



Filipe Rocha Gomes de Sá

**Influência da adição de fibras de polipropileno no
comportamento de elementos estruturais de concreto
armado com barras de GFRP**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso

Co-orientador: Prof. Flávio de Andrade Silva

Rio de Janeiro

Dezembro de 2018



Filipe Rocha Gomes de Sá

Influência da adição de fibras de polipropileno no comportamento de elementos estruturais de concreto armado com barras de GFRP

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Daniel Carlos Taisum Cardoso

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

Prof. Flávio de Andrade Silva

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

Prof. Raul Rosas e Silva

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

Prof. Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de dezembro de 2018.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Filipe Rocha Gomes de Sá

Graduado em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio – em 2016. Principais áreas de interesse: Materiais compósitos, concreto reforçado com fibras.

Ficha Catalográfica

Sá, Filipe Rocha Gomes de

Influência da adição de fibras de polipropileno no comportamento de elementos estruturais de concreto armado com barras de GFRP / Filipe Rocha Gomes de Sá ; orientador: Daniel Carlos Taissum Cardoso ; co-orientador: Flávio de Andrade Silva. – 2018.

100 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2018.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. GFRP. 3. Fibras de polipropileno. 4. Concreto armado. 5. Enrijecimento à tração. 6. Comportamento à flexão. I. Cardoso, Daniel Carlos Taissum. II. Silva, Flávio de Andrade. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. IV. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Aos meus pais, Claudio e Rita, que batalharam muito para me proporcionar uma educação de qualidade, além de me apoiar em toda tomada de decisão. As minhas irmãs, Julia e Clara, por todo incentivo nos últimos anos.

A minha namorada, Ana Beatriz, que esteve ao meu lado durante todo o mestrado e me deu o suporte e a coragem necessários para enfrentar todos os desafios dos últimos cinco anos. Sua dedicação e disciplina foi fonte de inspiração para mim durante todo o mestrado. Muito obrigado.

Aos meus orientadores, Daniel e Flávio, primeiramente, por me convencerem a ingressar no mestrado e pelo grande exemplo de profissionais que são. Pela confiança depositada em mim, por me apoiar e incentivar em todos os percalços encontrados. Obrigado também pela paciência e disponibilidade ao longo da pesquisa e, principalmente pela amizade formada ao longo do mestrado e da graduação.

Aos amigos que formei durante o mestrado. Sou extremamente grato pelas conversas, conselhos e churrascos realizados durante esses dois anos que tornaram o dia-a-dia muito mais leve.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas e Materiais de PUC-Rio, Euclides, Rogério, Marques, Bruno e Carlos, essenciais para a execução desta pesquisa. Obrigado por todo suporte, disponibilidade e paciência.

A Capes pelo apoio financeiro.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio pela atenção, disponibilidade e por todo o aprendizado durante minha graduação e pós-graduação.

Nada seria possível sem a ajuda das pessoas supracitadas.

Muito obrigado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

Resumo

Sá, Filipe Rocha Gomes de; Cardoso, Daniel Carlos Taisum (Orientador); Silva, Flávio de Andrade (Co-orientador). **Influência da adição de fibras de polipropileno no comportamento de elementos estruturais de concreto armado com barras de GFRP**. Rio de Janeiro, 2018. 100p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A utilização de barras de polímero reforçado por fibras de vidro (*glass fiber reinforced polymer*, GFRP, em inglês) como reforço de estruturas de concreto armado, vem ganhando popularidade principalmente devido à sua resistência à corrosão e resistência mecânica. Entretanto, seu baixo módulo de elasticidade pode acarretar em problemas na estrutura em serviço, como grandes aberturas de fissuras e deflexões quando comparado com concreto armado por barras de aço. No presente estudo, um programa experimental foi realizado com o objetivo de avaliar a influência da adição de 10 kg/m³ de fibras de polipropileno (PP) em elementos de concreto armado por barras de GFRP submetidos à tração direta e flexão. Caracterização mecânica e ensaios de arrancamento (*pullout*) foram realizados para avaliar as propriedades dos materiais constituintes e de sua interface, respectivamente. A formação e evolução das fissuras, bem como o efeito de enrijecimento à tração no material proposto, foram avaliados por meio de ensaios de tração direta em prismas de concreto armado. Ensaio de flexão em quatro pontos foram realizados para investigar o desenvolvimento da deflexão com o carregamento, o padrão de fissuração e o comportamento momento-curvatura dos espécimes. Correlação de imagem digital (digital image correlation, DIC, em inglês) foi utilizada para monitoramento de deformações, distâncias e aberturas de fissuras relevantes para a análise. Por fim, os resultados dos ensaios de flexão foram comparados com um modelo analítico. Uma redução considerável da abertura de fissuras e um melhor comportamento de múltipla fissuração foi observado para os espécimes com adição de fibras, além de um pequeno acréscimo de rigidez à flexão.

Palavras-chave

GFRP; Fibras de polipropileno; Concreto armado; Enrijecimento à tração; Comportamento à flexão.

Abstract

Sá, Filipe Rocha Gomes de; Cardoso, Daniel Carlos Taissum (Advisor); Silva, Flávio de Andrade (Co-advisor). **Influence of polypropylene fibers addition in the behavior of GFRP reinforced concrete members**. Rio de Janeiro, 2018. 100p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Glass-fiber reinforced polymer (GFRP) bars have been more often used in reinforced concrete (RC) structures mainly due to superior corrosion resistance and mechanical strength. However, the low modulus of elasticity leads to serviceability issues such as wider crack openings and larger deflections when compared to conventional RC. To improve the performance and allow for a more effective use of GFRP reinforcement, the addition of randomly disperse short polypropylene fibers (PP) to the concrete matrix is proposed. In the present study, an experimental program intending to investigate the flexural and tensile behavior of concrete members reinforced with GFRP bars and 10 kg/m³ of PP is carried out. Mechanical characterization and pull-out tests were carried out respectively to characterize the materials and interface between GFRP bar and concrete. Crack formation and growth, and tension stiffening effect in the proposed construction material were investigated by tension tests in reinforced concrete prisms. Four points bending tests were performed to evaluate the mid-span deflection, crack opening and moment-curvature relationship of the specimen. Digital image correlation was used to gather information about relevant data. It was proposed an analytical model to compare the results obtained in bending tests. A considerable reduction in crack openings, a better multiple cracks behavior and a slightly stiffer behavior was obtained due to fiber addition.

Keywords

GFRP; Polypropylene fibers; Reinforced concrete; Tension stiffening; Flexural behavior.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	APLICAÇÕES	15
1.2	MOTIVAÇÃO	17
1.3	OBJETIVO	18
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	MATERIAIS COMPÓSITOS	20
2.1.1	COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS POR FIBRAS CONTÍNUAS	21
2.1.1.1	PROPRIEDADES DAS BARRAS DE GFRP	22
2.1.2	COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS POR FIBRAS DISPERSAS	25
2.1.2.1	FIBRAS DE POLIPROPILENO COMO REFORÇO DISCRETO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS	29
2.1.3	LIGAÇÃO ENTRE BARRAS DE GFRP E MATRIZ CIMENTÍCIA	31
2.2	EFEITO DE ENRIJECIMENTO À TRAÇÃO EM ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO	35
2.3	FLEXÃO EM ELEMENTOS DE CONCRETO REFORÇADOS POR BARRAS DE GFRP	43
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	46
3.1	ETAPAS DO PROGRAMA	46
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS	47
3.2.1	CONCRETO	47
3.2.2	BARRA DE GFRP	48
3.2.3	FIBRAS DE POLIPROPILENO	49
3.3	ENSAIOS REALIZADOS	50
3.3.1	COMPRESSÃO AXIAL	50
3.3.2	TRAÇÃO DIRETA	51
3.3.2.1	ENSAIOS NA MATRIZ CIMENTÍCIA	52
3.3.2.2	ENSAIOS NAS BARRAS DE GFRP	54
3.3.2.3	ENSAIO EM BARRA DE AÇO	55
3.3.3	ENSAIO DE ARRANCAMENTO (<i>PULLOUT</i>)	56
3.3.4	ENSAIO DE TRAÇÃO DIRETA EM TIRANTES DE CONCRETO ARMADO (<i>TENSION STIFFENING</i>)	57
3.3.5	ENSAIOS DE FLEXÃO EM QUATRO PONTOS	59
4	RESULTADOS E ANÁLISES	62

4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	62
4.1.1	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA E DO MÓDULO À COMPRESSÃO AXIAL DO CONCRETO	62
4.1.2	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA E DO MÓDULO À TRAÇÃO DIRETA DO CONCRETO	63
4.1.3	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA E DO MÓDULO À TRAÇÃO DAS BARRAS DE GFRP	65
4.1.4	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA E DO MÓDULO À TRAÇÃO DAS BARRAS AÇO	66
4.2	ENSAIO DE ARRANCAMENTO	67
4.3	ENSAIO DE TRAÇÃO DIRETA EM PRISMAS DE CONCRETO ARMADO	71
4.3.1	CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM EM ENSAIOS DE TRAÇÃO DIRETA	75
4.4	ENSAIOS DE FLEXÃO EM QUATRO PONTOS	79
4.4.1	CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM EM ENSAIOS DE FLEXÃO	82
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

Lista de figuras

Figura 1. a) pilares usados para contenções de tuneis no Canada; b) TBM atravessando uma contenção reforçada por GFRP para a realização de um desemboque de um túnel. (http://www.vrodcanada.com)	15
Figura 2. a) Ponte de Southview na Pennsylvania, Estado Unidos; b) Ponte de Crow Creek no Iowa, Estados Unidos (http://aslanfrp.com/Aslan100/Aslan100_GFRP_Bridges.html)	16
Figura 3. a) Barras de GFRP fornecidas pela empresa tillco para conteções marítimas (http://www.tillco.com); b) barras de GFRP fornecidas pela empresa Vrod em uma estrada localizada em Toronto, Canada (http://www.vrodcanada.com/)	16
Figura 4. piso industrial (a) e concreto projetado (b) com fibras de polipropileno (http://awacomercial.com.br)	17
Figura 5. Ilustração do processo de pultrusão(http://fiberfence.com/about- composite/the-process/pultrusion-process/)	22
Figura 6. Tipos de superfícies de barras de FRP: a) com cobrimento de areia; b) nervuras c) com fio helicoidal ACI440.1R-06	23
Figura 7. Resultados obtidos por Robert & Benmokrane (2010) para a resistência a tração, cisalhamento e flexão de barras GFRP expostas a diferentes temperaturas.	24
Figura 8 Zona de transição interfacial entre fibra e matriz cimentícia [25]	27
Figura 9. Tensão cisalhante atuando ao longo da interface fibra-matriz: a) com materiais aderidos quimicamente b) após um deslizamento relativo entre fibra e matriz [26]	27
Figura 10 comportamento de compostos cimentícios reforçados por fibras discretas submetidos à compressão obtido por Fanella e Naaman [27]	29
Figura 11. Resultados obtidos por (de Alencar Monteiro et al.): a) Tensão - abertura de fissura (CMOD, do inglês crack mouth opening displacement) b) Força – deslizamento da fibra	31
Figura 12 Mecanismos de transferência de forças da interface. Adaptado de Aiello et al.	32
Figura 13. Efeito de enrijecimento à tração [51]: a) Prisma fissurado; b) distribuição de tensões longitudinais no reforço; c) distribuição de tensões normais no concreto.	36
Figura 14. Diagrama de força-deformação de elemento de concreto armado submetidos a tração direto [25]	37

