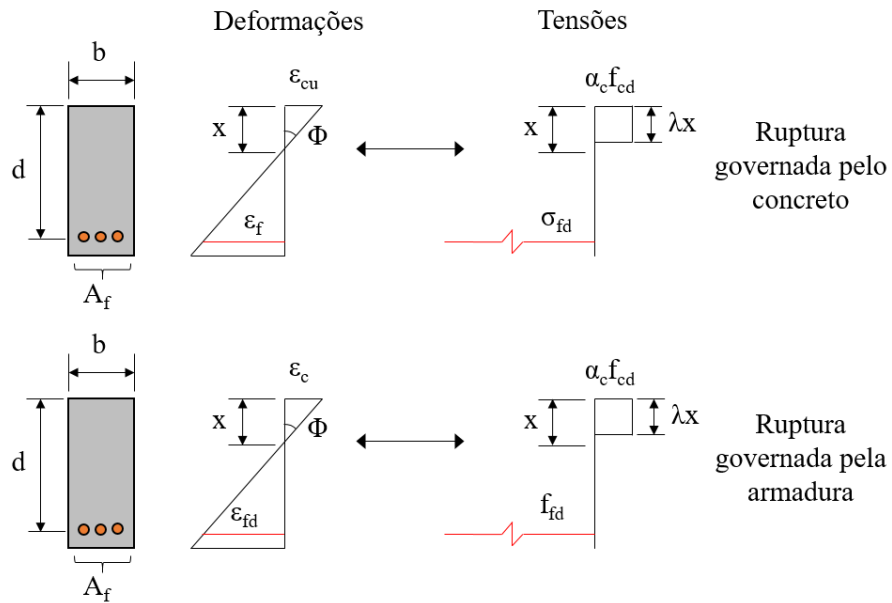
Para elementos estruturais armados com barras de FRP submetidos à flexão, segundo a Prática Recomendada IBRACON/ABECE do comitê técnico CT-303, é apresentado duas condições possíveis de dimensionamento, com ruptura devido ao esmagamento do concreto ou pela ruptura da barra, que pode ser vista na Figura 19. O que determina o comportamento é a relação entre taxa de armadura (ρ_f), calculada pela Equação 13, e a taxa de armadura balanceada (ρ_{fb}), que é a taxa de armadura pela qual ocorre a transição entre os modos de falha, obtida pela Equação 14.

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (13)$$

$$\rho_{fb} = \lambda \alpha_c \frac{f_{cd}}{f_{fd}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fd}} \quad (14)$$

Onde A_f é a área das barras de FRP, b a largura da viga de concreto e d altura útil da viga de concreto na Equação 13. Na Equação 14, para concretos do Grupo I de resistência (até 50 MPa) e seções transversais retangulares, $\alpha_c = 0,85$ e $\lambda = 0,8$, f_{cd} resistência à compressão do concreto em MPa, E_f o módulo de elasticidade da barra de FRP, f_{fd} resistência à tração de cálculo da barra de FRP e ε_{cu} a deformação última do concreto à compressão.

Figura 19. Configurações na ruptura de vigas submetidas à flexão.



Fonte: Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

Determinado o modo de ruptura, define-se a profundidade da linha neutra partir da Equação 15 ou Equação 16.

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

$$x = \frac{f_{fd} A_f}{\lambda \alpha_c f_{cd} b} \quad (15)$$

Para $\rho_f > \rho_{fb}$

$$x = \frac{1}{2b} \frac{\varepsilon_{cu} A_f E_f}{\lambda \alpha_c f_{cd}} \left(-1 + \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda \alpha_c f_{cd}}{\varepsilon_{cu} A_f E_f} b d} \right) \quad (16)$$

A tensão na armadura pode ser obtida pelas Equações 17 ou 18.

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

$$\sigma_{fd} = f_{fd} \quad (17)$$

Para $\rho_f > \rho_{fb}$

$$\sigma_{fd} = \frac{xba_c \lambda f_{cd}}{A_f} \quad (18)$$

Com a Equação 19 pode-se obter o momento resistente.

$$M_{Rd} = \sigma_{fd} A_f \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right) \quad (19)$$

2.4.2.1 Estado limite de serviço

A flecha imediata das vigas de concreto armado com barras de FRP pode ser determinada considerando rigidez equivalente, a partir da fórmula de Branson modificada, pela Equação 20.

$$(EI)_{eq,t0} = E_{cs} \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \beta_d I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c \quad (20)$$

Onde o M_r é o momento de fissuração na seção crítica determinado conforme NBR6118 (2014), M_a é o momento solicitante na seção crítica, I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto, I_{II} é o momento de inércia no estágio II e β_d é um coeficiente redutor tomado como na Equação 21.

$$\beta_d = \frac{1}{5} \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \leq 1,0 \quad (21)$$

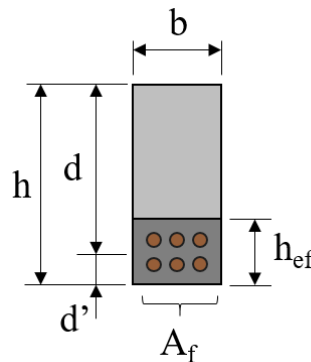
E ρ_f e ρ_{fb} são as taxas de armadura adotada e balanceada na seção crítica, respectivamente.

A abertura de fissura característica em vigas de concreto armado com barras de FRP segue as recomendações do Fib Model Code 2010 e pode ser determinada pela Equação 22.

$$w_d = \frac{2}{E_f} \left(1 * c + \frac{1}{4} * \frac{f_{ctm}}{\tau_b} * \frac{\varphi_f}{\rho_{ef}} \right) \left[\sigma_s - 0,6 * \frac{f_{ctm}}{\rho_{ef}} \left(1 + \frac{E_f}{E_c} \rho_{ef} \right) \right] \quad (22)$$

Onde σ_f é a tensão na armadura no estágio II para combinação frequente de ações, f_{ctm} é a resistência à tração média do concreto, c é o cobrimento nominal da armadura, φ_f é o diâmetro da armadura longitudinal, τ_b é a tensão de aderência nominal, que pode ser tomada como 1,3 vezes a resistência de aderência característica f_{bk} ($f_{bk} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 f_{ctk,inf}$), $\rho_{ef} = A_f / (b h_{ef})$ é a taxa de armadura efetiva, determinada como a razão entre a área de armadura na zona tracionada, A_f , e a área de concreto efetiva circundante, $b \cdot h_{ef}$, conforme mostrado na Figura 20, com h_{ef} obtido como o menor valor dentre $2,5d'$ e $(h - x_{II})/3$.

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



Fonte: Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).

O uso de fibras para controle de fissuração é permitido e sua consideração na verificação da fissuração pode ser feita através da substituição de f_{ctm} por $(f_{ctm} - f_{Ftsm})$ na Equação 22, onde f_{Ftsm} , pelo fib Model Code 2010, pode ser obtido pelas Equações 23 e 24.

$$f_{Ftsm} = f_{Ftsk} / 0,7 \quad (23)$$

$$f_{Fts} = 0,45 f_{R1} \quad (24)$$

3 METODOLOGIA

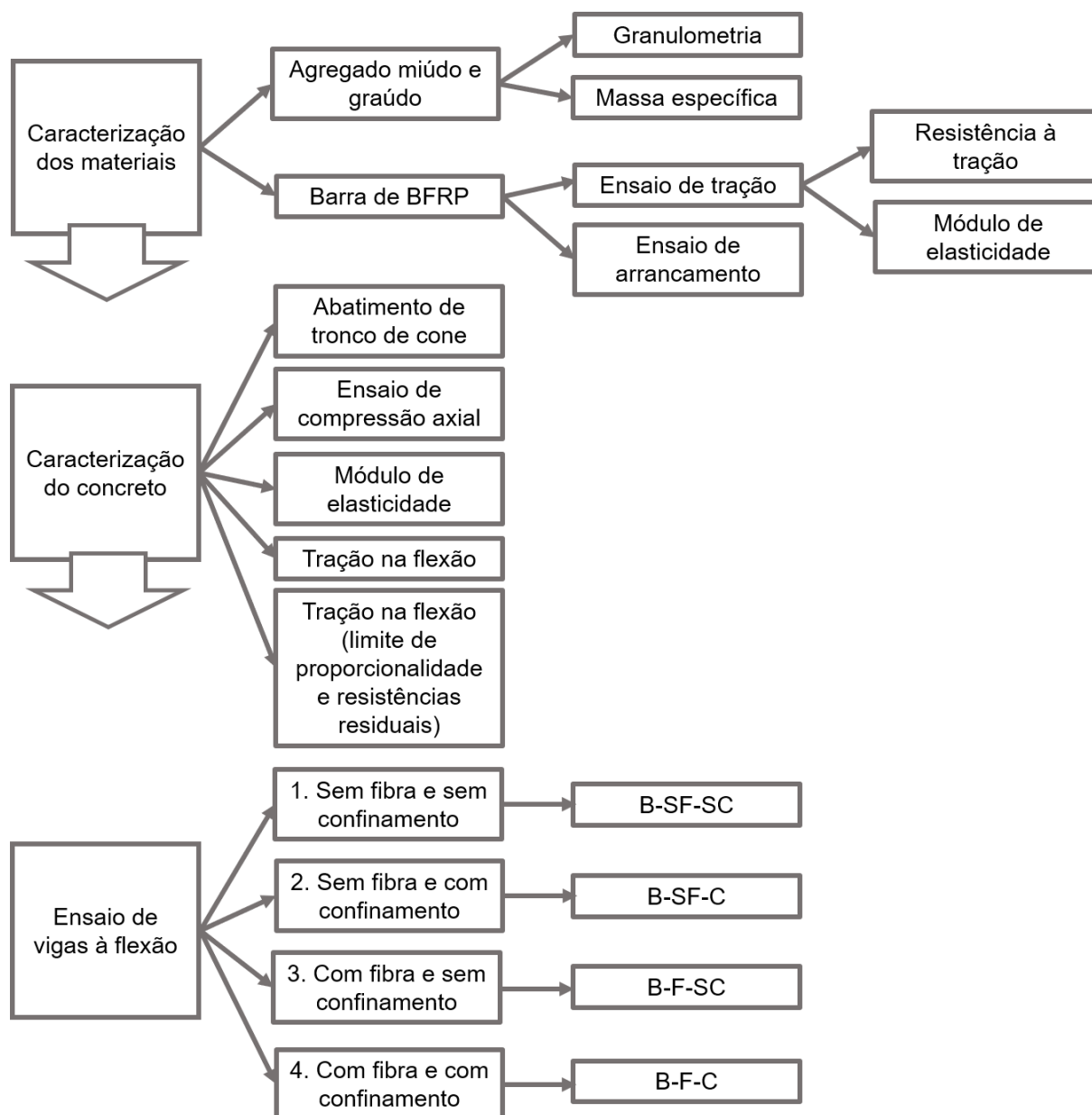
Neste capítulo são apresentados os ensaios de caracterização física dos materiais componentes do concreto, o traço empregado nesta pesquisa, as propriedades mecânicas das barras de BFRP e os procedimentos experimentais desenvolvidos, baseados em normas técnicas da ABNT e ASTM.

A Figura 21 apresenta um fluxograma apresentando as etapas adotadas do programa experimental. A primeira etapa do programa experimental consiste em ensaios de caracterização dos materiais constituintes do concreto, sendo agregados miúdo e graúdo com ensaios de composição granulométrica e massa específica, especificações do fabricante sobre as propriedades do cimento, aditivo e fibra sintética descontínua e, então ensaios das propriedades mecânicas das barras de BFRP, incluindo ensaios de resistência à tração, módulo de elasticidade e arrancamento para determinação da aderência das barras ao concreto.

Na segunda etapa realizaram-se os ensaios de propriedade mecânica do concreto utilizado na moldagem do ensaio de arrancamento e das vigas, incluindo ensaio de compressão axial, módulo de elasticidade, tração na flexão e resistência à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais).

A terceira etapa abrange os ensaios de vigas de concreto armado com BFRP submetidos à flexão em um ensaio de quatro pontos com a adição de fibras descontínuas e executando o confinamento do concreto na região central.

Figura 21. Fluxograma do programa experimental.



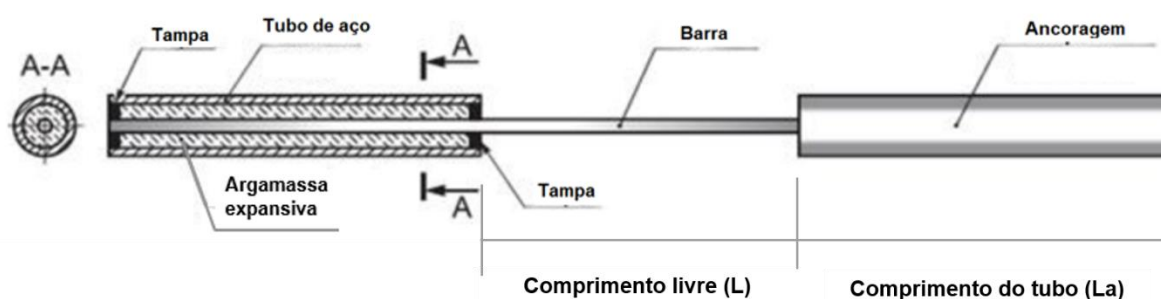
3.1 Caracterização das barras

Neste capítulo serão descritos os ensaios de caracterização das propriedades mecânicas das barras de polímeros reforçados com fibra de basalto: ensaio de resistência à tração e módulo de elasticidade, baseados nas especificações da ASTM D7205/D7205-06 (ASTM, 2016) e ensaio de arrancamento para a determinação da aderência da barra ao concreto, com base nas recomendações da ASTM D7913/D7913-14 (ASTM, 2014).

3.1.1 Ensaio de resistência à tração e módulo de elasticidade.

Para a determinação das propriedades mecânicas das barras de BFRP foram realizados ensaios de resistência à tração e módulo de elasticidade e ensaiados cinco corpos de prova para cada diâmetro de barra de BFRP, com diâmetros nominais de $\varnothing 6$ mm, $\varnothing 8$ mm, $\varnothing 10$ mm e $\varnothing 12$ mm. A Figura 22 mostra um modelo de configuração do corpo de prova para o ensaio e a Tabela 11 apresenta as dimensões do corpo de prova utilizado, indicando o comprimento de ancoragem (L_a) e o comprimento livre (L).

Figura 22. Configuração do corpo de prova do ensaio de resistência à tração.



Fonte: GOST 31938 – Adaptada (2012).

Tabela 11. Dimensões dos corpos de prova do ensaio de resistência à tração.

Diâmetro comercial (mm)	Comprimento livre (L) (mm)	Comprimento do tubo (L_a) (mm)	Diâmetro do tubo schedule 40 (mm)
$\varnothing 6$	340	250	31,75
$\varnothing 8$	420	250	31,75
$\varnothing 10$	500	250	31,75
$\varnothing 12$	500	250	31,75

Como pode ser visto na Figura 22, as extremidades da barra foram ancoradas por tubos metálicos para não ocorrer esmagamento pelas garras da máquina de ensaio. Para a realização da ancoragem, mantendo o alinhamento da barra dentro do tubo, foi confeccionado um aparato de madeira, como mostra a Figura 23.

Figura 23. Aparato de madeira.



Como preenchimento dos tubos, foram feitos testes utilizando resina epóxi. No entanto, houve uma grande dificuldade no preenchimento dos tubos, o que acarretou em vazios e, conseqüentemente, escorregamento da barra durante o ensaio. Um segundo teste foi feito utilizando como material de preenchimento dos tubos a argamassa expansiva, usualmente empregada para demolição de rochas. O material foi aplicado na proporção de 1500 g de água para 5000 g do material pulverulento. Foi necessário colocar gelo ao redor dos tubos (Figura 24) para desacelerar o processo de cura da argamassa, para a moldagem das ancoragens. Não ocorreu o escorregamento das barras e a argamassa se mostrou eficiente para a ancoragem.