Figura 15. Desenvolvimento do fator de enrijecimento (β) de barras de aço e de GFRP embebidas em concreto com o acréscimo de deformação obtido por Bishop e Paixao [50]	38
Figura 16 comparação do resultado de tração direta em prismas de concreto reforçado por uma barra de GFRP adaptado de Sooriyaarachchi et al. [55]: a) variando a resistencia caracteristica do concreto b) variando a taxa de armadura de GFRP.	38
Figura 17. Primas de concreto reforçados com aço e GFRP ensaiados por Bischoff e Paixao [50]	39
Figura 18. Comparação do desempenho do fator de enrijecimento com o acréscimo de deformação entre concretos com e sem adição de fibras de aço, realizada por Bischoff [57]	40
Figura 19. Distribuição de tensões aproximada no concreto e no aço submetidos à tração adaptado do Model Code [56]	43
Figura 20. Etapas do programa experimental realizado neste estudo.	47
Figura 21. Fibras de polipropileno usadas na pesquisa	49
Figura 22. Máquina usada para ensaios de compressão uniaxial e detalhe do corpo do sistema de aquisição de dados adotado.	51
Figura 23. Máquina usada para ensaios de tração direta	52
Figura 24. Fomas usada para moldagem (a), geometria adotada (b) e ilustração da forma utilizada (c) para a realização de ensaios de tração direta.	53
Figura 25. corpos de prova após a moldagem (a), Detalhe das barras de aço fixadas ao corpo de prova (b)	53
Figura 26. Setup adotado para ensaio de tração direta	54
Figura 27. Corpos de prova após a fixação dos tubos de proteção (a) e setup do ensaio de tração direta em barras de PRFV (b).	55
Figura 28. Corpos de prova (a) e setup do ensaio de tração direta em barras de aço (b).	56
Figura 29. Corte da seção transversal (a) e longitudinal (b) dos corpos de prova usados para ensaios de arrancamento.	56
Figura 30. Setup do ensaio de arrancamento (a) e ilustração do mesmo (b).	57
Figura 31. Setup do ensaio de tração direta em prismas de concreto (a) e ilustração do mesmo (b).	58
Figura 32. Disposição de armaduras e de forma adotada para os ensaios de flexão em quatro pontos	59

Figura 33. Distribuição dos reforços, longitudinais e transversais, dos apoios e pontos de aplicação de carga, adotados para os ensaios em vigas.	60
Figura 34. Esquema adotado para ensaios de flexão: (a) instrumentação, pontos de aplicação de carga e apoios; (b) Pórtico usado para os ensaios.	61
Figura 35. Resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial com (a) e sem adição de fibras (b).	63
Figura 36. Resultados obtidos nos ensaios de tração direta: a) concreto puro obtido por Silveira[25]; b) com adição de fibras de polipropileno.	64
Figura 37. Modos de falhas dos corpos de prova de concreto submetidos a tração (a) e um detalhe do mesmo (ultimo corpo de prova de cima para baixo)	64
Figura 38. a) Resultados obtidos para os ensaios de tração direta em barras de PRFV; b) modo de falha das barras ensaiadas.	66
Figura 39. Resultado do ensaio de tração direta em barra de aço	67
Figura 40. Comportamento típico dos ensaios de arrancamento	68
Figura 41. Resultados dos ensaios de arrancamento de barras de PRFV obtidos pelos LVDTs do lado carregado: a) sem fibras; b) com fibras	69
Figura 42. Resultados dos ensaios de arrancamento de barras de PRFV obtidos pelo LVDT descarregado para corpos de prova sem fibras (a) e com fibras (b)	69
Figura 43. Resultados dos ensaios de arrancamento de barras de aço obtidos pelos LVDTs descarregado (a) e carregado (b)	70
Figura 44. Resultados dos ensaios de tração direta em prismas de concreto reforçados por barras de PRFV: (a) sem adição de fibra; (b) com adição de fibra	72
Figura 45. Modo de falha dos primas reforçados por barras de GFRP à tração: a) SF-P1; b) SF-P2; c) SF-P3; d) SF-P4; e) CF-P1; f) CF-P2 g) CF-P4	73
Figura 46. Comparação entre a média do fator de enrijecimento com o acrescimo de deformação dos resultados obtidos em primas de concreto reforçado com barras de PRFV (com e sem fibras) e com barras de aço (Silveira [65])	74
Figura 47. Detalhe do fendilhamento que ocorreu no corpo de prova SF-P1	75
Figura 48. Comparação entre os resultados obtidos com os transdutores de deslocamento e o software GOM correlate: a) SF-P3; b) SF-P4; c) CF-P1; d) CF-P4	76

Figura 49. Método adotado para medição da abertura de fissuras (a) e verificação do deslocamento (b) no programa GOM correlate.	76
Figura 50. Resultado da análise de abertura de fissuras obtidas com a análise de imagens: (a) media das fissuras; (b) evolução da primeira fissura	78
Figura 51. Distância média entre fissuras com o acréscimo de deformação	78
Figura 52. Comparação de resultados experimentais e analíticos para o espaçamento entre fissuras em prismas de concreto reforçado.	79
Figura 53. Resultados dos ensaios de flexão para as vigas reforçadas com barras de PRFV	80
Figura 54. Resultados dos ensaios de flexão para as vigas reforçadas com barras de PRFV	81
Figura 55. Resultados dos ensaios de flexão para as vigas reforçadas com barras de PRFV com uma deflexão até 5 mm	82
Figura 56. Modos de falha das vigas reforçadas por GFRP ensaiadas: a) CF-P1; b) CF-P2; c) SF-P2; d) SF-P1	82
Figura 57. Método adotado para medição da abertura de fissuras (a) e verificação do deslocamento (b) no programa GOM correlate para o ensaio de flexão em quatro pontos.	83
Figura 58. Comparação de aquisição dos dados do comportamento força-deflexão entre o software GOM correlate e o transdutor de deslocamento posicionado no centro do vão: a) SF-P1; b) CF-P1; c) CF-P2; d) SF-AAeq; f) SF-AEeq.	84
Figura 59. Resultados momento-curvatura obtidos pela análise de imagens: (a) até a ruptura; (b) até uma curvatura de 0,02. .	85
Figura 60. Resultados de momento-abertura de fissura média obtidos nos ensaios de flexão de quatro pontos	86
Figura 61. Resultado experimental e analítico para as vigas reforçadas com barras de GFRP (b) e aço (a).	87
Figura 62. Resultado experimental e analítico para as vigas reforçadas com barras de GFRP considerando um módulo de 41 GPa.	89

Lista de tabelas

Tabela 1. Propriedades típicas de fibras usadas como reforço discreto adaptada de Bentur et. al (2007)	26
Tabela 2. Traço do concreto utilizado	47
Tabela 3. Propriedades da barras de GFRP fornecidas pela empresa Stratus Compostos Estruturais.	49
Tabela 4. Propriedades das fibras de polipropileno usada na pesquisa	50
Tabela 5. Resultado dos ensaios de compressão uniaxial.	63
Tabela 6. Resultados dos ensaios de tração direta do concreto com adição de 1% de fibras de polipropileno	65
Tabela 7. Resultados dos ensaios de tração direta em barras de GFRP.	66
Tabela 8. Tensão (τ) e deslizamento no extremo carregado (S_c) e descarregado (S_d) obtidos nos ensaios de arrancamento para as barras de GFRP embebidas em concreto simples e com fibra e para as barras de aço em concreto simples.	71
Tabela 9. Resultado dos ensaios de tração direta em prismas de concreto reforçado	74
Tabela 10. Resultados obtidos pela análise de imagens nos prismas de concreto.	77
Tabela 11. Resultado do momento aplicado para aberturas de fissura determinadas sugeridos pela norma canadense [70] obtidos com DIC.	85
Tabela 12. Resultado experimental e analítico para as vigas reforçadas com barras de GFRP e aço.	88

1 INTRODUÇÃO

A utilização de concreto armado com barras de aço é uma das técnicas de construção mais difundidas no mundo. Como consequência, a utilização destes materiais é responsável por uma grande fatia do mercado da construção civil. Entretanto, em condições ambientes severas, tais como, ambientes marítimos ou de alto teor de dióxido de carbono, as barras de aço podem sofrer corrosão caso não haja um cobrimento de concreto adequado, afetando sua durabilidade e performance a longo prazo. Ainda assim, elementos de concreto armado convencional necessitam de manutenções periódicas, o que resulta em um elevado custo adicional. Uma alternativa para resolver este problema consiste na utilização de barras de polímero reforçado por fibras de vidro (glass fiber reinforced polymer, GFRP, em inglês) no lugar das barras de aço. Esta solução vem ganhando espaço no mercado nos últimos anos devido à sua alta resistência à tração, baixo custo e peso específico e por possuir propriedades não corrosivas e não condutoras. Essa maior procura tem levado a um crescente número de pesquisas sobre o material.

Apesar das muitas vantagens, as barras de GFRP possuem desvantagens em termos mecânicos quando comparadas com as barras de aço. Elas possuem um módulo de elasticidade aproximadamente cinco vezes menor que o do aço e, por isso, quando usadas como reforço de estruturas de concreto, o dimensionamento pode ser restrito devido a grandes deformações ou a um alto grau de fissuração. Somado a este fato, as barras de GFRP possuem um comportamento linear-elástico, o que resulta em uma ruptura frágil. No caso de vigas de concreto armado com barras de aço, o colapso frágil pode ser evitado dimensionando o material de modo que o aço escoie antes do concreto atingir a sua resistência máxima à compressão. Já em vigas reforçadas pelas barras de GFRP, isto não é possível.

O uso de fibras incorporadas ao concreto é uma solução para promover rigidez, controle de fissuração e um comportamento mais dúctil para o mesmo. Tirando proveito dessas qualidades, o presente trabalho tem como foco investigar a influência da adição de fibras de polipropileno no concreto como uma forma de controlar ou minimizar as deficiências de concreto reforçado por barras de GFRP.

1.1 APLICAÇÕES

A aplicação de barras de GFRP como reforço de concreto armado vem ganhando muito espaço nos últimos anos em construções marítimas (Figura 3-a), de estradas (Figura 3-b), pontes, edifícios garagem e contenções (Figura 1-a) devido a sua alta resistência aos ataques de agentes agressivos do ambiente [1]. Além disso, sua transparência eletromagnética faz com que seja uma boa alternativa para estruturas de sala de ressonância magnética, torres de telecomunicações e transportes ferroviários. Uma aplicação secundária seria em desemboque de túneis. A menor dureza e baixa resistência ao cisalhamento permitem que sejam cortadas com maior facilidade, tendo sido recomendadas em contenções que necessitam ser atravessadas por equipamentos como o TBM (*Tunnel boring machines*, em inglês), conforme a Figura 1-b.



(a)



(b)

Figura 1. a) pilares usados para contenções de tuneis no Canada; b) TBM atravessando uma contenção reforçada por GFRP para a realização de um desemboque de um túnel. (<http://www.vrodcanada.com>)

Sua utilização no mercado foi dada inicialmente no Japão e China, para a utilização das barras principalmente como reforço em tabuleiros de pontes e de obras subterrâneas. Em seguida, na década de 90, a Europa e a América do Norte começaram a adotar o reforço não-metálico em diversas obras, fomentando o desenvolvimento de normas técnicas [2]. Em obras de arte como, por exemplo, nas pontes de Southview (Figura 2-a) e Walker, no Missouri, e Sierrita de la Cruz, no Texas, Estados Unidos, as barras foram empregadas como reforço principal dos

tabuleiros. Após 15-17 anos em serviço expostas às condições ambientes, estas não apresentaram nenhum sinal de degradação [3]. A Figura 2 apresenta dois exemplos de aplicação das barras em pontes, nos Estados Unidos.

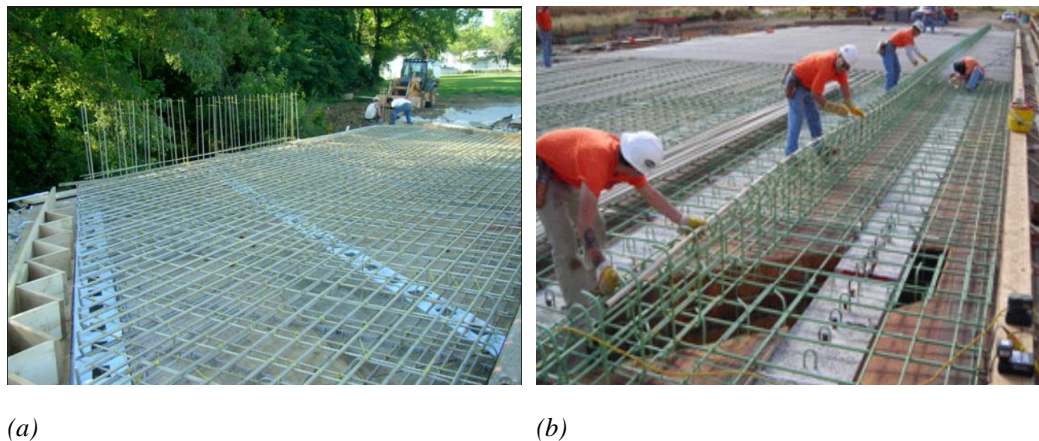


Figura 2. a) Ponte de Southview na Pennsylvania, Estado Unidos;; b) Ponte de Crow Creek no Iowa, Estados Unidos
(http://aslanfrp.com/Aslan100/Aslan100_GFRP_Bridges.html)

Em inúmeras empresas ao redor do mundo, esta tecnologia vem sendo empregada com sucesso, como a canadense Pultrall (V-Rod) e a americana Aslan, que possuem ampla experiência na produção e utilização das barras de GFRP em obras de infraestrutura. Na Europa a britânica Rotafix, a italiana ATP e a alemã Fibrolux, são alguns exemplos de empresas que já se estabeleceram no mercado de barras pultrudadas. No Brasil, tem-se a Stratus como forte representante do uso de barras de GFRP na construção civil.

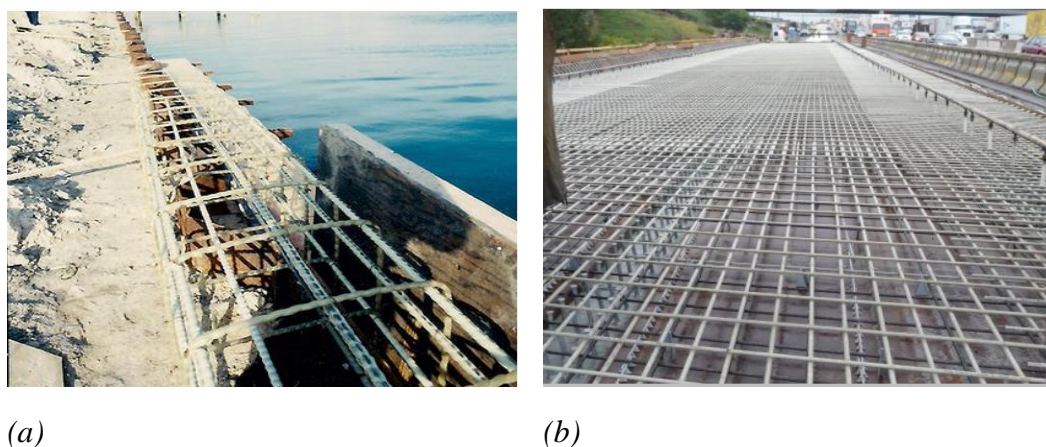


Figura 3. a) Barras de GFRP fornecidas pela empresa tillco para conteços marítimas (<http://www.tillco.com>); b) barras de GFRP fornecidas pela empresa Vrod em uma estrada localizada em Toronto, Canada (<http://www.vrodcanada.com/>)

Conforme já citado, o uso de fibras dispersas em concreto é amplamente conhecido e aplicado para combater o excesso de fissuração, além de melhorar o comportamento do concreto tracionado. A utilização de fibras de polipropileno já é bem difundida no mercado e comercializada por inúmeras empresas ao redor do mundo. As principais aplicações para este material são pré-moldados e pisos industriais. Neste último, o uso das fibras pode, até certo ponto, substituir as telas soldadas.

Além disso, as fibras vêm se destacando como revestimento secundário de túneis [4]. Em situações de incêndio ou altas temperaturas, o confinamento somado às elevadas temperaturas podem resultar em deslocamentos agressivos do concreto devido à elevada poro-pressão gerada pelo vapor d'água aprisionado. As fibras de polipropileno derretem a 170°C, criam um caminho de saída para o vapor, evitando o deslocamento, que normalmente ocorre entre 190 e 250°C. Desta forma, além de auxiliar no controle de fissuração, a fibra auxilia no comportamento em altas temperaturas [5].



(a)

(b)

Figura 4. piso industrial (a) e concreto projetado (b) com fibras de polipropileno (<http://awacomercial.com.br>)

1.2 MOTIVAÇÃO

Por trás deste estudo está o desejo de promover o uso e obter dados a respeito de elementos estruturais alternativos ao concreto armado convencional, que necessitem de menos manutenção durante sua vida útil e com propriedades mecânicas satisfatórias para sua aplicação. A escolha dos materiais constituintes foi feita visando viabilidade econômica do elemento estrutural. As barras de GFRP foram adotadas, uma vez que, dentre os materiais poliméricos reforçados por fibras contínuas, esta combinação traria menor custo de aplicação. A fim de manter o caráter econômico, durável e não condutor da estrutura, as fibras de polipropileno foram adotadas para atuar em conjunto às barras de GFRP

1.3 OBJETIVO

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar o comportamento de estruturas de concreto reforçada por barras de GFRP submetidas à flexão e à tração direta, considerando a influência da adição de fibras de polipropileno à matriz cimentícia na fissuração, rigidez e ductilidade. Para esta avaliação alguns objetivos específicos foram propostos, são eles:

- Caracterização dos materiais constituintes, dentre eles, concreto simples e com fibras misturadas submetido à tração direta e à compressão axial, e barras de GFRP sob efeito de tração direta;
- Caracterização da interface entre as barras de GFRP e o concreto sem e com adição de fibras de polipropileno por meio de ensaios de arrancamento (*pullout*). Comparação dos resultados obtidos com seu correspondente com barras de aço;
- Determinação do efeito de enrijecimento à tração (*tension stiffening*) e do comportamento à fissuração através de ensaios de tração direta em prismas de concreto (com e sem fibras) reforçados longitudinalmente por uma barra de GFRP. Comparação dos resultados obtidos com seu correspondente com barras de aço;
- Determinação do comportamento de fissuração, ganho de rigidez à flexão e ductilidade com o uso de fibras de polipropileno em vigas de concreto armadas com barras com barras de GFRP submetidas a ensaios de flexão

em quatro pontos. Assim como nas avaliações anteriores, por fim será realizada uma comparação dos resultados com os obtidos em vigas de concreto armadas com barras de aço;

- Comparação dos resultados experimentais com expressões encontradas na literatura para determinar o espaçamento entre fissuras com relação aos ensaios de tração direta em prismas, e com um modelo analítico para o comportamento momento-curvatura no caso dos ensaios de flexão.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O Capítulo 1 faz uma breve explicação sobre o tema abordado, seguido pela relevância, desafios e aplicações associadas ao mesmo. Também apresenta a motivação, o objetivo e a estrutura da pesquisa.

No Capítulo 2 são abordadas as propriedades individuais previamente pesquisadas de cada material utilizado neste trabalho bem como suas propriedades quando agindo em conjunto, como o comportamento da ligação entre eles. Além disso, o capítulo mostra estudos anteriores voltados para ensaios de tração direta e flexão de concreto reforçado com fibras e armados com barras de GFRP.

No Capítulo 3 as características dos materiais utilizados serão apresentadas junto com as metodologias de moldagem e de ensaios realizados.

No Capítulo 4 os resultados obtidos nos ensaios realizados serão expostos e analisados.

No Capítulo 5 as conclusões obtidas com o programa experimental são apresentadas e algumas sugestões para trabalhos futuros são feitas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo visa apresentar propriedades e conceitos necessários para a análise realizada ao longo deste trabalho. Será feita uma breve introdução sobre os materiais compósitos, seguida de uma explanação sobre as propriedades mecânicas e durabilidade dos materiais adotados, a saber: concreto reforçado com fibras (CRF) e barras de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP). Por fim, serão apresentados alguns estudos focados no desempenho destes materiais independente ou em conjunto sob condições similares às realizadas para este estudo.