Figura 24. Gelo ao redor dos tubos.



A Figura 25 (a) apresenta a barra de BFRP posicionada para o ensaio na prensa hidráulica EMIC DL 30000F e a Figura 25 (b) mostra o extensômetro utilizado para a medição da deformação da barra durante a execução do ensaio, modelo EE-GL-10 N.203201, de base variável e deslocamento de 10 mm. O extensômetro foi retirado antes que ocorresse a ruptura da barra para a preservação do equipamento. A velocidade de ensaio adotada foi de 3 mm/min e o critério de parada foi o rompimento da barra.

Figura 25. Posicionamento do corpo de prova (a) e extensômetro utilizado (b).



(a)



(b)

Para o cálculo de resistência à tração e módulo de elasticidade é necessário a determinação da área efetiva da seção transversal das barras. Seguindo a norma ASTM D7205/D7205-06, a área nominal pode ser calculada como a média de 5 corpos de prova cortados do mesmo lote de barra usada para o ensaio. Entretanto, devido a limitação na quantidade de barras para a realização da caracterização, foi possível utilizar apenas 3 corpos de prova para a determinação da área efetiva.

O volume de cada corpo de prova deve ser medido indiretamente pela diferença na massa nos estados seco e totalmente imerso. O volume da amostra é a massa

dividida pela densidade medida. A área nominal é então determinada dividindo o volume pelo comprimento médio do corpo de prova. A Figura 26 apresenta os materiais utilizados para a determinação da área nominal das barras. As barras ensaiadas devem atender as dimensões e áreas conforme apresentado na Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) mostradas na Tabela 12.

Figura 26. Materiais utilizados para a determinação da área efetiva.



Tabela 12. Diâmetros e áreas nominais de barras reforçadas com fibra.

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

Fonte: Prática Recomendada IBRACON/ABECE – Adaptada (2021).

Para a determinação da resistência à tração, conforme descrito na norma ASTM D7205/D7205-06 (ASTM, 2016), é utilizado a Equação 25.

$$F_{tu} = P_{max}/A \quad (25)$$

Onde:

F_{tu} = Resistência à tração (MPa)

P_{max} = Carga máxima antes da ruptura (N)

A = Área da seção transversal da barra (mm²)

O módulo de elasticidade é calculado a partir dos dados de tensão-deformação utilizando a Equação 26. A faixa de determinação deve estar contida na metade inferior da curva de tensão-deformação, com o ponto inicial sendo uma deformação de 0,001 mm/mm e o ponto final com uma deformação de 0,003 mm/mm.

$$E = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon \quad (26)$$

Onde:

E = módulo de elasticidade (MPa)

$\Delta\sigma$ = diferença na tensão de tração aplicada entre os pontos de deformação inicial e final

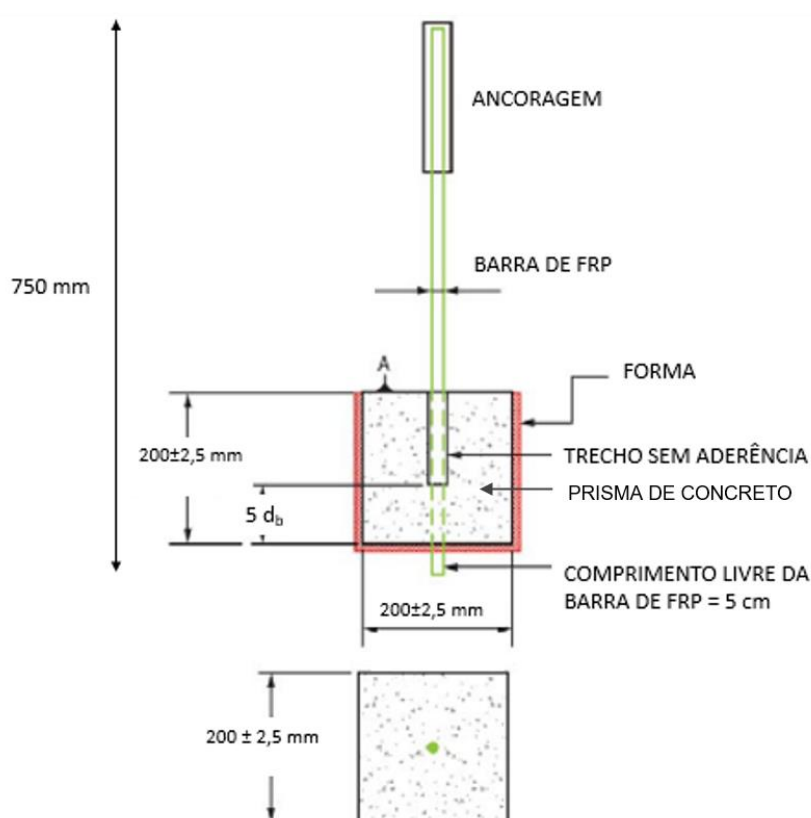
$\Delta\varepsilon$ = diferença na deformação de tração média entre os pontos de deformação inicial e final no limite inferior e superior da faixa de deformação selecionada.

3.1.2 Ensaio de arrancamento

Para avaliação da aderência das barras de BFRP ao concreto foi realizado ensaio de arrancamento baseado nas recomendações da norma ASTM D7913/D7913-14 (Revisada 2020). Foram ensaiadas cinco barras de 10 mm de diâmetro de BFRP, que serão utilizadas como armadura longitudinal das vigas. A Figura 27 apresenta a configuração do corpo de prova utilizado no ensaio. Utilizou-se corpo de prova de concreto de dimensões 200 x 200 x 200 mm e comprimento de

ancoragem de 5ϕ . Fora dessa seção, a barra foi revestida com tubo plástico flexível para evitar o contato com o concreto. Assim como no ensaio de resistência à tração, citado no item 3.1.1, para a barra de BFRP é necessário a ancoragem por tubos metálicos na extremidade livre a fim de que não ocorra seu esmagamento durante a realização do ensaio. Segundo a norma ASTM D7913/D7913M-14, as barras devem ter comprimentos de modo que a extremidade carregada seja de 1200 mm. No entanto, devido às limitações de tamanho do vão livre da máquina de ensaio, as barras ficaram com comprimento final de 750 mm.

Figura 27. Configuração do corpo de prova do ensaio de arrancamento.



Fonte: Adaptado da ASTM D7913/D7913M-14.

O traço e a dosagem do concreto utilizados no ensaio de arrancamento podem ser vistos no item 3.2.1. A preparação das fôrmas com o posicionamento das barras e a colocação do tubo plástico foram realizados conforme a Figura 28 (a) e a Figura 28 (b) mostra a concretagem dos corpos de prova.

Figura 28. Preparativos para o ensaio (a) e concretagem dos corpos de prova (b).



(a)



(b)

Os ensaios foram realizados aos 28 dias. A Figura 29 apresenta o posicionamento do corpo de prova na máquina de ensaio EMIC DL30000F. A velocidade de ensaio adotada foi de 1,3 mm/s com critério de parada determinado pela queda brusca da carga aplicada.

Figura 29. Posicionamento do corpo de prova.



Para o cálculo da tensão de aderência é utilizado a Equação 27, conforme descrito na norma ASTM D72913/D7913M-14.

$$\tau = \frac{F}{C_b l} \quad (27)$$

Onde:

τ = Tensão de aderência média (MPa)

F = Força de tração (N)

C_b = Circunferência efetiva da barra (mm), onde $C_b = \pi d_b$

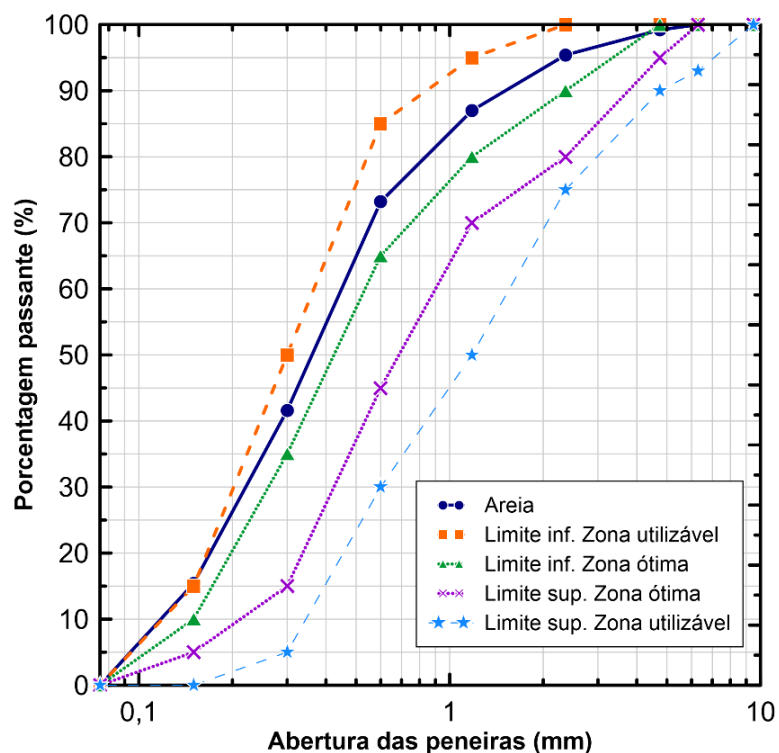
l = Comprimento de aderência (mm)

3.2 Caracterização dos materiais

Neste capítulo apresenta-se os ensaios de caracterização física dos materiais componentes do concreto, o traço empregado nesta pesquisa e os procedimentos experimentais desenvolvidos, baseados nas suas respectivas normas técnicas da ABNT que estão descritas abaixo.

- a) O ensaio de granulometria da areia foi realizado seguindo as normas NBR NM248 (ABNT, 2003a) e NBR 7211 (ABNT, 2009a). Os resultados obtidos do ensaio de granulometria podem ser vistos na Figura 30.

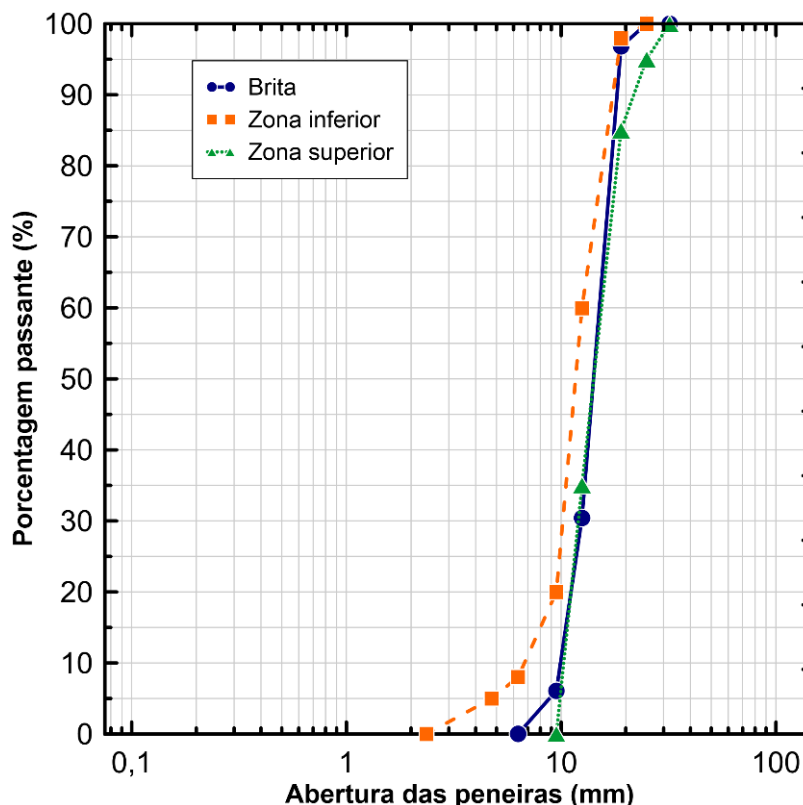
Figura 30. Granulometria da areia.



O agregado miúdo utilizado possui dimensão máxima de 4,75 mm e seu módulo de finura é de 1,88. Dessa forma, o módulo de finura do agregado está dentro da zona utilizável inferior (varia de 1,55 a 2,20), conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009a). A determinação da massa específica foi executada segundo prescrito na norma NBR 16916 (ABNT, 2021) e foi obtido o valor de 2,61 g/m³.

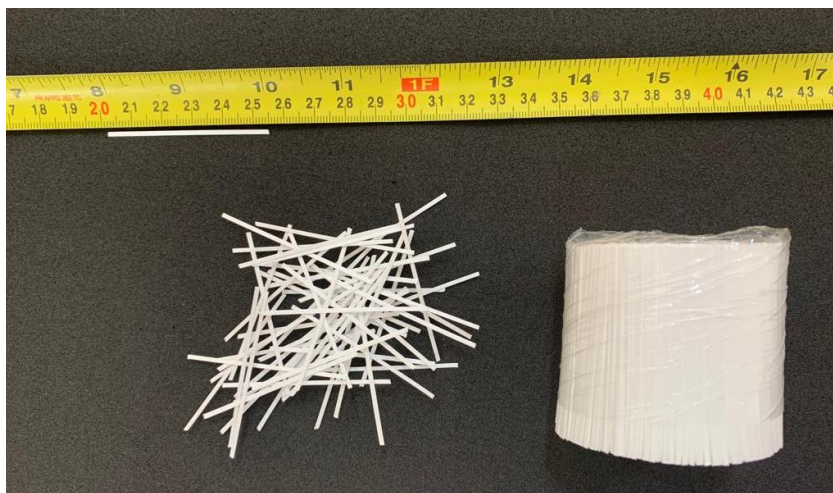
- b) O ensaio de granulometria para o agregado graúdo foi realizado conforme descrito na NBR NM248 (ABNT, 2003a). A Figura 31 apresenta o resultado obtido para a brita ensaiada e utilizada para a moldagem das vigas, junto com limites inferior e superior, segundo a norma.

Figura 31. Granulometria da brita.



O agregado graúdo possui dimensão máxima de 19 mm e seu módulo de finura é de 6,99. O agregado graúdo está dentro dos limites especificados por norma (9,5/25,0 para brita 1). A determinação da massa específica foi executada conforme prescrito na norma NBR 16917 (ABNT, 2021), obtendo o valor de 2,74 g/cm³.

- c) O cimento utilizado foi o CP V Ari de massa específica de 2,99 g/cm³, de acordo com o fabricante.
- d) O aditivo utilizado tinha base em policarboxilato, desenvolvido para dar trabalhabilidade sem causar segregação ao concreto, de massa específica de 1,06 kg/m³.
- e) As fibras descontínuas utilizadas foram as macrofibras de polipropileno de 54 mm de comprimento (Figura 32), álcali resistente e não corrosivo. Foram utilizados um teor de 1% em relação ao volume de concreto, na proporção de 9,1 kg por metro cúbico de concreto. Como caracterização das fibras, considera-se os valores fornecidos pelo fabricante, que consta na Tabela 13.

Figura 32. Fibras de polipropileno.**Tabela 13.** Propriedades da fibra de polipropileno fornecido pelo fabricante.

Classe de fibra	Massa específica (g/cm ³)	Comprimento (mm)	Resistência à tração (MPa)
EM 14889-2 Class II	0,91	54	550

Fonte: Kordsa The Reinforcer.

O traço foi executado a partir do traço unitário em massa 1:2,02:2,5:0,5, indicando a proporção de 1 parte de cimento por 2,02 partes de areia e 2,5 partes de brita, com 0,5 de relação água cimento, atendendo o Grupo 1 de resistência do concreto. A Tabela 14 apresenta o traço unitário em massa utilizado para 1 m³ de concreto. O traço 1 foi utilizado para o concreto do ensaio de arrancamento e da viga de concreto sem adição de fibra, enquanto o traço 2 descreve a dosagem do concreto utilizado na viga com adição de fibra.

Tabela 14. Dosagem do concreto.

Traço	Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)	Fibras (kg/m ³)
1	400,83	809,68	1002,10	200,42	0,4	-
2	400,83	809,68	1002,10	200,42	0,8	9,1

A moldagem do concreto foi realizada em dois dias diferentes, sendo um dia para a concretagem dos corpos de prova para o ensaio de arrancamento e em outro a concretagem das vigas.

O processo de mistura do concreto com fibra (traço 2) foi realizado da seguinte forma: o primeiro passo consiste da adição de todo agregado graúdo seco e 1/3 do volume de água, com o tempo de mistura de 2 minutos. Após, coloca-se todo o cimento e 1/3 do volume de água, misturando por mais dois minutos. Então acrescenta-se o agregado miúdo, o restante da água e metade das fibras, de maneira uniforme, por mais dois minutos. Depois, coloca-se o aditivo e mais 5 minutos do tempo de mistura e, por fim, adiciona-se a outra metade das fibras, de maneira uniforme, misturando por três minutos. Foi realizado o mesmo processo para o concreto sem fibra (traço 1), excetuando-se pela adição de fibra.

3.3 Ensaio de vigas submetidas à flexão

Esta etapa consiste na moldagem de quatro vigas ensaiadas aos 28 dias de idade, sendo uma viga de concreto armado com barras de BFRP sem confinamento (B-SF-SC), uma viga de concreto armado com barras de BFRP com confinamento (B-SF-C), uma viga de concreto armado com barras de BFRP com adição de fibra armado sem confinamento (B-F-SC) e uma viga com adição de fibra armado com barras de BFRP com confinamento (B-F-C).

O confinamento do concreto foi realizado por meio de estribos de aço de 6,3 mm de diâmetro, com menor espaçamento e no vão central da viga, entre pontos de aplicação de carga.

A identificação das vigas é feita da seguinte forma: a primeira letra da nomenclatura das vigas indica o material utilizado como armadura longitudinal, o BFRP, representado pela letra “B”, seguido de “SF” (sem adição de fibra) ou “F” (adição de fibra), finalizando com a presença de confinamento “C” ou ausência “SC”, por exemplo, “B-F-SC” representa a viga de concreto armado com barras de BFRP, com adição de fibras e ausência de confinamento.

3.3.1 Caracterização do concreto e moldagem das vigas

Para a caracterização do concreto foram realizados ensaios de consistência, resistência à compressão, tração na flexão, módulo de elasticidade e tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais), como pode ser visto na Tabela 15, que apresenta também a geometria do corpo de prova, quantidade e as respectivas normas utilizadas para a realização dos ensaios.

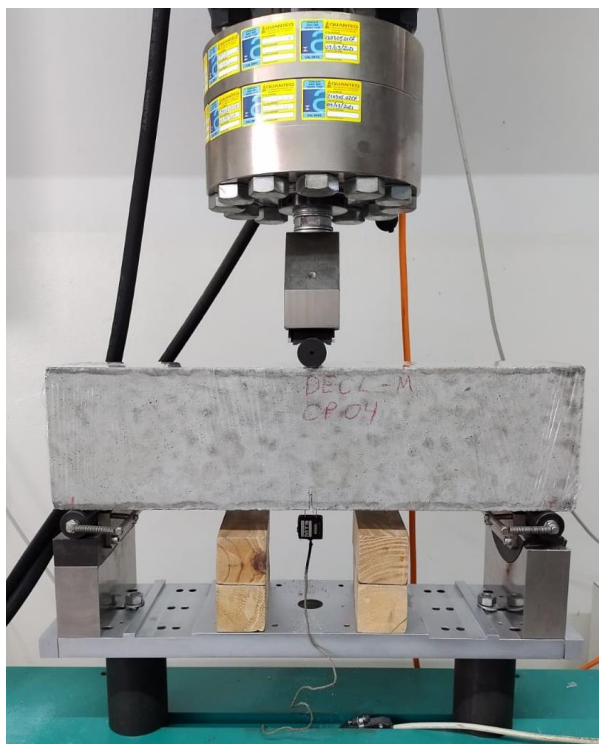
Tabela 15. Ensaios de caracterização do concreto para cada traço da segunda etapa.

Ensaio	Geometria do corpo de prova	Quantidade	Norma
Consistência	Estado plástico	-	NBR 16889/2020
Resistência à compressão	Cilíndrico (10cm x 20cm)	5	NBR 5739/2018
Tração na flexão	Prismático (10cm x 10cm x 40cm)	5	NBR 12142/2010
Módulo de elasticidade	Cilíndrico (10cm x 20cm)	5	NBR 8522/2017
Tração na flexão	Prismático (15cm x 15cm x 55 cm)	4	NBR 16940/2021

Para avaliar o limite de proporcionalidade e resistências residuais foi realizado o ensaio de tração na flexão em corpos de prova prismáticos de 150 x 150 x 550 mm, conforme descrito na Tabela 15. O entalhe localizado na região central da face inferior apresentava 25 mm de altura e tinha como objetivo a criação de uma região crítica para formação e propagação de fissura. O rolete de aplicação de carga é disposto no centro do prisma, na face superior e os apoios na parte inferior, distantes 500 mm

entre eles (Figura 33). O equipamento utilizado foi uma prensa dinâmica INTERMETRIC IM750SRV. A taxa de aumento da medida da abertura de fissura (CMOD) foi constante de 0,05 mm/min até $CMOD=0,1$ mm. A partir de $CMOD=0,1$ mm a taxa de aumento do CMOD foi constante de 0,20 mm/min.

Figura 33. Ensaio de tração na flexão.



A moldagem das vigas foi realizada em um único dia, sendo dividida em duas etapas de concretagem: traço de concreto com fibra e traço de concreto sem fibra. Os ensaios, tanto de caracterização do concreto quanto de flexão em quatro pontos, foram realizados aos 28 dias de idade.

O processo de cura para os corpos de prova executou-se em câmara úmida. Já as vigas foram mantidas nas fôrmas, sendo umedecidas diariamente, protegidas por mantas de drenagem e plásticos para manter a umidade, como pode ser vista na Figura 34.

Figura 34. Processo de cura das vigas.



3.3.2 Dimensionamento

O dimensionamento das vigas de concreto armado foi realizado conforme descrito na Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) e na ACI 440.1R-15 (ACI, 2015). Com os dados considerados apresentados no Apêndice A, verificou-se o dimensionamento com valores característicos dos materiais, apresentado na Tabela 16.

Tabela 16. Dimensionamento de acordo com a Prática Recomendada (2021) e ACI 440.1R-15.

	Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021)	ACI 440.1R-15 (ACI, 2015)
ρ_f	0,00842	0,00842
ρ_f/ρ_{fb}	2,04	2,44
Modo de ruptura	Esmagamento do concreto	Esmagamento do concreto
M_r (kNm)	50,90	46,72

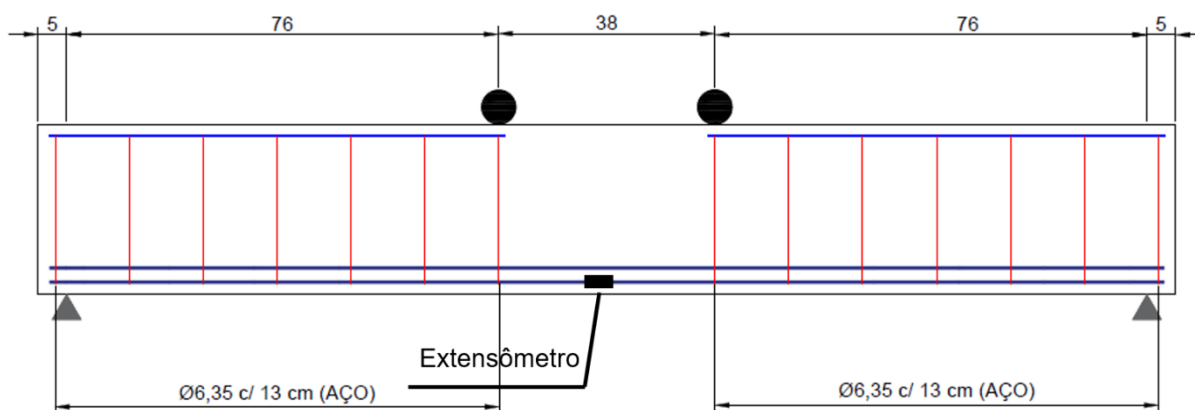
3.3.3 Detalhamento da armadura

O programa experimental inclui a moldagem de quatro vigas de concreto armado de seção transversal 15 x 30 cm e 200 cm de comprimento, submetidas à flexão em um ensaio de quatro pontos com vão livre de 190 cm. Para todas as vigas foram utilizadas barras de BFRP como armadura longitudinal, enquanto estribos e porta estribos foram empregadas barras de aço CA-50. Em duas vigas foram analisados o efeito do confinamento na região entre as cargas utilizando estribos de aço espaçados a menores distâncias. Nas duas restantes não foram aplicados estribos na região central da viga, como pode ser visto na Figura 35. A Figura 36 apresenta o detalhamento da armadura de vigas de concreto sem confinamento, enquanto a Figura 37 a viga de concreto com confinamento e a Figura 38 a seção transversal de todas as vigas.

Figura 35. Armadura das vigas sem confinamento (a) e com confinamento (b)

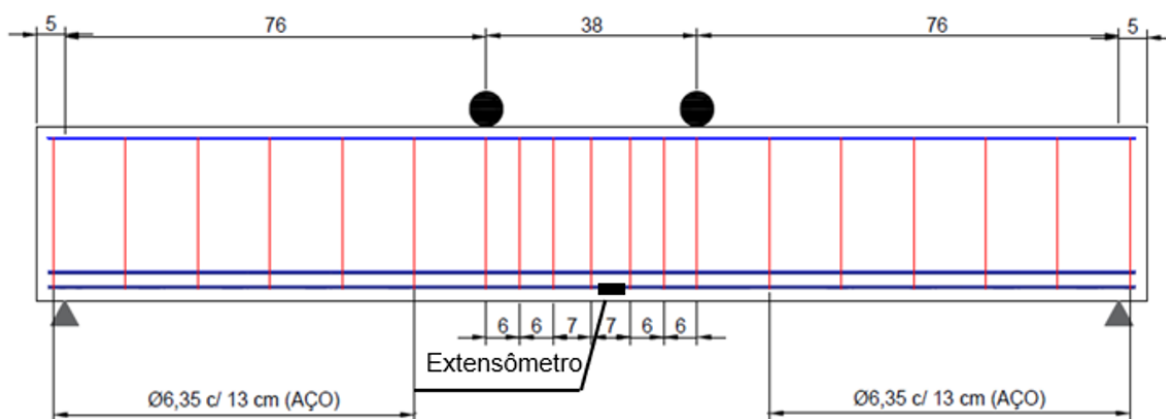


Figura 36. Detalhamento da viga de concreto sem confinamento.



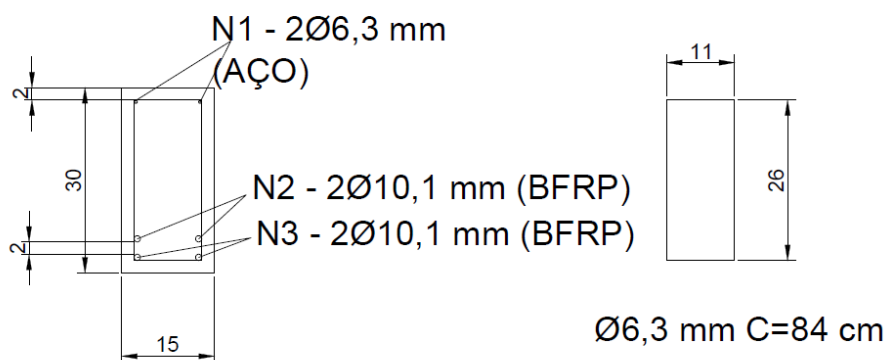
Unidade em cm

Figura 37. Detalhamento da viga de concreto com confinamento.



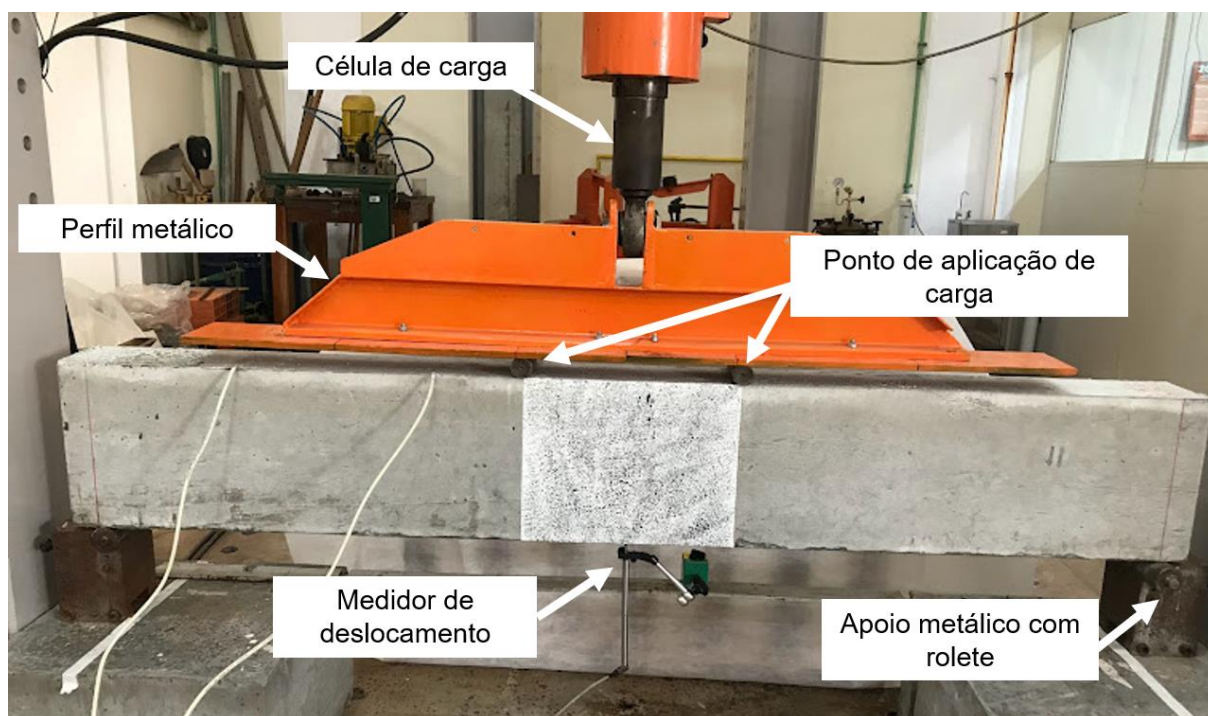
Unidade em cm

Figura 38. Seção transversal das vigas.



As vigas ensaiadas foram submetidas à flexão em um ensaio de quatro pontos, com os apoios posicionados a 5 cm da extremidade e os pontos de aplicação de carga distantes 76 cm. A Figura 39 apresenta o esquema de ensaio.