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Cada vez mais usados em diversas indústrias, os materiais compósitos surgiram como uma alternativa de se obter características particulares para um material, diante de uma certa aplicação. Sendo assim, um material compósito pode ser definido como aquele composto por dois ou mais materiais quimicamente distintos e separáveis, que ao serem utilizados em conjunto com proporções específicas e controladas, resultam em um terceiro de desempenho superior que seus componentes separados [6]. Duas fases constituem estes materiais: uma contínua, aglutinante, chamada de matriz, e outra dispersa, também conhecida como reforço. O reforço pode ocorrer de diversas formas: pode ser fibroso, realizado por fibras; flocular, por flocos; laminar, ao utilizar um reforço contínuo com duas direções predominantes (situado em um plano do elemento); e particulado, caso o reforço seja desempenhado por partículas. O conceito não é novidade. Diversos materiais naturais apresentam estas características. Folhas de coqueiro, por exemplo, são sustentadas pela ação das fibras de celulose em uma matriz de lignina e hemicelulose. O osso pode ser outro exemplo de um material compósitos amplamente conhecido, resultado da ação de fibras de colágeno em conjunto com uma matriz mineral chamada de apatita [7].

Na indústria da construção civil, os compósitos mais conhecidos são o concreto, resultado da combinação de pasta de cimento com areia e brita para fornecer estabilidade volumétrica, e o aço, uma liga metálica formada essencialmente por ferro e um reforço de partículas de carbono; o acréscimo de carbono promove maior resistência e menor ductilidade. Vale destacar que a classificação entre os compósitos varia com a escala adotada para a avaliação. Em uma escala macroestrutural, o concreto armado seria o compósito constituído por uma matriz de concreto e um reforço por aço. Já em uma escala microestrutural, o concreto e o aço seriam compósitos distintos [8].

No presente trabalho, matrizes cimentícias e poliméricas foram adotadas em escalas distintas, ambas reforçadas por fibras. A adoção de fibras como reforço de matrizes pode ser realizada de diversas formas, cabendo-se destacar: distribuição aleatória de fibras discretas; e de forma contínua, ou seja, inúmeros filamentos unidos, alinhados em uma direção preferencial. Neste estudo, barras de matriz polimérica com reforço contínuo de fibras de vidro, foram utilizadas em conjunto com fibras de polipropileno aleatoriamente distribuídas em matriz de concreto como reforço discreto. Sendo assim, estes tipos de reforço serão avaliados nas subseções a seguir.

2.1.1 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS POR FIBRAS CONTÍNUAS

A utilização de compósitos poliméricos reforçados por fibras ocorreu inicialmente para aplicações aeroespaciais, militares e automobilísticas na década de 40. O seu uso se dava na forma de casco para barcos e componentes de aeronaves [9]. Sua aplicação na indústria da construção civil, mais especificamente como reforço interno de estruturas de concreto, ocorreu nos anos 60 em função da elevada corrosão das barras de aço em estruturas de concreto armado expostas a ambientes agressivos. Nesse contexto, uma das soluções propostas foi a substituição das barras de aço por barras de GFRP [10]. No entanto, devido ao elevado custo para a época esta solução foi inicialmente descartada. Com o passar dos anos e evolução das pesquisas e tecnologias no setor, o custo dos materiais e de produção se reduziu,

principalmente com os avanços no processo de pultrusão, onde fibras contínuas são alinhadas e dispostas em determinada forma – dependendo da seção transversal do elemento – e são imersas em um polímero, conforme Figura 5. Desta forma, a fabricação destes elementos também ganha eficiência, capaz de ser realizada em um espaço reduzido se comparado às barras de aço. Paralelamente, uma nova demanda, desta vez por materiais não condutores magnéticos surgia para serem empregados em salas de ressonância magnética. Como consequência, nos anos 80, a utilização de barras de GFRP como reforço de concreto armado passou a ganhar mais atenção de engenheiros e espaço no mercado. Atualmente esta tecnologia é principalmente empregada na construção de hospitais, pontes, contenções marítimas, dentre outras estruturas[11].

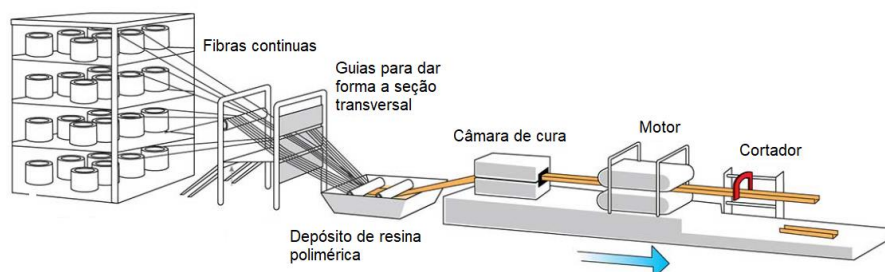


Figura 5. Ilustração do processo de pultrusão(<http://fiberfence.com/about-composite/the-process/pultrusion-process/>)

2.1.1.1 PROPRIEDADES DAS BARRAS DE GFRP

Barras de polímero reforçado com fibra (fiber reinforced polymer, FRP, em inglês) são compostas por fibras longas embebidas em resina polimérica. São materiais anisotrópicos, tendo seu desempenho afetado pela direção de aplicação de tensão. Sendo assim, suas propriedades sob esforços longitudinais, são governadas pelas fibras enquanto sob esforços transversais, suas propriedades são governadas pela matriz polimérica. As resinas termofixas, dentre elas a epóxi, fenólica e éster vinílica são as mais usadas para o processo de fabricação das barras [12, 13]. Dentre as fibras mais usadas, destacam-se as fibras de vidro (GFRP), aramida (AFRP) e carbono (CFRP). Suas propriedades variam de acordo com a relação de reforço/matriz, com a escolha da matriz e das fibras utilizadas e com a condição ambiente [11]. As fibras de vidro são o material mais utilizado como

reforço de compósitos, principalmente devido ao seu baixo custo e alta resistência mecânica. As barras de GFRP, comumente encontradas no mercado têm uma resistência à tração variando 400 a 1000 MPa em temperatura ambiente, com um módulo de elasticidade entre 22 e 65 GPa [14–17]. A Figura 6 a seguir, apresenta amostras de barras de GFRP com diferentes superfícies.

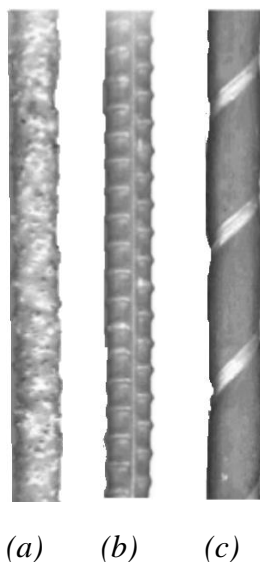


Figura 6. Tipos de superfícies de barras de FRP: a) com cobrimento de areia; b) nervuras c) com fio helicoidal ACI440.1R-06

Apesar do bom desempenho mecânico, suas propriedades podem ser afetadas por condições de temperatura e umidade. Em um estudo, realizado por Robert e Benmokrane [15] foi investigado o efeito da temperatura em barras saturadas. Para isso, as amostras de barra foram submersas em água a 50°C. A Figura 7 apresenta os resultados obtido pelos autores. Em variações baixas de temperaturas (-40 até 50°C) não houve grandes alterações nas propriedades do material. Já para temperaturas acima de 50°C, degradações começam a ocorrer na matriz polimérica. Após 150°C, microfissuras se propagam e deterioram ainda mais a matriz, resultando em uma queda acentuada nas propriedades da barra. A redução de temperatura resulta em um acréscimo de resistência, explicado por um aumento de rigidez da matriz. O congelamento da água e consequente expansão de seu volume, presente nas amostras saturadas, poderia causar microfissuras e reduzir a performance do material. No entanto, deteriorações na microestrutura do material só foram observadas em temperaturas abaixo de - 60°C.

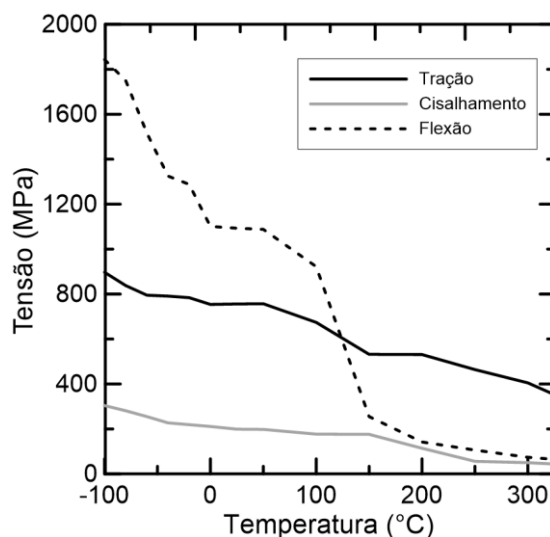


Figura 7. Resultados obtidos por Robert & Benmokrane (2010) para a resistência a tração, cisalhamento e flexão de barras GFRP expostas a diferentes temperaturas.

Em outro estudo, realizado também por Robert e Benmokrane [18], os autores avaliaram o efeito da exposição em soluções salinas nas propriedades de barras GFRP embebidas em concreto. Nenhuma alteração significativa na microestrutura do material foi observada após 365 dias de imersão em soluções salinas sob temperaturas de 10, 50 e 70°C. Neste estudo também foi realizado uma previsão da resistência a tração ao longo dos anos usando a relação de Arrhenius. Os resultados mostraram uma redução de aproximadamente 32,5% da resistência a tração para as amostras expostas a um ambiente contendo alto teor de sal e uma temperatura de 50°C e 25% para uma temperatura de 10°C em 200 anos de vida útil.

Micelli e Nanni [16] investigaram o efeito da exposição de barras GFRP a ambientes alcalinos. Dois tipos de GFRP foram avaliados, um com matriz de poliéster e outro com resina termoplástica. A exposição a ambientes alcalinos por 42 dias não causou reduções significativas nas propriedades das barras de resina termoplásticas. Já as barras com resina de poliéster sofreram uma redução de 40% na resistência a tração. Logo a combinação de fibras e matriz errada pode resultar em perdas expressivas nas propriedades mecânicas com o tempo. Quando submetidas a ciclos de variação de temperatura e de umidade enquanto expostas à radiação ultravioleta, as amostras não sofreram danos significativos.

Uma vez que materiais poliméricos tendem a sofrer variações expressivas de deformação com o tempo se comparadas com o aço, uma análise de fluência

deve ser realizada para não comprometer a segurança e a desempenho deste material em serviço. Berardi *et al.*[19] investigaram a fluência de compósitos poliméricos reforçados por fibras de vidro e dos constituintes individualmente. Os autores observaram deformações viscoelásticas significativas para a matriz, chegando a 30% após 3800 horas de ensaio. Entretanto, os ensaios nas fibras e no compósito, apresentaram deformações inferiores a 5%. Ascione *et al* [20] também obtiveram o mesmo resultado. Os autores atribuem este comportamento do compósito à diferença entre as propriedades reológicas das suas fases, resultando em uma migração de tensão da matriz para o reforço.