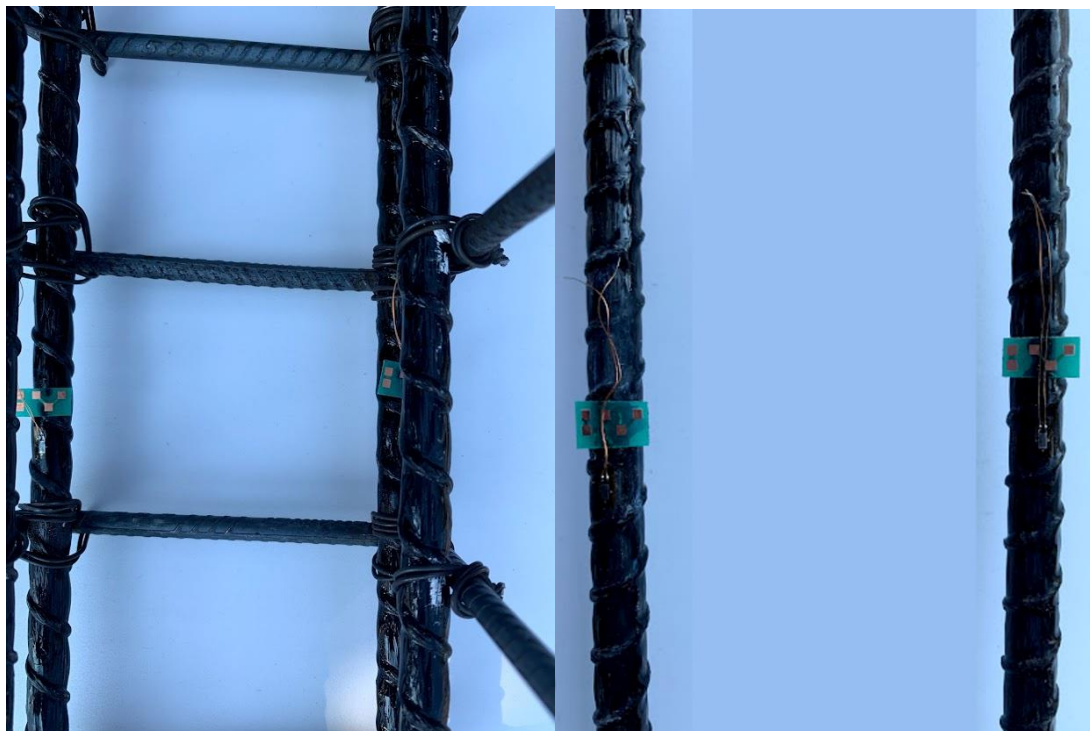
Figura 39. Esquema de ensaio.



3.3.4 Instrumentação

Para a realização da leitura dos resultados dos ensaios realizados nas vigas de concreto submetidas à flexão foi necessário a instrumentação das vigas. Para a leitura da deformação da armadura longitudinal foram aplicados extensômetros fixados nas barras longitudinais. Os extensômetros utilizados na armadura longitudinal eram do tipo PA-06-125BA-120-L, com resistência de 120Ω e sua aplicação pode ser vista na Figura 40. Para executar a colocação dos extensômetros é necessário retirar a resina da área em que será feita a aplicação utilizando lixa, remover qualquer resíduo na região com gaze e álcool e, por fim, aderir o extensômetro com cola instantânea de alta resistência e secagem rápida.

Figura 40. Extensômetro na barra.



A leitura da flecha é obtida pelo medidor de deslocamento 1-WA/50mm-T, com cursor máximo de deslocamento de 50 mm, posicionado ao centro da viga, como pode ser visto na Figura 41. E os resultados de deformação da armadura, deslocamento das vigas e carga aplicada são captados por meio do sistema de aquisição de dados Quantum X (DAQ) da fabricante HBM (Figura 42), que enviam as informações para o software catmanEasy. O ensaio à flexão em quatro pontos foi realizado em um pórtico de capacidade de 60 t.

Figura 41. Posicionamento do leitor de deslocamento (LVDT) na viga.

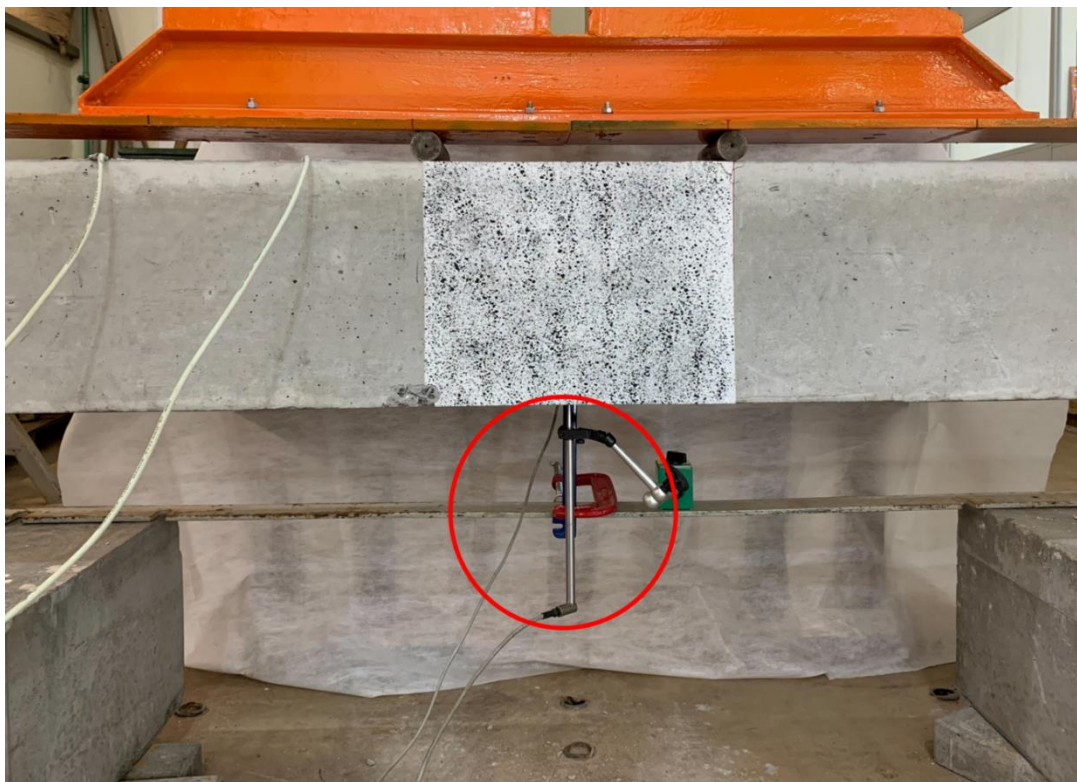
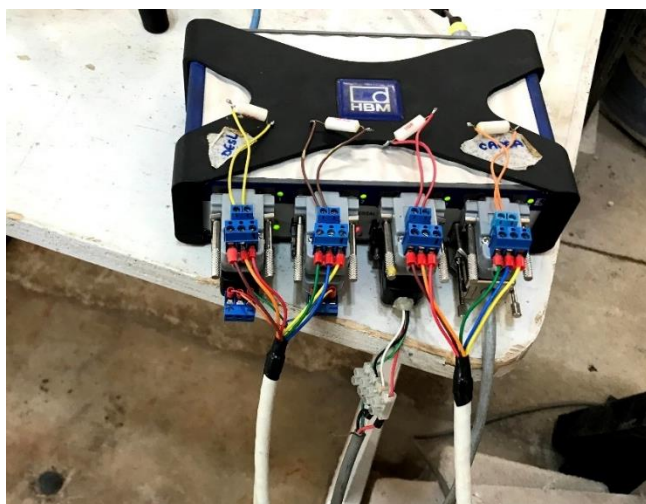


Figura 42. Sistema de aquisição de dados.



3.3.5 Correlação de imagem digital

Para o monitoramento dos deslocamentos das vigas e estudo da propagação de fissuras foi utilizado a correlação de imagem digital (Digital Image Correlation – DIC) no centro das vigas (380 x 300 mm), entre as aplicações de carga, por meio do software GOM Correlate. A técnica de correlação de imagem digital consiste no

registro e rastreamento de imagens da superfície de interesse com um conjunto padrão de pontos espaçados aleatoriamente.

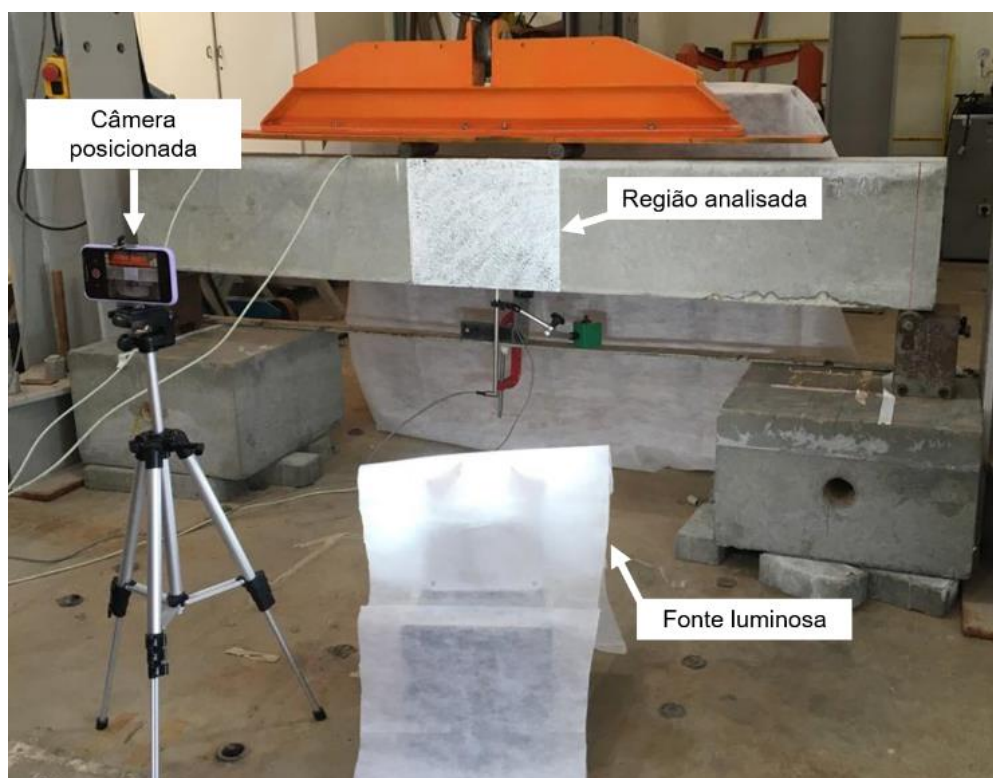
Na preparação das vigas para a correlação de imagem digital, realizou-se o processo de pintura da área com um padrão de fundo branco fosco e, após a secagem, um padrão de pontos pretos foscos espaçados aleatoriamente, mantendo a mesma proporção entre as cores branca e preta, sendo realizado com o auxílio de pincéis.

Na preparação das vigas para a correlação de imagem digital, inicialmente, realizou-se um processo de pintura da região com um padrão de fundo branco fosco com o uso de pincéis. Após a secagem da pintura, aplicou-se um padrão de pontos pretos foscos espaçados aleatoriamente. As cores preta e branca devem ser mantidas na mesma proporção, dessa forma, o software realiza a leitura da região analisada.

A captura das fotos foi feita pela câmera do celular de 12 megapixel e resolução 4608 x 2592 pixel, utilizando o aplicativo Lens Buddy, com intervalos de fotos a cada 5 segundos, iniciando em conjunto com a aquisição de dados, dessa forma, foi possível a associação entre as imagens e os valores experimentais.

A câmera foi ajustada em um tripé, capturando as imagens da área de interesse durante a execução do ensaio. Para evitar a variação de luminosidade na superfície da viga fotografada, utilizou-se uma fonte luminosa composta por lâmpadas de LED e posicionou-se um tecido de TNT atrás, de forma a obter uma luminosidade difusa, como mostra a Figura 43.

Figura 43. Esquema de ensaio para a captação de imagens.



4 RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados primeiramente os resultados dos ensaios de caracterização das barras de resistência à tração, módulo de elasticidade e arrancamento. Após os resultados de caracterização do concreto, serão mostrados os resultados do ensaio de flexão de vigas de concreto armado com barras de BFRP, com valores de flecha e carga máximas, modos de ruptura, deformação da armadura longitudinal, correlação de imagem digital de flecha e abertura de fissura e, por fim, a análise analítica, comparando valores experimentais aos determinados por normas.

4.1 Ensaio de resistência à tração e determinação do módulo de elasticidade

Para ensaios de resistência à tração e módulo de elasticidade das barras de BFRP, foram ensaiados cinco corpos de prova para cada diâmetro de barra de Ø6, Ø8, Ø10 e Ø12 mm. A Figura 44 apresenta o gráfico de Tensão-Deformação obtidas do ensaio de resistência à tração mostrando o comportamento linear dessas barras. A Figura 45 apresenta a ruptura da barra após o ensaio, que ocorreu dentro do comprimento livre, próximo a ancoragem e a Tabela 17 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração.

Figura 44. Gráfico de Tensão x Deformação específica das barras de BFRP.

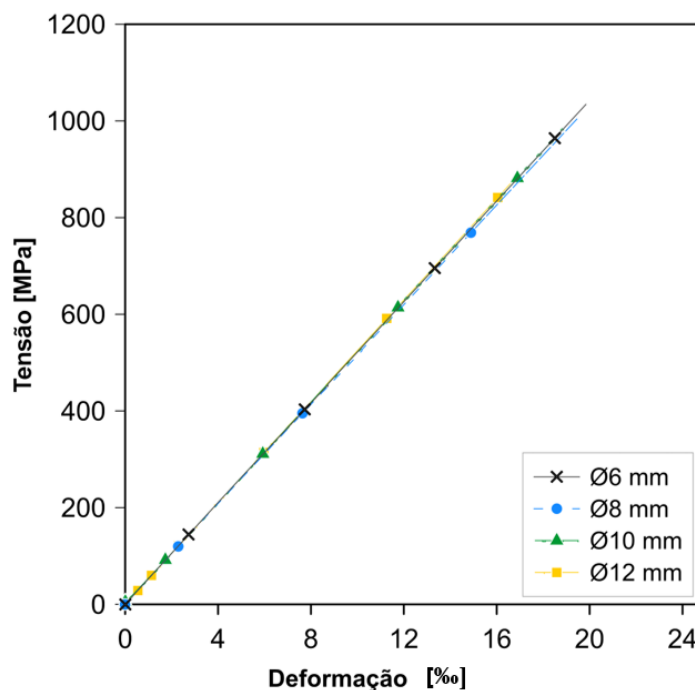


Figura 45. Ruptura da barra de BFRP.**Tabela 17.** Resultados do ensaio de resistência à tração.

Amostra	Diâmetro nominal (mm)	Diâmetro efetivo (mm)	Área efetiva (mm ²)	Resistência à tração (MPa)	Desvio padrão	Coef. Var. (%)
BFRP-6	6,0	6,50	33,18	1039,37	6,34	0,61
BFRP-8	8,0	7,80	47,78	1013,60	10,78	1,06
BFRP-10	10,0	10,10	80,12	1012,92	36,70	3,62
BFRP-12	12,0	11,90	113,10	1014,47	42,88	4,23

Para a análise estatística dos dados de resistência à tração das barras, foi aplicado o critério de Chauvenet para verificar a existência de dados espúrios. A análise estatística de variância ANOVA foi aplicada para verificar se o diâmetro da barra é um parâmetro que possa alterar a resistência à tração deste conjunto analisado. O “valor-P” encontrado é superior ao valor de significância de 0,05, indicando forte evidência de rejeição da hipótese. Nos estudos de Li *et al.* (2017), Abed e Alhafiz (2019) e Junyan, Shiping e Changsun (2021), os resultados também não apresentam decréscimos da tensão de tração com o aumento dos diâmetros das barras. Analisando a área efetiva das barras (Tabela 17) e comparando com os limites

propostos pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) (Tabela 12), verifica-se que todas as barras atendem este requisito.

A Tabela 18 apresenta os resultados de módulo de elasticidade das barras de BFRP.

Tabela 18. Resultados do ensaio de módulo de elasticidade.

Amostra	Diâmetro nominal (mm)	Diâmetro efetivo (mm)	Área efetiva (mm ²)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Desvio padrão	Coef. Var. (%)
BFRP-6	6,0	6,50	33,18	52,18	1,46	2,80
BFRP-8	8,0	7,80	47,78	52,28	3,13	5,99
BFRP-10	10,0	10,10	80,12	52,59	2,47	4,69
BFRP-12	12,0	11,90	113,10	51,54	1,93	3,74

Para a análise estatística dos dados de módulo de elasticidade, foi aplicado o critério de Chauvenet para verificar a existência de dados espúrios.

Os valores do módulo de elasticidade das barras de BFRP ensaiadas, de diferentes diâmetros, apresentaram resultados próximos, assim como observado nos estudos de Li *et al.* (2017), Wei *et al.* (2019) e Junyan, Shiping e Changsun (2021).

As barras de polímero reforçado com fibra de basalto utilizadas nesta pesquisa foram fornecidas pela empresa Haizer Building Solution. Foram produzidas pelo processo de pultrusão de fibras e resinas epóxis (matriz polimérica, com endurecedor e pigmentação). De acordo com as propriedades do material fornecidas pelo fabricante, a barra de BFRP apresenta resistência à tração de 800 MPa e módulo de elasticidade de 50 GPa, mostrando que os ensaios apresentam valores superiores.

Com relação à normatização, a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) descreve as especificações técnicas gerais que se aplica à barra de polímero reforçada com fibra. Alguns limites são impostos, resistência à tração e módulo de elasticidade mínimo para barras de BFRP, sendo a especificação indicada de 800 MPa e 50 GPa, respectivamente. Dessa forma, os resultados obtidos dos ensaios

realizados, como resistência à tração e módulo de elasticidade, estão de acordo com os requisitos especificados.

4.2 Ensaio de determinação da tensão de aderência da barra de BFRP

Para ensaios de arrancamento das barras de aço e de BFRP, foram ensaiados cinco corpos de prova de 10 mm de diâmetro. A Tabela 19 apresenta o resultado do ensaio de arrancamento.

Tabela 19. Resultado do ensaio de arrancamento para barras de Ø10 mm.

Amostra	Diâmetro efetivo (mm)	fcm (MPa)	Tensão de aderência (MPa)	Desvio padrão	Coef. Variação (%)
BFRP-10	10,1	34,25	20,77	1,51	7,28

A tensão de aderência especificada pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) é de, no mínimo, 12 MPa. O resultado obtido mostra que a barra de BFRP de 10 mm atende ao requisito especificado.

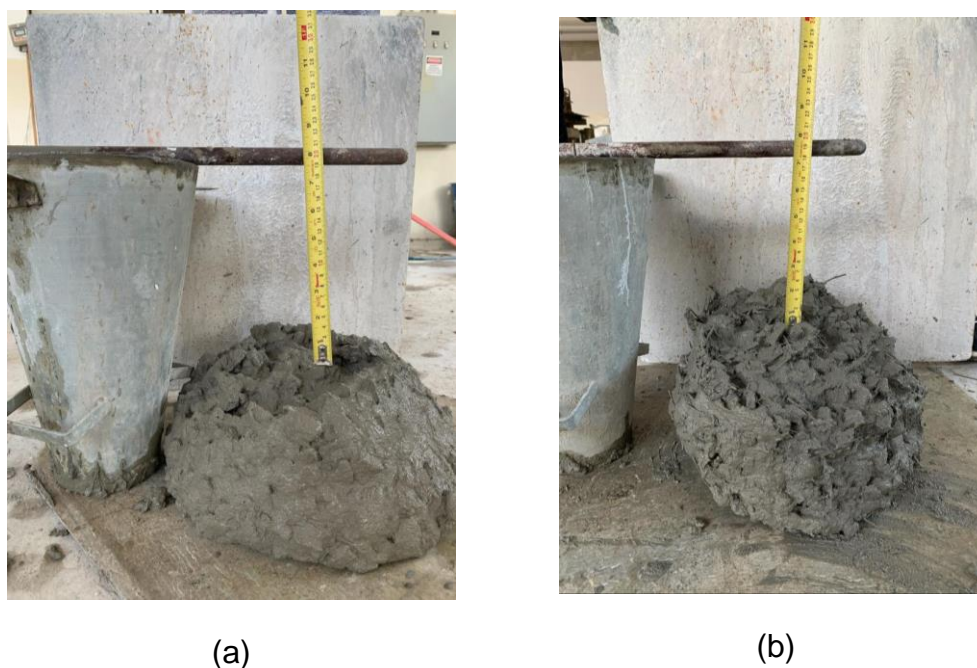
A norma ASTM D7913/D7913-14 recomenda a utilização de barras com 120 cm de comprimento na região sem ancoragem. Para que fosse realizado o ensaio de arrancamento, no entanto, foi necessária uma adaptação devido à limitação da máquina de ensaio, como a utilização de barras de BFRP com 75 cm no comprimento total. Contudo, apesar da alteração realizada, não houve escorregamento da ancoragem de nenhuma das barras, indicando, possivelmente, que a diminuição do tamanho da barra no corpo de prova não interferiu no processo de ensaio.

4.3 Vigas submetidas à flexão

4.3.1 Caracterização do concreto

Para a determinação da consistência do concreto no estado fresco foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone. O slump obtido foi de 19 cm para o concreto sem adição de fibra e 18 cm para o concreto com adição de fibra, como mostra a Figura 46.

Figura 46. Abatimento de tronco de cone para o concreto sem adição de fibra (a) e com adição de fibra (b).



A Tabela 20 apresenta os resultados obtidos pelos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade para os traços SF (concreto sem fibra) e F (concreto com adição de fibra). A adição de fibra ao concreto (Traço F) diminuiu a resistência à compressão em 14,88% em relação ao concreto sem fibra (Traço SF), assim como o módulo de elasticidade (redução de 13,80%), enquanto a resistência à tração apresentou resultados próximos.

Tabela 20 – Caracterização do concreto para Traço SF e Traço F.

	f_{cm} (MPa)	Desvio padrão	CV (%)	$f_{ct, m}$ (MPa)	Desvio padrão	CV (%)	$E_{ci, m}$ médio (GPa)	Desvio padrão	CV (%)
Traço SF	47,39	9,12	19,23	5,37	0,59	11,05	34,42	2,13	6,19
Traço F	40,34	6,25	15,50	5,68	0,60	10,50	29,67	4,21	14,19

A Figura 47 apresenta o resultado do diagrama tensão versus CMOD para o ensaio de tração na flexão nos prismas de concreto com adição de fibras dispersas e a Tabela 21 mostra os valores de resistência residual à tração na flexão correspondente ao seu respectivo CMOD. O limite de proporcionalidade (fL) atingido pelos prismas é próximo até que o limite de resistência à tração do concreto é atingido, ocorrendo a formação de fissura na região do entalhe.

Figura 47- Diagrama tensão-CMOD para o ensaio de tração na flexão para concreto com fibra.

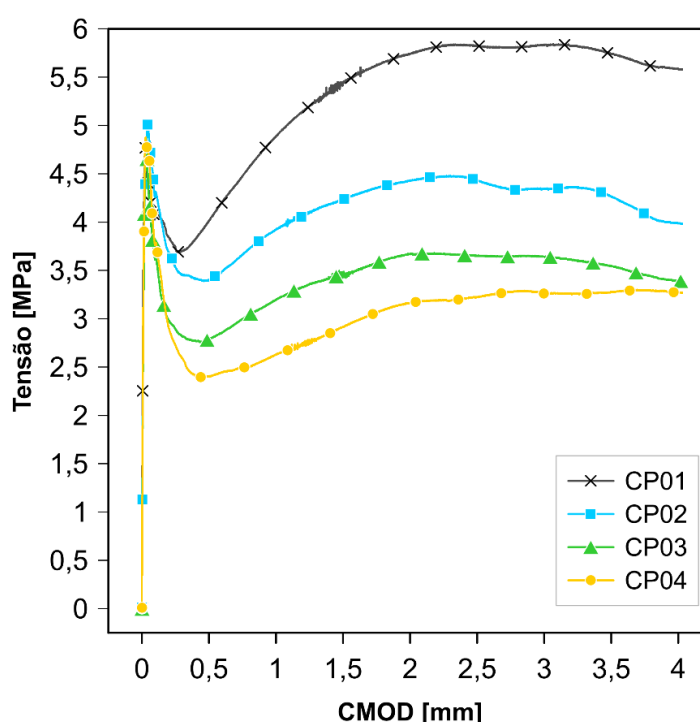


Tabela 21. Resultados do ensaio de resistência à tração por flexão.

Exemplar	fL	fR1	fR2	fR3	fR4
no.	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
1	4,79	3,98	5,43	5,83	5,78
2	5,04	3,40	4,21	4,46	4,32
3	4,76	2,78	3,44	3,66	3,57
4	4,88	2,41	2,89	3,21	3,27
Média	4,87	3,14	3,99	4,29	4,24
Desvio Padrão	0,13	0,69	1,10	1,15	1,12
CV (%)	2,58	22,01	27,57	26,79	26,46

A Figura 48 (a) apresenta o CP01 após o ensaio, mostrando a distribuição homogênea das fibras, com grande concentração na região próxima ao entalhe. A Figura 48 (b) mostra o CP04 após o ensaio com maior dispersão de fibras na seção.

Figura 48. Distribuição das fibras.



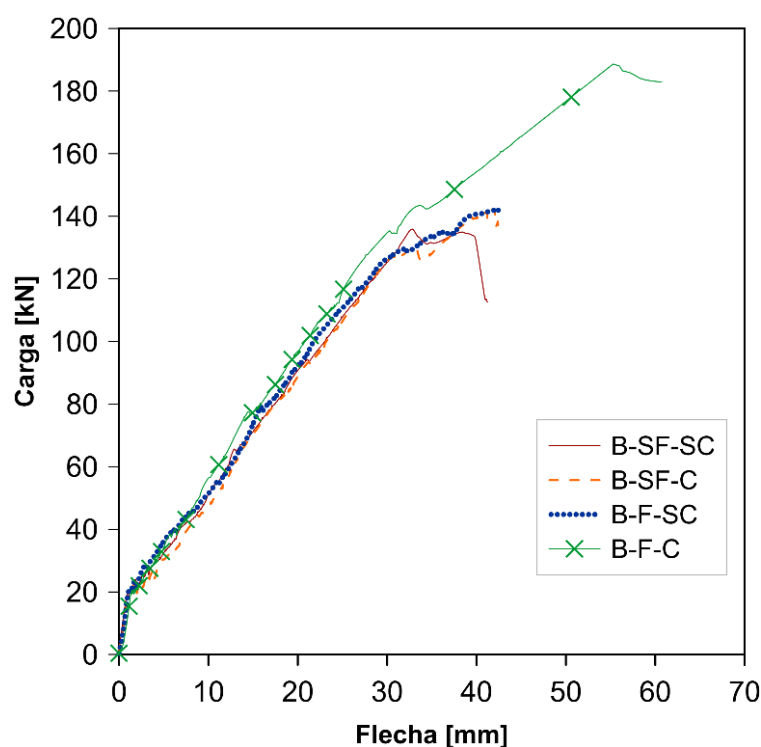
4.3.2 Análise do comportamento das vigas e modo de ruptura

As vigas de concreto armado com barras de BFRP foram dimensionadas para romper por flexão com esmagamento do concreto, quando o concreto atinge sua deformação máxima ϵ_{cu} de 0,30 ou 0,35% (ACI 440.1R-15 e Prática Recomendada (2021), respectivamente). A Tabela 22 apresenta um resumo com os valores da carga máxima resistida pelas vigas e seus deslocamentos, descreve os valores de momentos resistentes experimentais de todas as vigas e compara com valores de momento resistente obtidos de acordo com a norma ACI 440.1R-15 e Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), considerando valores de resistência característicos dos materiais, que se encontram descritos no Apêndice A. Foi calculado $M_n = 49,78$ kNm para momento resistente pela ACI 440.1R-15 e $M_n = 56,32$ kNm como momento resistente pela Prática Recomendada.

Tabela 22. Resultados experimentais e comparação com valores teóricos.

Viga	Carga máxima (kN)	Flecha na carga máxima (mm)	M_{exp} (kNm)	ACI 440.1R-15	Prática Rec
				M_{exp}/M_n	M_{exp}/M_n
B-SF-SC	135,88	32,81	51,63	1,04	0,92
B-SF-C	142,12	41,96	54,01	1,08	0,96
B-F-SC	148,66	49,00	56,49	1,13	1,00
B-F-C	188,63	55,29	71,68	1,44	1,27

A resposta Carga versus Flecha de todas as vigas ensaiadas foram plotadas em gráfico, como mostra a Figura 49. As curvas consistem de dois segmentos principais, o estágio antes da fissura e, após o ponto de inflexão, tem início o estágio pós-fissuração. As inclinações obtidas na fase pré-fissuração foram semelhantes para todas as vigas, indicando pouca contribuição da adição de fibras sintéticas. Uma vez que a primeira fissura se formou, todas as vigas apresentaram uma diminuição na rigidez acompanhada por um aumento considerável de deslocamentos no meio do vão.

Figura 49. Gráfico Carga x Flecha das vigas ensaiadas.

A viga referência B-SF-SC apresentou a menor capacidade de carga (135,88 kN) e um deslocamento máximo no meio do vão de 32,81 mm com a ocorrência da ruptura esperada, esmagamento do concreto (Figura 50 (a)).

O confinamento do concreto na viga B-SF-C pouco contribuiu para o aumento da ductilidade e influenciou na melhora da capacidade última da viga, visto que resistiu a uma carga maior em 4,59% do que a viga referência (B-SF-SC). Além disso, pode ter enrijecido a região onde o concreto seria esmagado, ocorrendo o esmagamento do concreto e o surgimento de uma fissura de cisalhamento, como mostra a Figura 50 (b).

A adição de fibra na viga B-F-SC também aumentou a carga resistida em 9,41% em comparação a viga B-SF-SC, apresentando o esmagamento do concreto como modo de falha (Figura 50 (c)).

Observa-se que a aplicação em conjunto de 1% da fibra descontínua e o confinamento do concreto na região central da viga B-F-C proporcionou um aumento na ductilidade e na capacidade de carga, sendo 38,82% maior do que a viga B-SF-SC, além de uma pequena contribuição de rigidez ao deslocamento. A capacidade de seção aumentou devido ao incremento da deformação final à compressão do concreto, resultando em uma maior contribuição de resistência das barras de BFRP. A combinação das duas intervenções alterou o modo de ruptura da viga, como pode ser visto na Figura 50 (d), em que ocorreu a ruptura da barra. A Figura 51 mostra o rompimento da nervura da armadura. Ao descarregar as vigas ensaiadas, esta foi a única que não retornou a sua posição inicial, indicando grandes deformações na barra.

Figura 50. Modos de ruptura: (a) B-SF-SC; (b) B-SF-C; (c) B-F-SC; (d) B-F-C.