2.1.2 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS POR FIBRAS DISPERSAS

A deficiência de materiais cimentícios em resistir à esforços de tração é tida como uma de suas principais desvantagens. Ao longo dos anos soluções foram propostas para superar esta ineficiência, a primeira delas foi a incorporação de elementos de aço distribuídos de forma continua junto ao concreto, dando origem ao concreto armado. Entretanto, mesmo sem estar submetido a tensões elevadas, o material pode apresentar microfissuras imperceptíveis a olho nu. Quando esta fissuração não é controlada, o material pode ficar exposto a ataques de agentes agressivos do meio externo. Sendo assim, fibras distribuídas aleatoriamente no material cimentício são utilizadas para melhorar a distribuição e o controle de formação das fissuras. Isto se deve ao fato da fibra agir como uma “ponte” para transmissão de forças de tração entre as faces da fissura. Desta forma, o material passa a absorver energia na zona fissurada, ganhando ductilidade e tenacidade. O uso de fibras vem sendo explorado de diversas maneiras, como para redução da taxa de armadura ao cortante, substituição das telas soldadas usadas em lajes, aumento da resistência ao impacto, para evitar o deslocamento de estruturas expostas ao fogo, além do controle de fissuras em elementos de concreto[5, 21, 22]

Como existem inúmeros tipos de fibras dispersas, estas podem ser classificadas de acordo com seu material, propriedades físicas/químicas ou quanto suas propriedades mecânicas [23]. A Tabela 1, adaptada de Bentur e Mindess [21],

apresenta um resumo de algumas propriedades das fibras mais usadas em engenharia.

Tabela 1. Propriedades típicas de fibras usadas como reforço discreto adaptada de Bentur, Arnon, Mindess (2007)

Fibra	Diâmetro (μm)	Peso específico(g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistencia à tração (MPa)
Aço	5 - 500	7,84	200	500 - 2000
Vidro	9 - 15	2,60	70 - 80	2000 - 4000
Polipropileno	20 - 400	0,90 - 0,95	3,5 - 10	450 - 760
Aramida	10 - 12	1,44	63 - 120	2300 - 3500
Carbono	8 - 9	1,60 - 1,70	230 - 380	2500 - 4000
Nylon	23 - 400	1,14	4,1 - 5,2	750 - 1000
Celulose	-	1,20	10	300 - 500
Acrílico	18	1,18	14 - 19,5	400 - 1000
Polietileno	25 - 1000	0,92 - 0,96	5	80 - 600
Madeira	-	1,50	71	900
Sisal	10 - 50	1,50	-	800

Além das propriedades mecânicas da fibra, a interface entre a fibras adotada e o material cimentício é de suma importância para um reforço eficiente. Ela é responsável por transmitir as tensões entre os dois materiais e promover a atuação conjunta dos mesmos. A utilização de um reforço inerte em pastas de cimento promove uma zona de transição interfacial (*interfacial transition zone*, ITZ, em inglês) entre as fases. As propriedades desta região podem variar de acordo com a relação entre o tamanho do grão de cimento e o reforço fibroso. Considerando o caso de macrofibras de polipropileno do presente estudo, a ITZ é caracterizada por um grande depósito de hidróxido de cálcio e vazios com um baixo teor de silicato de cálcio hidratado, sendo, portanto, uma região mais fraca que o resto da matriz, conforme Figura 8. Logo, o volume de fibras e consequentemente o volume de ITZ formadas são fatores determinantes para o uso eficiente do compósito. Propriedades satisfatórias são normalmente obtidas com o uso de fibras em material cimentício em frações volumétricas (V_f) de até 2% [24].

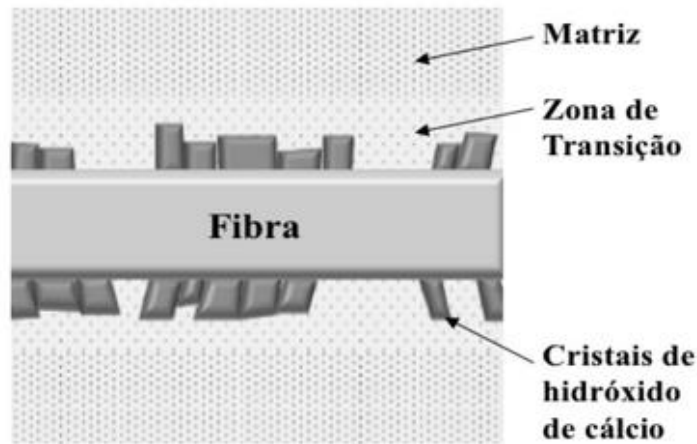


Figura 8 Zona de transição interfacial entre fibra e matriz cimentícia [25]

A transmissão de esforços ocorre em dois momentos distintos: antes da fissuração e após a fissuração. A maior contribuição das fibras ocorre no segundo momento, onde elas atravessam as fissuras, prevenindo a perda total de capacidade de carga[21]. A interação entre os materiais pode ser química ou por atrito, caso a carga seja tal que promova pequenos deslizamento relativos entre fibra e matriz. Além disso, há a possibilidade de deformações nas fibras resultarem em ancoragem mecânica, aumentando a resistência ao arrancamento da fibra. Estes processos serão abordados mais a fundo posteriormente, na seção 2.1.3. No entanto, a Figura 9 [26] dá uma ideia de como ocorre a distribuição de tensões na interface.

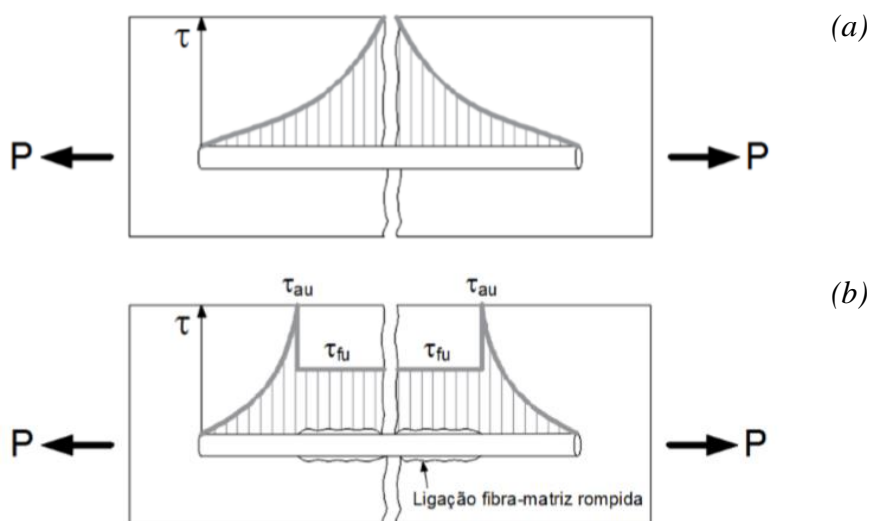


Figura 9. Tensão cisalhante atuando ao longo da interface fibra-matriz: a) com materiais aderidos quimicamente b) após um deslizamento relativo entre fibra e matriz [26]

A Figura 9 também mostra outro fator de extrema importância para a compreensão do comportamento destes materiais: o comprimento da fibra. Como é possível observar, o desenvolvimento de tensões antes da formação da fissura e do rompimento da ligação fibra-matriz leva a tensões nulas nas extremidades e máximas no centro. Com isso, em fibras de comportamento frágil, as tensões atuando ao longo do comprimento da fibra não devem superar sua resistência, evitando ruptura brusca e, assim, contribuindo para a ductilidade do conjunto. Logo, a eficiência do reforço fibroso em matrizes cimentícias, depende das propriedades mecânicas e geométricas da fibra, da ligação fibra-matriz e do volume de fibras adotado.

Fanella e Naaman [27] avaliaram o comportamento à compressão de argamassas reforçadas com uma fração volumétrica de 1% de fibras de diversos tipos. Alterações nos valores de resistência e módulo foram observadas quando da introdução de fibras, apresentando aumentos ou reduções em função do tipo de fibra utilizado. No entanto, chama mais atenção o comportamento pós-pico, onde as argamassas com fibra apresentam um ramo descendente mais suave, resultando em maior ductilidade em nível de material. Na Figura 10, os diagramas tensão-deformação obtidos pelos autores são apresentados.

Dois comportamentos distintos podem ser observados quando estes materiais são submetidos à tensões. O primeiro ocorre quando a fração volumétrica é tal que proporciona apenas ganho de deformação, sem acréscimo de resistência após a fissuração (*strain softening*). O segundo é caracterizado pelo ganho de resistência e de deformação após a fissuração (*strain hardening*). Independente do comportamento, o material passa a ter uma resistência residual – após a ruptura – mais expressiva.

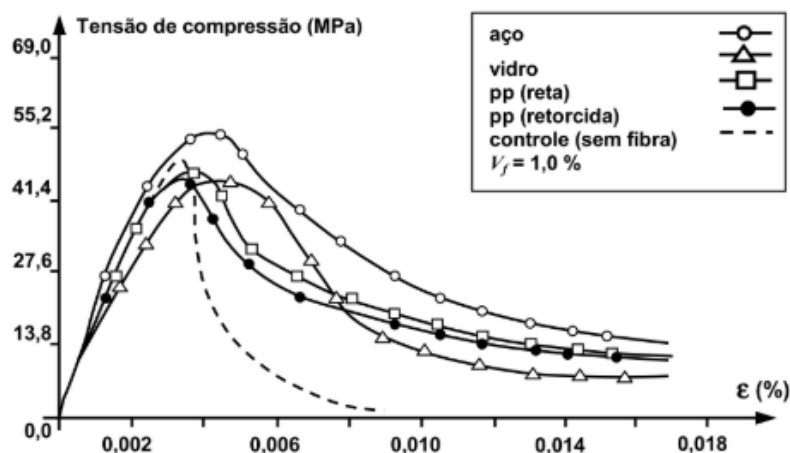


Figura 10 comportamento de compostos cimentícios reforçados por fibras discretas submetidos à compressão obtido por Fanella e Naaman [27]

Vale destacar que a adoção de fibras discretas como reforço de matriz cimentícia afeta a trabalhabilidade do material em estado fresco. Parte da água na mistura fica retida nas faces laterais das fibras e, dependendo da fibra, a parte da água pode ser absorvida. Estudos reportaram uma queda nas propriedades em estado fresco dos materiais reforçados por fibras [28–30].

2.1.2.1 FIBRAS DE POLIPROPILENO COMO REFORÇO DISCRETO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS

Fibras de polipropileno são fibras sintéticas de baixos custo e peso específico, com uma resistência à tração variando de 450 a 760 MPa e um módulo de elasticidade de 3,5 a 10 GPa. Se comparadas às fibras de aço, por exemplo, têm um peso específico e um custo de oito e dez vezes inferiores, respectivamente [31]. A fibra é resistente à corrosão, a ambientes alcalinos e não sofre ataques da matriz cimentícia, como é o caso das fibras naturais e de vidro. Por outro lado, a fibra apresenta propriedades mecânicas inferiores, baixa aderência química com a matriz e é sensível à incidência solar e oxigênio [26].

Normalmente, os compostos cimentícios reforçados com fibras de polipropileno possuem resistência à compressão inferior àquela observada para a matriz pura. Akça et al. [32] avaliaram o efeito da adição de 1 e 1,5% de fibras nas propriedades mecânicas de concreto. Os autores reportaram um decréscimo na

capacidade de resistir aos esforços de compressão de 17 e 22% nos compósitos com fração volumétrica de 1 e 1,5%, respectivamente. Entretanto, houve um acréscimo na resistência à tração e a flexão respectivamente de 25 e 17% para os espécimes com 1% de fibra e 37 e 25% para os espécimes com 1,5%.

Monteiro et al. [33] realizaram um estudo sobre o efeito de diferentes frações volumétricas de fibras de polipropileno em matrizes cimentícias e compararam com os resultados para fibras de aço. Os autores reportaram um decréscimo de resistência à flexão para quantidades de 0,33% e 0,66% de fibra. Já para 1,1% de fibras de PP houve um acréscimo de aproximadamente 10% na tensão máxima de flexão. Além disso, com o aumento da fração volumétrica destas, a abertura de fissuras diminuiu consideravelmente. Comparando com o efeito da adição de fibras metálicas no comportamento do compósito a flexão vemos que as fibras de aço promovem ganhos de ductilidade e resistência após a primeira fissura (*deflection-hardening*) nos compósitos. Já o comportamento dos compósitos reforçados por fibras de polipropileno foi caracterizado por uma redução de resistência após a primeira fissura (*deflection-softening*). Ambas apresentaram ganhos expressivos de ductilidade. A Figura 11-a, apresenta a diferença entre os comportamentos observados. A explicação para esta diferença de comportamento está relacionada com a Figura 11-b, onde os autores comparam aderência de fibras de aço e de polipropileno com a matriz através de ensaios de *pullout*. Como é possível observar, a resistência ao arrancamento da fibra de aço chega a ser sete vezes maior que a resistência da fibra de polipropileno. Somado a isso, tem-se que o módulo de elasticidade da fibra de aço, conforme a Tabela 1, chega a ser quarenta vezes maior que o módulo de elasticidade da fibra de polipropileno.

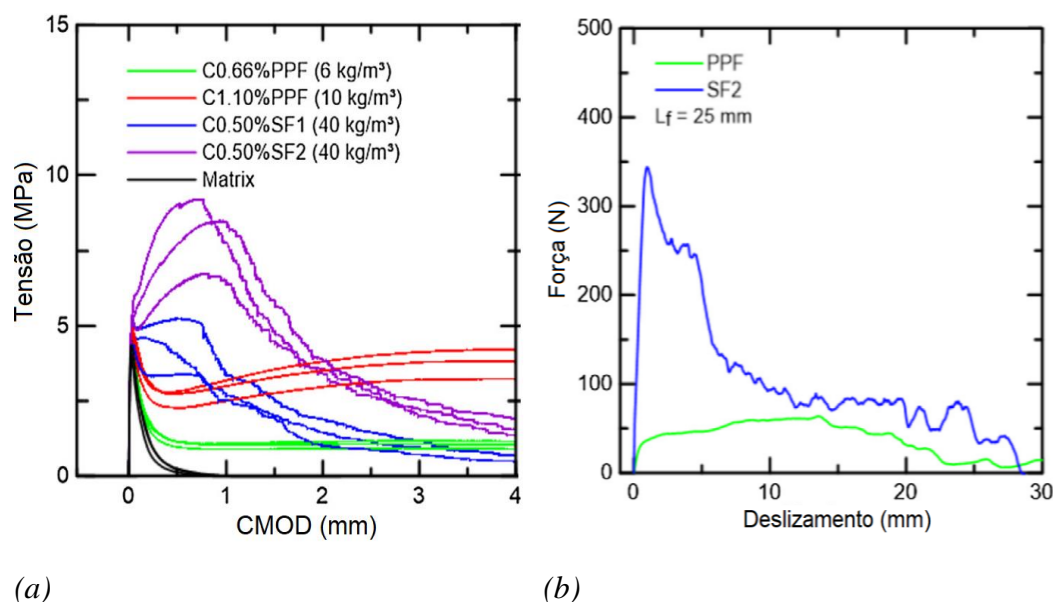


Figura 11. Resultados obtidos por Monteiro et al. [33] a) Tensão - abertura de fissura (CMOD, do inglês crack mouth opening displacement) b) Força – deslizamento da fibra

2.1.3 LIGAÇÃO ENTRE BARRAS DE GFRP E MATRIZ CIMENTÍCIA

O desempenho do concreto armado, assim como de um material compósito qualquer, depende das propriedades mecânicas de seus constituintes e da ligação entre estes. Esta última é responsável por transmitir os esforços atuando no concreto para o reforço. Parâmetros de dimensionamento, como comprimento de ancoragem, deflexão de elementos, espaçamento entre fissuras e tamanho das fissuras dependem diretamente da ligação entre os materiais. Propriedades das barras de GFRP como o comportamento anisotrópico, coeficiente de Poisson e propriedades térmicas fazem a resposta da interface diferir daquela observada para barras de aço [34, 35]. Na presente seção são apresentados dados sobre a caracterização da interface de elementos de concreto armados com barras de GFRP.

A curva tensão-deslizamento é usada para caracterizar a ligação dos materiais podendo ser dividida em duas partes, uma ascendente e outra descendente. A primeira possui um comportamento linear associado com o fato da matriz e reforço estarem aderidos quimicamente, fazendo com que ambos se desloquem por igual (sem deslizamento relativo). Após a adesão química ser superada pela tensão na interface, pequenos deslizamentos entre os materiais começam a ocorrer. Sendo assim, o atrito passa a atuar como mecanismo de transferência de tensão e o

comportamento deixa de ser linear. A segunda etapa é caracterizada pelo desenvolvimento de microfissuras no concreto e consequente pela redução gradual de ancoragem mecânica com o acréscimo do deslizamento. Por fim, sem adesão química e com pouca ancoragem mecânica o comportamento da curva é praticamente constante em função apenas do atrito transferindo os esforços entre os materiais [36, 37].

Em caso de barras lisas e com tratamentos superficiais como impregnação de areia (Figura 6-a), por exemplo, adesão e atrito são responsáveis pela transferência de tensões [34]. Alterações na geometria da superfície são comumente realizadas para melhorar a aderência entre os materiais, dentre as quais destacam-se nervuras na superfície devido a deformações por prensagem (Figura 6-b) e a utilização de fios helicoidais para promover reentrâncias (Figura 6-c). Ambas proporcionam engrenamento mecânico entre a barra e a matriz cimentícia. Desta forma, os três mecanismos (adesão química, atrito e engrenamento mecânico) passam a ser responsáveis por transferir as forças na interface entre matriz e reforço [38]. As Figuras 12-a e b mostra onde cada uma atua em uma barra corrugada.

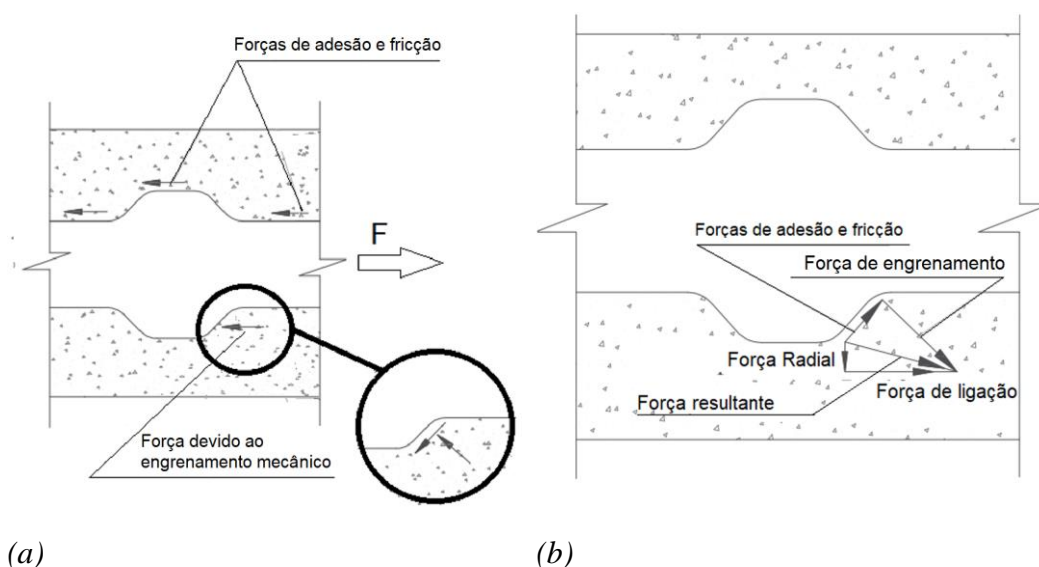


Figura 12 Mecanismos de transferência de forças da interface. Adaptado de Aiello et al.

Alterações na pressão confinante, seja pelo uso de estribos ou por envelopamento do concreto, resultam em ligações mais resistentes. Acréscimos da ordem de 90% na resistência ao arrancamento com o aumento da pressão confinante foram observados no estudo de Malvar [39] e de 84% no estudo de Choi [40] ao

confinar os corpos de prova com uma chapa de aço. Entretanto, no estudo de Tastani e Pantazopoulos [41], o envelopamento dos corpos de prova com uma camada de FRP não fortaleceu a ligação entre os materiais, embora tenha evitado a ruptura do mesmo devido às tensões radiais. Isto pode estar associado com o baixo módulo de elasticidade do material usado para proporcionar confinamento.

Estas variações de resultados também sofrem influência do tipo de tratamento superficial adotado. Aiello et al. [42] avaliaram diferentes superfícies de barras de GFRP embebidas em concreto. Segundo os autores, deformações na superfície da barra promovendo uma ancoragem mecânica podem resultar em ganhos de capacidade de carga da ordem de 3 a 4 vezes se comparado a tratamento de superfície com impregnação de areia. O tipo de deformação adotado para a superfície da barra também influencia. No referido estudo, a diferença entre a performance de barras com entalhes e com rugosidades introduzidas por espirais de fibra chegou a 93%.