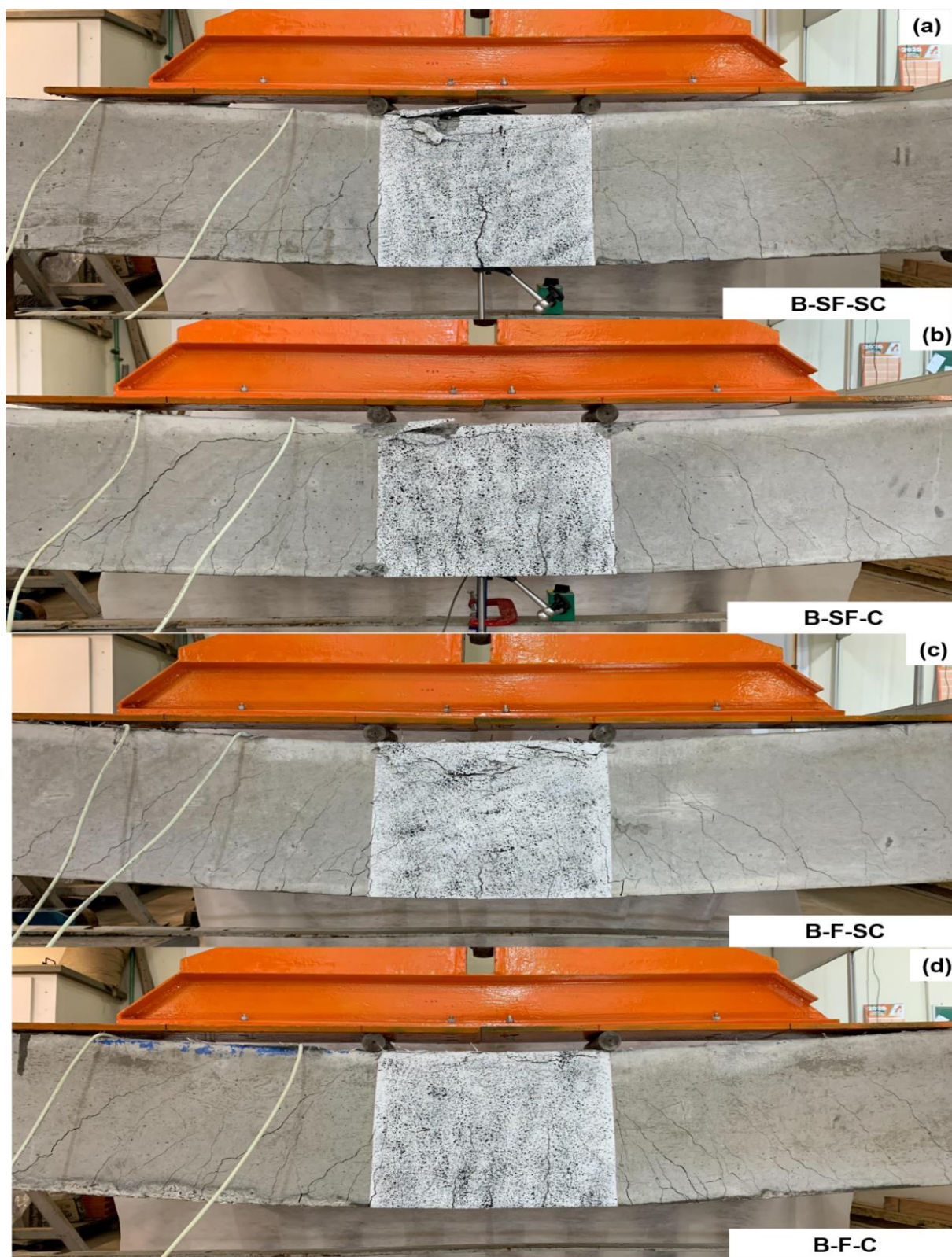
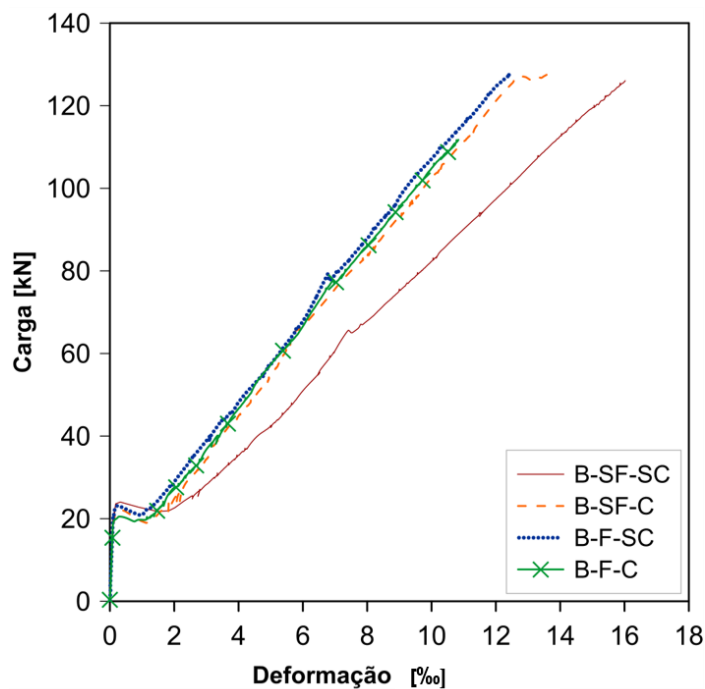


Figura 51. Detalhe da ruptura da barra.



4.3.3 Deformação da armadura longitudinal

A Figura 52 apresenta as curvas de Carga versus Deformação da armadura longitudinal para todas as vigas ensaiadas. Assim como o gráfico de Carga versus Flecha, as curvas de Carga versus Deformação possuem comportamento bilinear com o ponto de inflexão indicando o início da fissuração do concreto. As respostas pré-fissuração são semelhantes para todas as vigas ensaiadas, bem como na fase pós-fissuração, em que houve um aumento da deformação das barras devido à redução da rigidez das vigas nesse estágio. Também, pode-se observar que após a fissuração do concreto, as deformações variam de forma linear com o aumento da carga até a ruptura. Para a viga B-SF-SC, a armadura de BFRP apresentou maior deformação após a fissuração do concreto. Considerando uma mesma carga, com a adição de fibras descontínuas, o confinamento do concreto ou o esforço combinado das duas ações, as armaduras longitudinais apresentaram menor deformação de tração e curvas semelhantes, superior à armadura da viga referência (B-SF-SC).

Figura 52. Deformação da armadura longitudinal.

4.3.4 Correlação de imagem digital

A correlação de imagem digital (CID), por meio do software GOMCorrelate, foi utilizada com o objetivo de obter a leitura da abertura de fissura das vigas ensaiadas. Para isso, primeiramente, comparou-se os resultados obtidos com a medição da flecha no vão central no programa experimental com a análise de correlação de imagem digital. As curvas obtidas do programa podem ser identificadas na legenda pelo nome da viga seguido por (G), enquanto os dados experimentais seguem pelo nome da viga e por (E).

Ao comparar os resultados do CID com os valores experimentais de carga-flecha, pôde-se verificar a qualidade dos dados que se mostraram adequados para a representação do ensaio, como mostram a Figura 53, Figura 54, Figura 55 e a Figura 56.

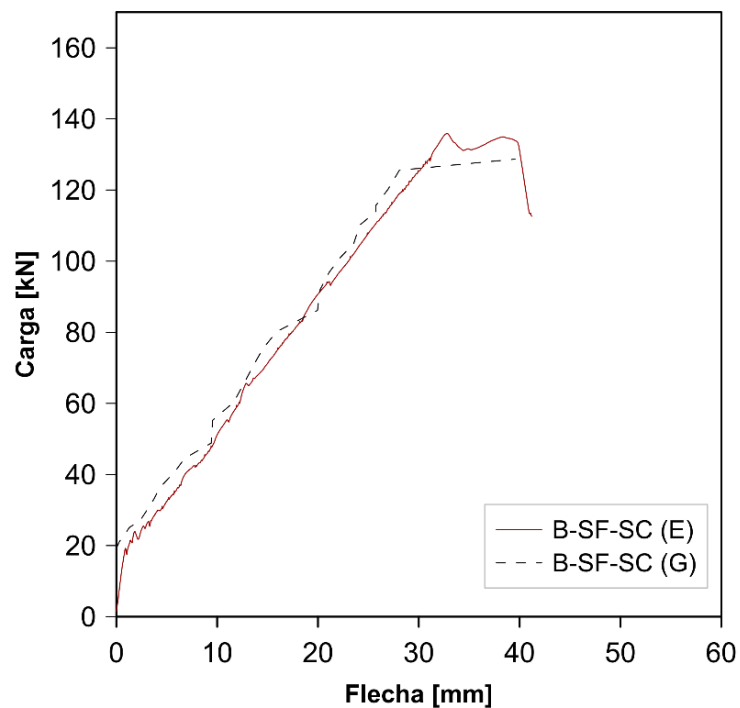
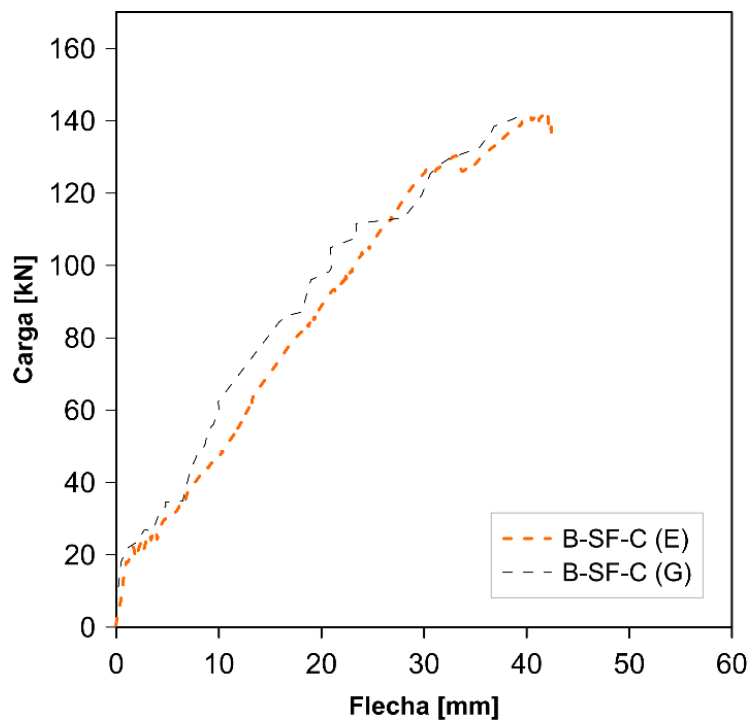
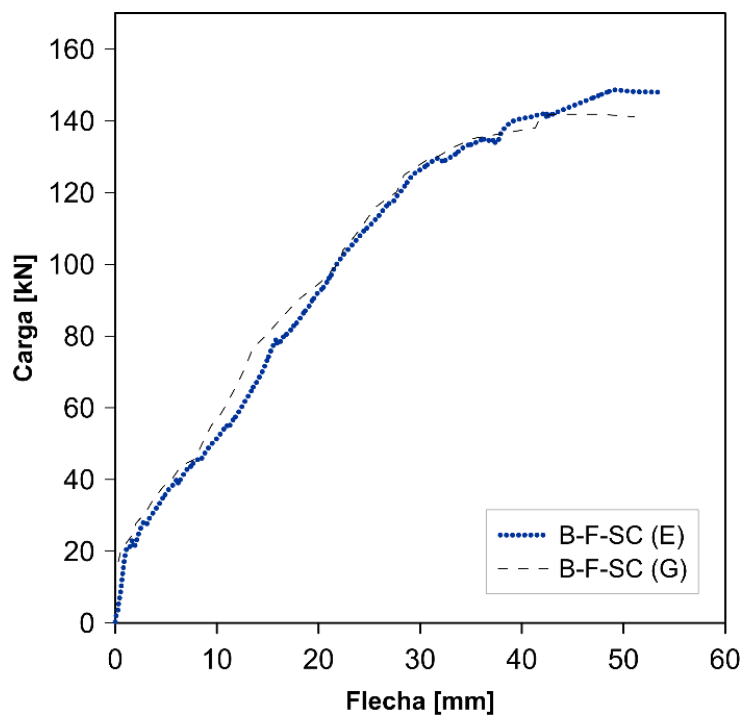
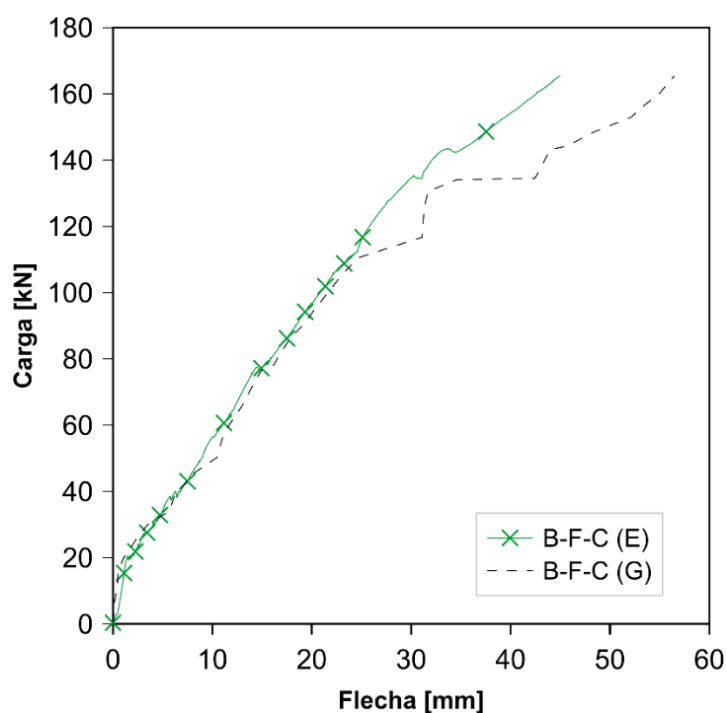
Figura 53. Comparação entre CID e experimental para B-SF-SC.**Figura 54.** Comparação entre CID e experimental para B-SF-C.

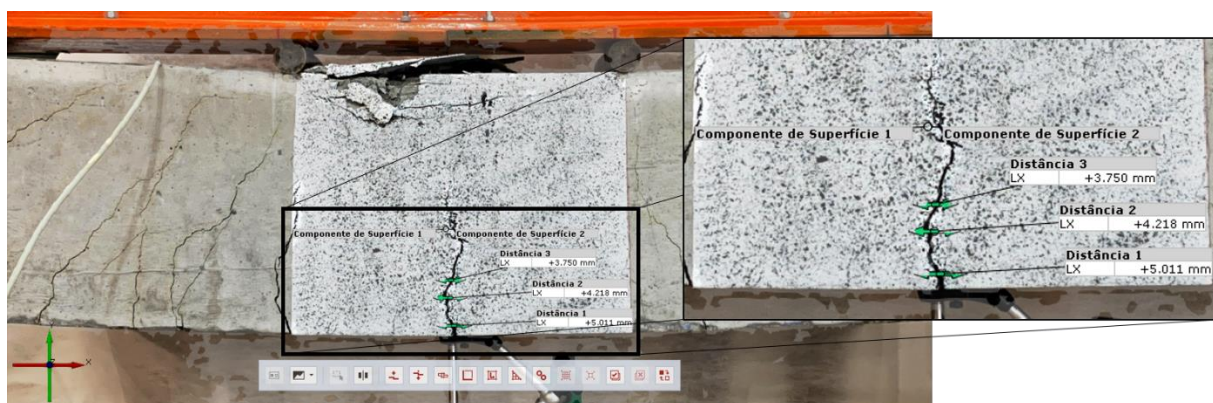
Figura 55. Comparação entre CID e experimental para B-F-SC.**Figura 56.** Comparação entre CID e experimental para B-F-C.

Após a verificação da qualidade dos dados, foi realizado a medição da abertura da fissura para a carga máxima, sendo mensurado a maior fissura dentro da região central. Focando na área entre pontos de aplicação de carga, a Figura 57, Figura 58, Figura 59 e Figura 60 mostram a propagação de fissuras de todas as vigas ensaiadas,

que seguiram padrões de fissuração por esforços de flexão observadas em vigas simplesmente apoiadas. A formação de fissuras iniciou-se na região de máximos momentos fletores com fissuras verticais, perpendiculares à direção das tensões principais de tração. Com o carregamento num patamar superior começam a surgir fissuras inclinadas nas proximidades dos apoios, por influência das forças cortantes atuando em conjunto com os momentos fletores.

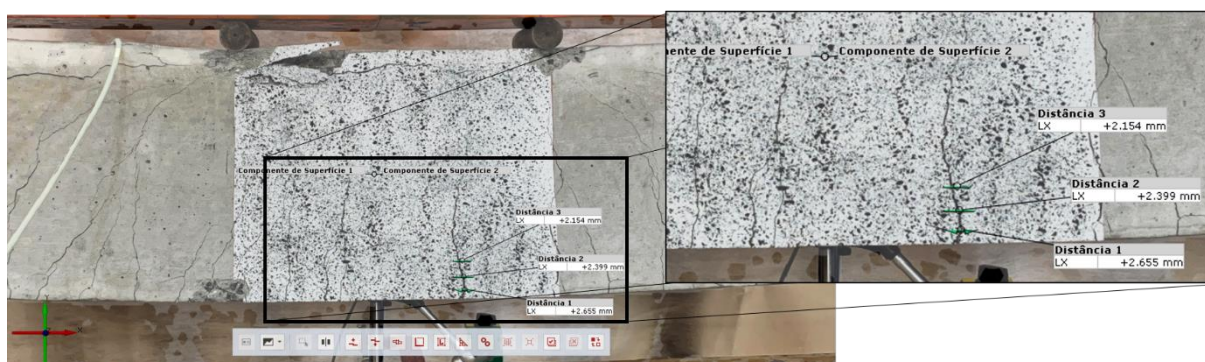
A Figura 57 apresenta a leitura realizada no programa da abertura de fissura para a carga máxima da viga B-SF-SC, em que foi obtido um valor de 5,01 mm.

Figura 57. Leitura da abertura de fissura da viga B-SF-SC.



A leitura da abertura de fissura para a viga B-SF-C no software, considerando a carga máxima, foi de 2,66 mm (Figura 58).

Figura 58. Leitura da abertura de fissura da viga B-SF-C.



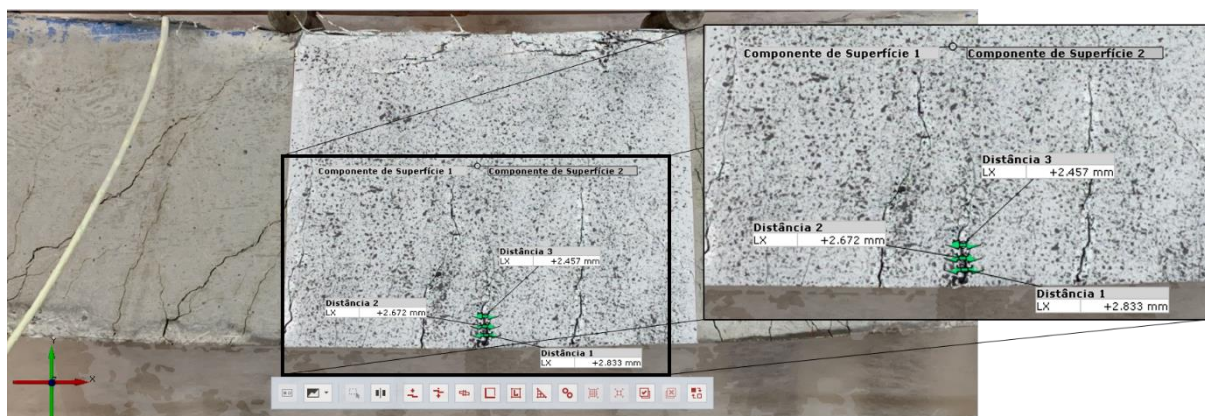
A viga B-F-SC, na carga máxima, apresentou uma abertura de fissura de 3,25 mm, como mostra a Figura 59.

Figura 59. Leitura da abertura de fissura da viga B-F-SC.



A Figura 60 apresenta a obtenção da abertura de fissura da viga B-F-C, considerando a carga máxima resistida, com valor de 2,83 mm.

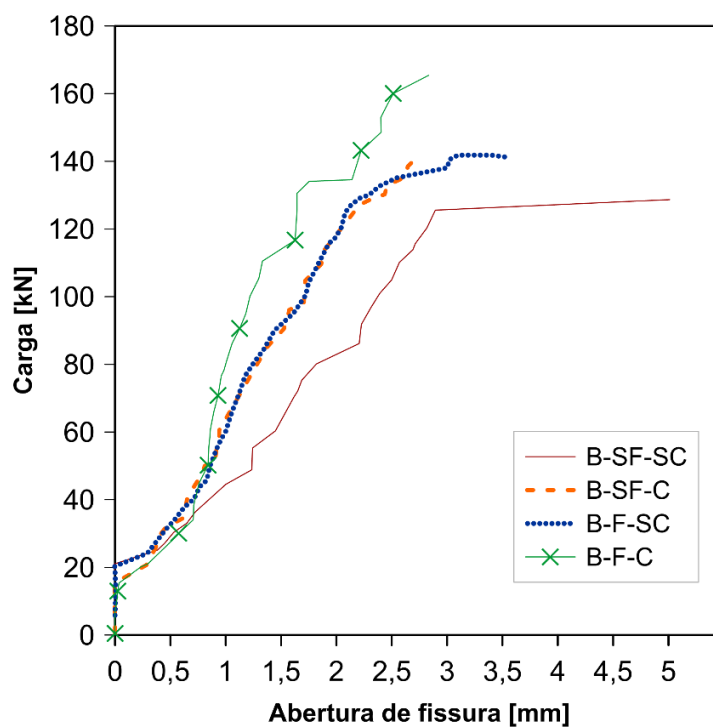
Figura 60. Leitura da abertura de fissura da viga B-F-C.



A Figura 61 apresenta o gráfico com as curvas de Carga máxima versus Abertura de fissura para todas as vigas. As vigas de concreto com confinamento (B-F-C e B-SF-C) apresentaram menor carga de fissuração, aproximadamente 18 kN, enquanto nas vigas de concreto sem confinamento (B-F-SC e B-SF-SC) a carga de fissuração é de 20 kN. A viga B-SF-SC não apresenta potencial de restringir a fissuração, com aumento da abertura a cada incremento de carga, exibindo um crescimento repentino de abertura de fissura após a carga de 125 kN. Pode ser atribuído a ausência de efeito de ponte com o aumento das tensões no concreto. As vigas B-SF-C e B-F-SC apresentaram tendências semelhantes de restrição de abertura de fissura. A adição de fibra melhor contribui na redução de propagação de fissura quando em conjunto com o confinamento do concreto na região central, como pode ser observado pelo comportamento da viga B-F-C, em que a curva se

apresentou mais íngreme a partir da carga de 36 kN e, na carga máxima, apresentou o melhor potencial de restringir a abertura de fissura.

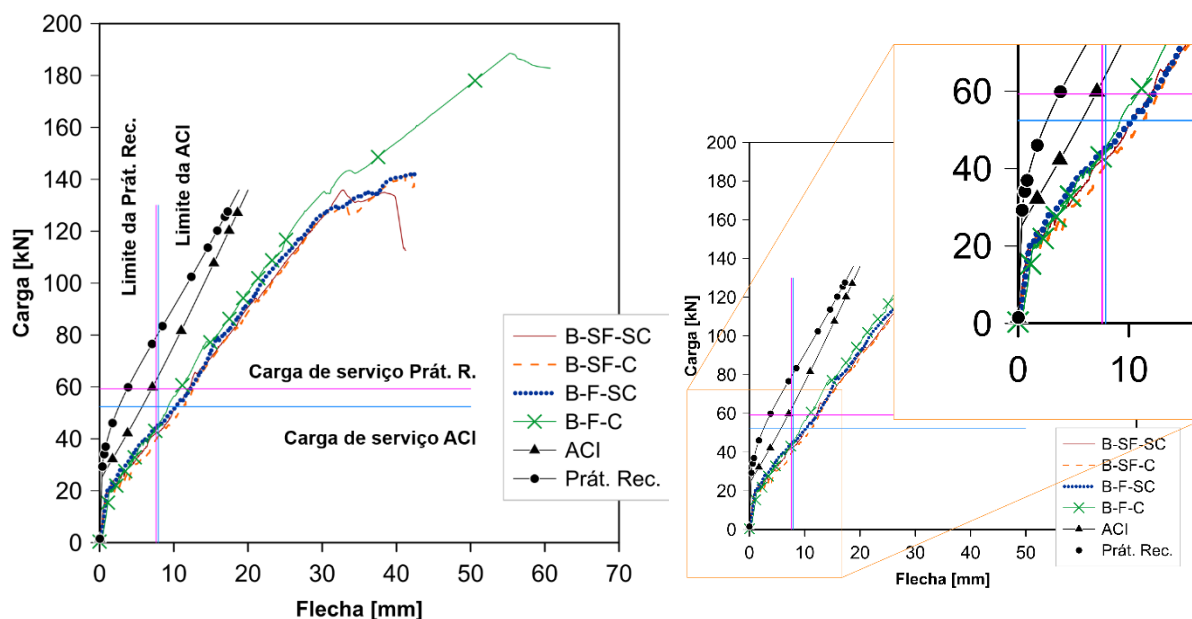
Figura 61. Gráfico Carga máxima versus Abertura de fissura.



4.3.5 Comparação entre resultados experimentais e previstos por norma

As previsões de flecha foram determinadas de acordo com a norma ACI 440.1R-15 e Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), descritos nos itens 2.4.1.1 e 2.4.2.1, respectivamente, determinadas com valores característicos, ou seja, sem os coeficientes de ponderação. O Apêndice B descreve todos os dados obtidos para a determinação da previsão de flecha. A Figura 62 compara o resultado experimental e as respostas analíticas de flecha.

Figura 62. Comparação entre o experimental e previsão de flecha.



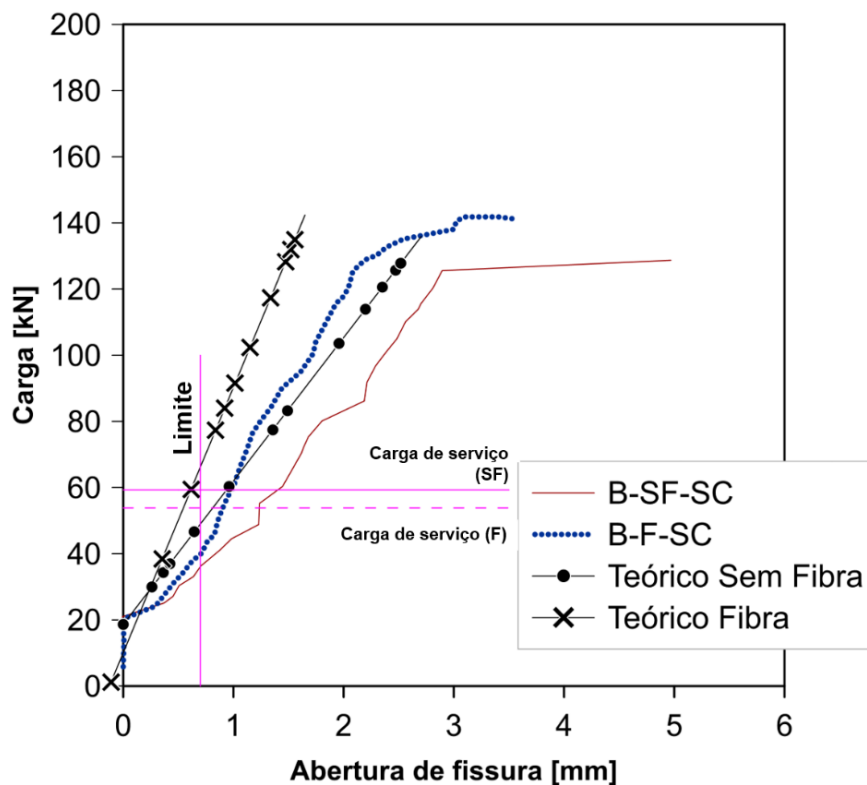
A Tabela 23 fornece os valores de flecha experimentais medidos na carga de serviço e a relação de flecha experimental e análise teórica, também na carga de serviço, (aqui considerada como 40% da carga última). A Tabela 23 confirma que, tanto a ACI 440.1R-15 quanto a Prática Recomendada subestimam o valor de flecha para as vigas de concreto armado com barras de BFRP na carga de serviço, apresentando, para uma mesma carga, deslocamentos verticais menores comparado aos experimentais.

Considerando os limites de flecha na carga de serviço, como $L/240$ para ACI 440.1R-15 e $L/250$ para a Prática Recomendada e obtendo 7,92 mm e 7,6 mm, respectivamente. Todas as vigas exibiram flechas superiores do que o limite estabelecido pela ACI e pela Prática Recomendada na carga de serviço.

Tabela 23. Experimental e relação de valores experimentais e previsão de flecha.

Viga	ACI 440.1R-15		Prática Rec. IBRACON/ABECE	
	Flecha para 52 kN (mm)	$\frac{\text{Flecha}_{\text{EXP}}}{\text{Flecha}_{\text{ACI}}}$	Flecha para 59 kN (mm)	$\frac{\text{Flecha}_{\text{EXP}}}{\text{Flecha}_{\text{ACI}}}$
B-SF-SC	10,24	1,78	12,02	3,24
B-SF-C	11,26	1,96	12,67	3,42
B-F-SC	10,27	1,79	12,24	3,30
B-F-C	9,20	1,60	10,83	2,92

A previsão de abertura de fissura foi determinada de acordo com a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), descrita no item 2.4.2.1, determinada com valores sem os coeficientes de ponderação, apresentados com mais informações no Apêndice C. A Figura 63 mostra as curvas experimentais de Carga versus Abertura de fissura para todas as vigas ensaiadas e a curva teórica. A proposição teórica subestima os valores de abertura de fissura, com menores aberturas de fissuras a uma mesma carga em comparação ao encontrado experimentalmente para as vigas verificadas (B-SF-SC e B-F-SC)

Figura 63. Análise teórica da abertura de fissura.

A Tabela 24 apresenta a comparação entre os valores experimentais de abertura de fissura na carga de serviço (considerada 40% da carga última) e os valores previstos de acordo a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021). Considerando a abertura de fissura limite de 0,7 mm, as vigas ensaiadas apresentaram valores superiores na carga de serviço.

Tabela 24. Abertura de fissura experimental e relação experimental-teórica.

Viga	Fissura na carga de serviço (mm)	$\frac{\text{Fissura}_{\text{EXP}}}{\text{Fissura}_{\text{PráticaRec.}}}$
B-SF-SC	1,45	1,56
B-F-SC	0,92	1,67

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um programa experimental em que foi realizado ensaios de caracterização de propriedades mecânicas das barras de BFRP e analisou o comportamento de vigas de concreto armado com barras poliméricos reforçados com fibra de basalto (BFRP), adição de fibra descontínua e confinamento do concreto.

Ensaio de caracterização das barras:

- A barra de polímero reforçado com fibra de basalto é um material elástico linear até a ruptura. Os resultados de resistência à tração das barras de BFRP de diferentes diâmetros não apresentaram diferenças significativas em suas resistências e estão acima do valor especificado pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) de 800 MPa.
- Os valores do módulo de elasticidade das barras de diferentes diâmetros não apresentaram variações significativas em seus valores, com resultados superiores a 50 MPa, que é o limite especificado pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021).
- A barra de 10 mm ensaiada apresenta tensão de aderência superior ao valor mínimo especificado pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) de 12 MPa.