Desta forma destaca-se que, comparando com as barras de aço de forma geral, sem levar em conta tratamentos superficiais, as barras de GFRP possuem uma aderência inferior. Essa propriedade pode ser melhorada com tratamentos superficiais. No estudo de Aiello [42], barras de GFRP com tratamento por impregnação por areia chegaram a ter uma resistência ao arrancamento 57% inferiores que as barras de aço tradicionais, enquanto as mesmas com deformações superficiais tiveram um desempenho 53% superior que as barras de aço. Ou seja, tratamentos superficiais podem resultar em ligações mais resistentes para as barras de GFRP, se comparadas com as barras de aço embebidas em concreto.

Outros parâmetros podem afetar a performance da ligação entre os materiais, como por exemplo, as propriedades do concreto. Em barras com deformações superficiais, o concreto na região da ancoragem passa a resistir a forças de tração e compressão conforme Figura 12-b. Sendo assim, para estes casos, a performance de ligação entre os materiais passa a ser influenciada pela resistência do concreto intertravado na barra e não só pela interface entre os materiais [43]. Para barras sem nervuras ou saliências, não há influência significativa da resistência do concreto na performance da interface entre os materiais [44]. Entretanto, a pressão radial exercida pelo concreto pode afetar a interface com a barra de duas

formas. A primeira ocorre devido ao efeito de Poisson quando o concreto sofre deformação longitudinais. Já a segunda, surge com retração do concreto endurecido. Ambas resultam em acréscimo no confinamento e, como consequência, aumentam a resistência ao arrancamento.

O uso de fibras pouco afeta a adesão química entre os materiais, visto que boa parte delas são inertes e não reagem com a matriz. Entretanto, as fibras podem promover confinamento, melhorar a fricção e a ancoragem com a matriz de concreto. Segundo a pesquisa de Yan et al. [45], o uso de fibras de aço e de polivinilálcool (PVA) em frações volumétricas, V_f de 0,5 e 1% reduzem a tensão de adesão química entre a barra de GFRP e o concreto. Para volumes baixos, o uso de fibras de aço resulta em maiores reduções na resistência de adesão química (17%), enquanto que para volumes mais altos, as fibras de PVA provocaram reduções mais significativas (48%). Avaliando a tensão máxima e a degradação da interface, o uso das fibras promoveu melhorias em todos os casos. Já Choi [46] avaliou as propriedades de ligação entre barra de GFRP e concreto reforçado por fibras de 1,5% de PVA e 0,5% de polietileno. O autor observou um acréscimo de 16% na resistência principal de aderência, definida na equação 2.1 proposta pela RILEM-FIP-CEB [47], e nenhuma alteração significativa na tensão máxima devido à presença das fibras. Assim como nos estudos de Yan et al. [45], foram reportadas reduções no deslizamento das barras para a tensão máxima de aderência.

$$\tau_{bm} = \frac{\tau_{0,01} + \tau_{0,1} + \tau_1}{3} \quad (2.1)$$

Onde τ_{bm} é a tensão principal de aderência, $\tau_{0,01}$ é a tensão atuando para uma deslizamento de 0,01 mm; $\tau_{0,1}$ é a tensão atuando para uma deslizamento de 0,1 mm; τ_1 é a tensão atuando para uma deslizamento de 1 mm.

Para fração de 1% em volume de fibras de polipropileno dispersas na matriz de concreto, o resultado reportado por Kim e Lee [48] foi um pouco diferente. Em sua análise sobre o comportamento da ligação com barra de GFRP, os autores reportaram uma redução da tensão máxima de ligação e um acréscimo de deslizamento da barra com o uso das fibras. A explicação pode estar relacionada com o fato destas fibras possuírem baixa aderência com a matriz e baixo módulo de

elasticidade se comparadas às fibras de aço e PVA. Entretanto, no estudo de Ding et al. [36] com frações volumétricas menores de fibras de polipropileno (0,2 e 0,4 %, aproximadamente), a ligação entre os materiais não apresentou esse comportamento. Os autores observaram acréscimos graduais de resistência ao arrancamento de acordo com a fração volumétrica usada. Estes acréscimos chegaram à 23% para 0,4% de fibras usada. Esta disparidade entre os resultados supracitados pode estar associada com o excesso de ITZ com o aumento de fibras, piorando a qualidade da matriz de forma a impactar na aderência com as barras de GFRP

Variações nas condições ambientes também podem resultar em alterações na ligação. No caso de variações de temperatura negativas a ligação pode ser prejudicada. Isto se deve ao fato da retração da barra reduzir a pressão radial promovida pela matriz [34]. Já no estudo de Yan et al. [49], foi observada uma queda na durabilidade do comportamento da ligação reforço-matriz exposta a ciclos de congelamento e descongelamento de aproximadamente 30%. Neste mesmo estudo, os autores também concluíram que a exposição em soluções com alto teor de sal não promove danos relevantes a ligação. Por outro lado, esta exposição, somada a ciclos de congelamento, promove redução da durabilidade da interface para 40%, aproximadamente.

2.2 EFEITO DE ENRIJECIMENTO À TRAÇÃO EM ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO

A contribuição do concreto na rigidez à tração de elementos armados é indiscutível quando estamos lidando com os materiais em regime linear (pre-fissuração). Após a fissuração, o reforço é responsável por transferir toda a força de tração através da fissura. Entretanto, o concreto entre fissuras também se encontra sujeito a tensões de tração – inferiores à resistência à tração, que lhe são transmitidas por aderência entre reforço e matriz. Desta forma, a distribuição de tensões na barra não é uniforme e que o concreto auxilia na rigidez do elemento, proporcionando melhores condições de serviço [50]. A Figura 13 apresenta essa contribuição do concreto em resistir aos esforços de tração.

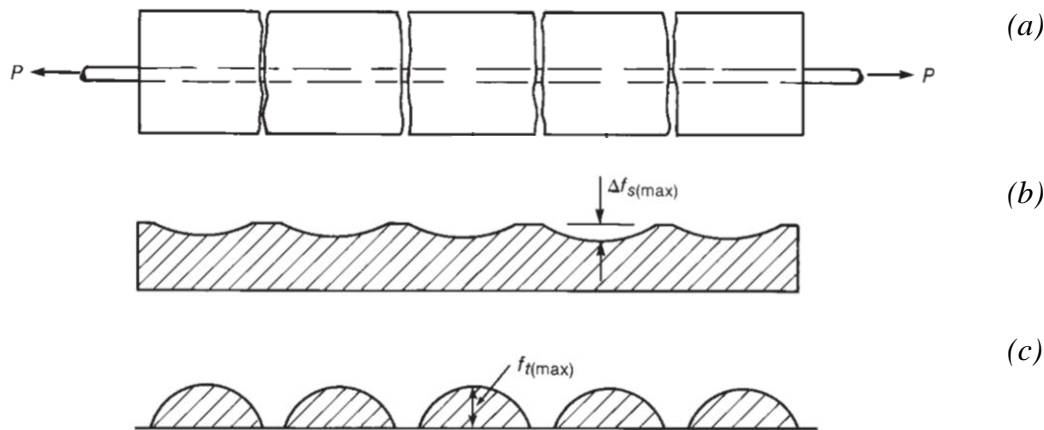


Figura 13. Efeito de enrijecimento à tração [51]: a) Prisma fissurado; b) distribuição de tensões longitudinais no reforço; c) distribuição de tensões normais no concreto.

Este fenômeno foi batizado por Mörsch [52] de *tension stiffening* ou enrijecimento à tração. A Figura 14, adaptada de Silveira [25], apresenta o comportamento típico esperado em um ensaio de tração direta em concreto reforçado por uma barra de aço. Nela é possível observar o desenvolvimento da carga resistida pelo elemento estrutural e pela barra (F_s) com a evolução da deformação média no elemento (ϵ), sendo a diferença entre estas a contribuição do concreto (F_c). O incremento de rigidez pode ser avaliado através do fator de enrijecimento (β), razão da força atuando no concreto (F_c) e a força de primeira fissura (F_{cr}), conforme equação 2.2.

$$\beta = \frac{F_c}{F_{cr}} \quad (2.2)$$

Três estágios são observados no processo de carregamento do elemento de concreto armado tracionado. Inicialmente, tanto matriz quanto o reforço se encontram em regime linear (concreto não-fissurado). Quando a resistência à tração é excedida, fissuras começam a surgir ao longo do comprimento do elemento, de maneira que a barra é a responsável por transferir a força através das fissuras. Entre as fissuras, ocorre transferência de forças entre aço e concreto através da interface e uma nova fissura se forma a cada momento em que as tensões no concreto excedem sua resistência [53]. Esse segundo estágio do comportamento é

denominado de estágio de formação de fissuras. Por fim, essa formação de fissuras cessa e, daí por diante, o acréscimo de forças se reflete apenas no alongamento da barra e consequentemente no aumento da abertura das fissuras. Esse último estágio é caracterizado por estabilização das fissuras. Em caso de reforço com barras de aço, um quarto estágio ocorre em função do escoamento do aço. Ao longo da deformação, a contribuição à rigidez do conjunto oferecida pelo concreto vai diminuindo em função da perda de adesão do concreto com a barra.

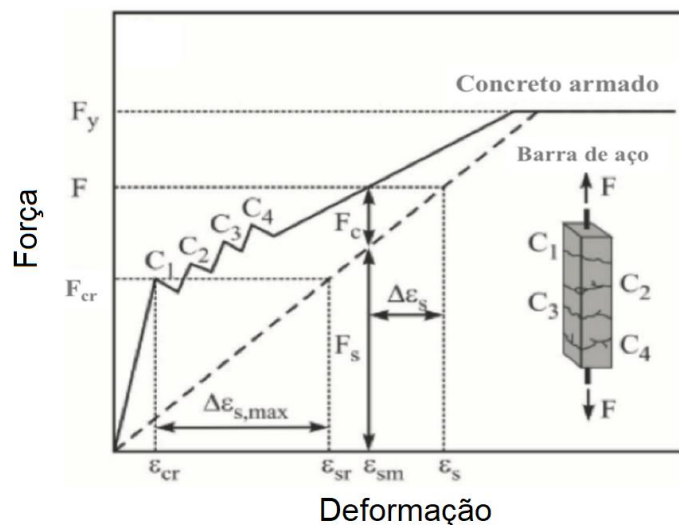


Figura 14. Diagrama de força-deformação de elemento de concreto armado submetidos a tração direta [25]

A rigidez à tração relativa entre matriz e reforço e a interface entre os materiais são os principais responsáveis por este fenômeno. Sendo assim, elementos contendo barras de aço – com módulos mais altos – não recebem tanta contribuição do concreto quando comparados com elementos reforçados com barras de GFRP. Estudos comparando os efeitos de enrijecimento à tração de elementos reforçados com estes dois tipos de barras reportaram uma contribuição muito mais expressiva do concreto quando barras de GFRP foram utilizadas [50, 54].