Ensaio de flexão a quatro pontos:

- O confinamento do concreto pouco contribuiu para aumentar a ductilidade, ainda que tenha influenciado para aumentar a capacidade última da viga B-SF-C, obtendo uma ruptura por esmagamento do concreto.
- A adição de fibra descontínua na viga B-F-SC contribuiu com o acréscimo de capacidade, rompendo por esmagamento do concreto. A adição de 1% de fibra descontínua e o confinamento do concreto proporcionaram um incremento na ductilidade e na capacidade de carga e uma pequena contribuição na rigidez ao deslocamento. Com o aumento da deformação final à compressão do concreto e maior colaboração de resistência da barra de BFRP, o modo de ruptura foi alterado, ocorrendo a rompimento da barra.
- As vigas de concreto armado com barras de BFRP apresentaram comportamento bilinear para a flecha e a deformação da armadura. A resposta

pré-fissuração de todas as vigas quase não foram influenciadas pela adição de fibra ou confinamento do concreto, visto que esta fase é governada pela tração do concreto. Após a fissuração, na análise da flecha apenas a viga B-F-C apresentou uma rigidez ligeiramente maior do que as outras vigas. Na deformação da armadura longitudinal, a armadura da viga B-SF-SC apresentou grandes deformações, enquanto as vigas B-SF-C, B-F-SC e B-F-C menor deformação de tração e curvas semelhantes.

- A adição de 1% de fibras descontínuas em conjunto com o confinamento do concreto na viga B-F-C, na carga máxima, foi o que melhor contribuiu para reduzir a propagação de fissura comparado a todas as vigas. Enquanto a ação apenas da fibra ou do confinamento de maneiras separadas das vigas B-F-SC e B-SF-C, respectivamente, mostraram contribuições semelhantes na diminuição da abertura de fissura e superiores a viga referência.
- A análise teórica, tanto pela ACI 440.1R-15 quanto pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), subestimaram o valor de flecha de vigas de concreto armado com barras de BFRP. Considerando o limite de flecha na carga de serviço, todas as vigas apresentam deslocamento vertical superior ao estabelecido.
- Na previsão da abertura de fissura pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), foram encontrados valores menores de abertura de fissura para uma mesma carga comparado ao resultado experimental das vigas verificadas (B-SF-SC e B-F-SC).

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Avaliação de uma possível modificação nas fórmulas de dimensionamento de vigas no Estado Limite de Serviço de Deformação Excessiva presentes na ACI 440.1R e na Prática Recomendada IBRACON/ABECE.
- Realização de ensaios de vigas à flexão com adição de fibras que levem ao comportamento de deflection hardening já nas primeiras aberturas de fissura no ensaio de tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais).

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABED, F.; ALHAFIZ, R. Effect of basalt on the flexural behavior of concrete beams reinforced with BFRP bars. **Composite Structures**, v. 215, p. 23-34, 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 544. 1R – 96: **Report on Fiber Reinforced Concrete**. American Concrete Institute, 1996. Reapproved 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440.1R – 06: **Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars**. American Concrete Institute, 2006.

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

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544. 4R - 18: Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete**. American Concrete Institute, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars**. ASTM D7205/D7205M-06. 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standard Test Method for Bond Strength of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars to Concrete by Pullout Testing**. ASTM D7913/D7913M-14. 2020.

AMRAN, Y. H. M. *et al.* **Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: A review**. Structures, v. 16, p. 208 – 238, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16916: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738: Concreto – Procedimentos para a moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

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

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

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

BASA, N.; ULICEVIC, M.; ZEJAK, R. Experimental research of continuous concrete beams with GFRP reinforcement. **Advances in Civil Engineering**, v. 2018, 2018.

BI, Q.; WANG, H. Bond strength of BFRP bars to basalt fiber reinforced high-strength concrete. *Advances in FRP Composites in Civil Engineering - Proceedings of the 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE*. 2011.

COLOMBO, C.; VERGANI, L.; BURMAN, M. Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites. **Composite Structures**, v. 94, n. 3, p. 1165–1174, fev. 2012.

DELALIBERA, R. G. **Análise Teórica e experimental de vigas de concreto armado com armadura de confinamento**. 2002. 232f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

DELALIBERA, R. G.; GIONGO, J. S. Theoretical and numerical analysis of reinforced concrete beams with confinement reinforcement. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 1, n. 1, p. 17 – 30, 2008.

DUO, Y. *et al.* Environmental impact on the durability of FRP reinforcing bars. **Journal of Building Engineering**, v. 43, 2021.

ELGABBAS, F.; AHMED, E. A.; BENMOKRANE, B. Physical and mechanical characteristics of new basalt-FRP bars for reinforcing concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 623–635, 2015.

ELGABBAS, F. *et al.* Experimental testing of basalt-fiber-reinforced polymer bars in concrete beams. **Composites Part B**, v. 91, p. 206 – 218, 2016.

EL REFAI, A.; ABED, F.; ALTALMAS, A. Bond Performance of Basalt Fiber-Reinforced Polymer Bars to Concrete. **Journal of Composites for Construction**, v. 19, n. 3, p. 1–12, 2015.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras. **Livro Concreto: Ciência e Tecnologia**. Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2011.

FIORE, V.; BELLA, G. Di; VALENZA, A. Glass-basalt/epoxy hybrid composites for marine applications. **Materials and Design**, v. 32, p. 2091 – 2099, 2011.

HAIZER GROUP. Paraná: Haizer Building Solution. Disponível em: <https://www.haizergroup.com.br/haizervergalhoes>. Acesso em: 23 fev. 2021.

HAO, X.; FENG, Q.; ZHENG, J. A passive stress-strain model for concrete prisms reinforced by a combination of confinement reinforcement. **Engineering Structures**, v. 246, 2021.

HOLSCHEMACHER, K.; MUELLER, T.; RIBAKOV, Y. Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete. **Materials and Design**, v. 31, p. 2604 – 2615, 2010.

HUANG, Z. et al. Experimental and numerical study on concrete beams reinforced with Basalt FRP bars under static and impact loads. **Composite Structures**, v. 263, 2021.

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE – fib Bulletin nº 40. FRP reinforcement in RC structures, 2007.

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE – fib Model Code for Concrete Structure, 2010.

INTERSTATE COUNCIL FOR STANDARDIZATION, METODOLOGY AND CERTIFICATION – ISC. **Fibre Reinforced Polymer Bar for Concrete Reinforcement**. GOST 31938-2012.

JUMAA, G. B.; YOUSIF, A. R. Size effect on the shear failure of high-strength concrete beams reinforced with basalt FRP bars and stirrups. **Construction and Building Materials**, v. 209, p. 77–94, 2019.

JUNYAN, D.; SHIPING, Y; CHANGSUN, H. Analysis of key influencing factors of the bond performance between BFRP bars and coral reef and sand concrete. **Construction and Building Materials**, v. 269, p. 121248 – 121262, 2021.

KORDSA THE REINFORCER. Izmit: Kordsa, c2021. Disponível em: <https://www.kordsa.com>. Acesso em: 25 nov. 2021.

LAPENA, M. H.; MARINUCCI, G.; CARVALHO, O. DE. **Utilização Da Fibra De Basalto Em Aplicações Estruturais – Revisão E Propostas De Aplicação**. 20º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. **Anais...**Joinville: 2012.

LI, C. *et al.* Effect of high temperature on the bond performance between basalt fibre reinforced Polymer (BFRP) bars and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 141, p. 44 – 51, 2017.

LI, Z. et al. Experimental study on cracking behavior of steel fiber reinforced concrete beams with BFRP bars under repeated loading. **Composite Structures**, v. 267, 2021.

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

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

NANA, W. S. A *et al.* Behaviour of macro-synthetic fibers reinforced concrete: Experimental, numerical and design code investigations. **Structures**, v. 32, p. 1271 – 1286, 2021.

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

SÁ, F. R. G. **Influência da adição de fibras de polipropileno no comportamento de elementos estruturais de concreto armado com barras de GFRP**. 2018. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SARZALEJO, A. G. *et al.* **Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto**: Manual técnico. Maccaferri America Latina, 2015. 238 p. Disponível em: https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/maccaferri/Fibras_como_elemento_estrutural_para_refor%C3%A7o_de_concreto_opt.pdf. Acesso em: 4 out. 2021.

TOMLINSON, D.; FAM, A. Performance of concrete beams reinforced with basalt FRP for flexure and shear. **Journal of Composites for Construction**, v. 19, n. 2, p. 1–10, 2015.

VIEIRA, M. M. *et al.* **Experimental analysis of reinforced concrete beams strengthened in bending with carbon fiber reinforced polymer**. Rev. IBRACON Estrut. Mater, v. 9, n. 1, p. 123-152, Feb. 2016. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952016000100008>. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952016000100123&lng=en&nrm=isso. Acesso em 23 abr. 2020.

WANG, C. **Experimental investigation on behavior of steel fiber reinforced concrete (SFRC)**. 2006. 165f. Dissertation (Master degree) – Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Canterbury, England, 2006.

WARMLING, G. M. B. *et al.* Comportamento de vigas de concreto reforçadas com aço e com barras de fibra de basalto. **Revista Técnico-Científico do CREA-PR**, p. 1–11, 2019.

WEI, W. *et al.* Bond performance between fibre-reinforced Polymer bars and concrete under pull-out tests. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116803-116817, 2019.

YANG, J. *et al.* Effect of steel and synthetic fibers on flexural behavior of high-strength

concrete beams reinforced with FRP bars. **Composites: Part B**, v. 43, p. 1077 – 1086, 2012.

YIN, S. *et al.* Use of macro plastic fibres in concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 180 – 188, 2015.

ZHANG, L.; SUN, Y.; XIONG, W. Experimental study on the flexural deflections of concrete beam reinforced with Basalt FRP bars. **Materials and Structures**, v. 48, n. 10, p. 3279–3293, 2014.

ZHU, H. *et al.* Flexural behavior of partially fiber-reinforced high-strength concrete beams reinforced with FRP bars. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 587 – 597, 2018.

APÊNDICE A – DADOS UTILIZADOS NO DIMENSIONAMENTO

Nesse item será descrito o dimensionamento realizado no estudo. A Tabela apresenta os dados adotados na realização do dimensionamento, realizados de acordo com a Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) e ACI 440.1R-15 (2015). Na Tabela , o dimensionamento 1 representa o pré-dimensionamento realizado antes da moldagem das vigas, em que foram adotados concreto de 40 MPa e valores experimentais da barra de BFRP. Após o ensaio do concreto utilizado nas vigas, o dimensionamento foi recalculado, dimensionamento 2 indicado na Tabela A1, com os valores experimentais obtidos da caracterização do concreto.

Tabela A1. Dados utilizados no dimensionamento.

Dimensionamento	Af (cm ²)	d (cm)	Barra de BFRP (Ø10mm)		Concreto		
			ffm (MPa)	Ef (MPa)	fck/fcm (MPa)	Ec (MPa)	Ecs (MPa)
1					40	33000	29700
	3,20	25,36	1012,92	52590			
2					47,39	34420	31614

Af – área de armadura transversal; d – altura útil; ffm – resistência à tração média da barra; Ef – módulo de elasticidade da barra; fck – resistência à compressão característica do concreto; fcm – resistência à compressão média do concreto; Ec – módulo de elasticidade do concreto; Ecs – módulo de deformação secante do concreto

A seguir, são apresentadas as equações para o dimensionamento à flexão (dimensionamento 2), com os valores médios utilizados, indicadas pela Prática Recomendada e pela ACI 440.1R-15, respectivamente.

Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021):

$$\rho_f = \frac{3,20}{15,25,36} = 0,00842$$

$$\rho_{fb} = 0,8 \cdot 0,85 \frac{47,39}{1012,92} \frac{52590 \cdot 0,0035}{52590 \cdot 0,0035 + 1012,92} = 0,00489$$

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

$$x = \frac{1}{2 \cdot 150} \frac{0,0035 \cdot 320,47 \cdot 52590}{0,8 \cdot 0,85 \cdot 47,39} \left(-1 + \sqrt{1 + 4 \frac{0,8 \cdot 0,85 \cdot 47,39}{0,0035 \cdot 320,47 \cdot 52590} 150 \cdot 253,6} \right)$$

$$= 49,86 \text{ mm}$$

$$\sigma_{fd} = \frac{49,86 \cdot 150 \cdot 0,85 \cdot 0,8 \cdot 47,39}{320,47} = 752,09 \text{ MPa}$$

$$M_{Rd} = 752,09 \cdot 320,47 \left(253,6 - \frac{0,8 \cdot 49,86}{2} \right) = 56316537 \text{ MPa}$$

$$M_{Rd} = 56,32 \text{ kNm}$$

ACI 440.1R-15:

$$\rho_f = \frac{3,20}{15,25,36} = 0,00842$$

$$\rho_{fb} = 0,85 \frac{47,39}{1012,92} 0,7115 \frac{52590,0,003}{52590,0,003 + 1012,92} = 0,00381$$

$$\beta_1 = \frac{0,85 - 0,05(f_{cd} - 28)}{7} = 0,7115$$

$\rho_f > \rho_{fb}$ esmagamento do concreto

$$f_f = \sqrt{\frac{(52590,0,003)^2}{4} + \frac{0,850,7115 \cdot 47039}{0,00842} 52590,0,003 - 0,552590,0,003}$$

$$f_f = 657,966 \text{ MPa}$$

$$M_n = 0,00842657,966 \left(1 - 0,59 \frac{0,00842657,966}{47,39} \right) 150,253,6^2 = 49783974,48 \text{ Nmm}$$

$$M_n = 49,78 \text{ kNm}$$

APÊNDICE B – CÁLCULO DE PREVISÃO DE FLECHA

A seguir será descrito os valores obtidos para o cálculo de previsão de flecha pela ACI 440.1R-15 (2015) (Tabela B1) e pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) (Tabela B2), de acordo com as equações apresentadas no item 2.4.1.1 e 2.4.2.1, respectivamente.

Tabela B1. Previsão de flecha pela ACI 440.1R

ACI 440.1R-15	
β_1	0,7115
ρ_f	0,00842
ρ_{fb}	0,00381
n_f	1,663
k	0,1539
I_{cr} (cm ⁴)	2751,738
I_g (cm ⁴)	33750,0
y_t (cm)	15
M_{cr} (MPa)	9603235,12
Condição	$I_e \leq I_g$ onde $M_a \geq M_{cr}$

Tabela B2. Previsão de flecha pela Prática Recomendada.

Prática Recomendada IBRACON/ABECE	
α	1,5
fct (kN/cm ²)	0,3759
Ic (cm ⁴)	33750
yt (cm)	15
Mr (kNcm)	1268,66
Ma (kNcm)	2660
Ecs (kN/cm ²)	3161,39
β_d	0,75
X _{II} (cm)	3,905
I ₂ (cm ⁴)	2751,73
α_e	1,66
Ecs*Ic	1,06697E+13
(EI) _{eq,to} (kNm ²)	16437258,61
Condição	$(EI)_{eq,t0} \leq E_{cs}I_c$

APÊNDICE C – CÁLCULO DE PREVISÃO DE ABERTURA DE FISSURA

Descreve-se a seguir os valores obtidos no cálculo de previsão de abertura de fissura pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021), na Tabela C1, pelas equações presentes no item 2.4.2.1.

Tabela C1. Previsão de abertura de fissura pela Prática Recomendada.

Prática Recomendada IBRACON/ABECE	
α_e	1,663508
f_{bk} (kN/cm ²)	0,3026
h_{ef1} (cm)	11,6
h_{ef2} (cm)	8,698275
ρ_{ef}	0,024562
$f_{ct,m}$ (kN/cm ²)	0,3759
$f_{ctk,inf}$ (kN/cm ²)	0,26313
c (cm)	2
t_b (kN/cm ²)	0,393379
X_{II} (cm)	3,905176
\varnothing (mm)	10,1
f_{R1} (MPa)	3,14