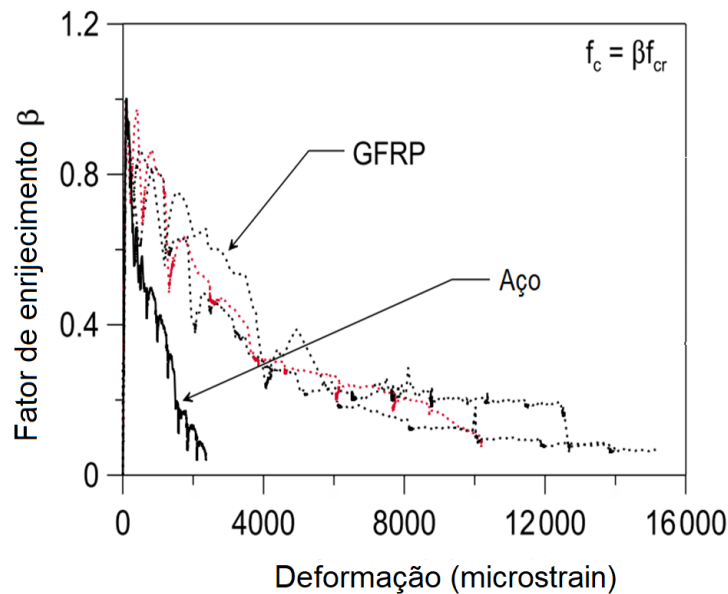


Figura 15. Desenvolvimento do fator de enrijecimento (β) de barras de aço e de GFRP embebidas em concreto com o acréscimo de deformação obtido por Bishop e Paixao [50]

As influências da resistência do concreto e da taxa de armadura no comportamento de prismas de concreto reforçado por GFRP foram avaliadas no estudo de Sooriyaarachchi et al. [55]. Os autores observaram uma grande diferença no comportamento de prismas moldados com resistência e com taxas diferentes. A Figura 16 apresenta alguns dos resultados obtidos no trabalho. Em resumo, prismas com taxas menores apresentaram maior contribuição do concreto entre fissuras, assim como aqueles com matrizes mais resistentes.

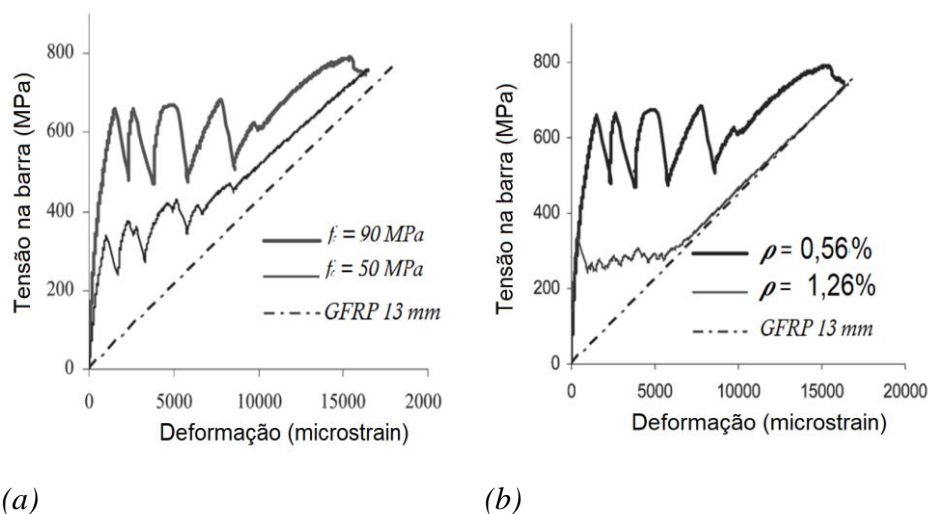


Figura 16 comparação do resultado de tração direta em prismas de concreto reforçado por uma barra de GFRP adaptado de Sooriyaarachchi et al. [55]: a) variando a resistência característica do concreto b) variando a taxa de armadura de GFRP.

As barras de GFRP possuem uma aderência menor com matrizes de concreto se comparadas com barras de aço, conforme descrito na seção 2.1.4. Logo, é de se esperar que a transferência de força através da interface se dê em comprimento maior, fazendo assim com que o espaçamento entre as fissuras seja maior para uma mesma deformação [56]. Fissuras longitudinais podem interferir na aderência causando um alívio de confinamento reduzindo o efeito de enrijecimento. A Figura 17 apresenta os espécimes ensaiados à tração por Bischoff e Paixao [42]. Nela, os prismas reforçados por barras de aço não apresentaram fissuras longitudinais, enquanto aqueles reforçados por barras de GFRP tiveram fissuras longitudinais distribuídas ao longo de seu comprimento.



Figura 17. Prismas de concreto reforçados com aço e GFRP ensaiados por Bischoff e Paixao [50]

Itens anteriores já destacaram a importância da utilização de fibras dispersas em elementos de concreto reforçado por barras de GFRP. A análise de enrijecimento à tração torna ainda mais claro os benefícios. Autores publicaram resultados com contribuições maiores do concreto quando o mesmo é reforçado por fibras nestes casos [57–61]. Isto ocorre, pois, além de contribuir para um aumento da aderência barra-concreto, as fibras passam a transferir parte das forças de tração através das fissuras. A Figura 18 apresenta o efeito da adição de fibras de aço no desenvolvimento do fator de enrijecimento em matrizes de concreto armado com a barras de aço [57].

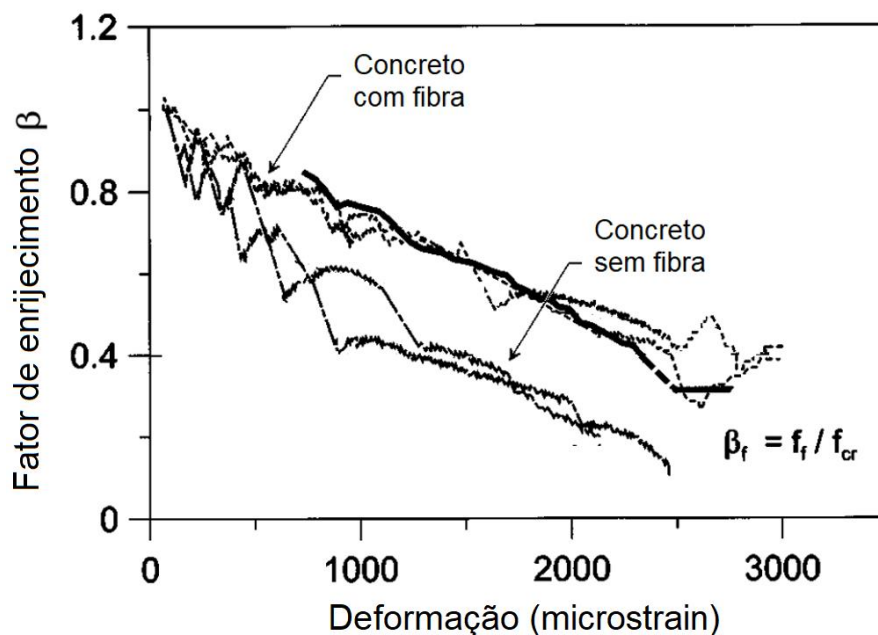


Figura 18. Comparação do desempenho do fator de enrijecimento com o acréscimo de deformação entre concretos com e sem adição de fibras de aço, realizada por Bischoff [57]

Deluce e Vecchio [58] avaliaram as mudanças no comportamento à tração de prismas de concreto armado com barras e aço com a utilização de fibras de aço. Os autores observaram reduções expressivas na resistência de primeira fissura dos elementos com a incorporação de fibras no concreto. Por outro lado, a contribuição do concreto nos estágios de formação e de estabilização de fissuras foi muito maior para os espécimes contendo fibras de aço. Além disso, reduções na abertura e no espaçamento entre fissuras foram observados pelos autores.

No estudo de Moreno et al. [59], fibras sintéticas de PVA foram adicionadas à matriz de concreto em prismas de concreto reforçados por barras de aço e tiveram seus desempenhos à tração direta comparados com prismas de matrizes reforçadas por fibras de aço. Fibras de PVA possuem uma aderência muito elevada e um módulo de elasticidade muito inferior às fibras de aço. Os compósitos reforçados por fibras sintéticas tiveram um desempenho muito superior àqueles reforçados por fibras de aço. Isto ocorreu tanto em termos de rigidez, quanto no comportamento de múltipla fissuração, provando que a aderência entre fibra e matriz influencia mais o comportamento à tração residual que o módulo da fibra.

Analiticamente é possível obter uma expressão que descreva o espaçamento entre fissuras ($2l_{s,max}$) partir do equilíbrio de tensões entre estas (Figura 19). Modelos foram propostos na literatura para descrever o espaçamento das fissuras sendo a diferença entre eles os parâmetros variáveis dos materiais e as constantes de ajuste adotadas por cada um. Alguns deles foram utilizados nesta pesquisa e serão destacados a seguir.

- CEB/FIP - Model Code 2010 [56]

$$l_{s,max} = k \cdot c + \frac{1}{4} \cdot \frac{f_{ctm}}{\tau_{bms}} \cdot \frac{\phi_s}{\rho_{s,ef}} \quad (2.3)$$

$$l_{s,max} = k \cdot c + \frac{1}{4} \cdot \frac{(f_{ctm} - f_{Ftsm})}{\tau_{bms}} \cdot \frac{\phi_s}{\rho_{s,ef}} \quad (2.4)$$

O modelo apresentado foi proposto para barras de aço embebidas em concreto com (Equação 2.3) e sem fibra (Equação 2.3). Leva-se em conta a resistência à tração do concreto (f_{ctm}), a aderência entre os materiais (τ_{bm}), o diâmetro da barra (ϕ_s) e a taxa de reforço efetiva ($\rho_{s,ef}$). Além disso, também considera o cobrimento de concreto (c) multiplicado por uma constante k , referente ao tipo de solicitação ($k=1$, para tração direta). A diferença do modelo com fibras está na resistência residual do concreto (f_{Ftsm}), que é subtraída da resistência máxima a tração (f_{ctm}).

- RILEM - TC 162 [62]

$$l_{s,max} = \left(50 + \frac{1}{4} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\phi_s}{\rho_{s,ef}} \right) \left(\frac{50}{L/\phi} \right) \quad (2.5)$$

O modelo proposto pela RILEM em 2003 tem como objetivo avaliar o espaçamento de fissuras para prismas reforçados com barras de aço e fibras dispersas na matriz. Esse leva em conta o diâmetro da barra (ϕ_s), a taxa de reforço efetiva ($\rho_{s,ef}$) e a razão de aspecto da fibra (L/ϕ). Além disso, considera as constantes k_1 e k_2 , representando respectivamente as propriedades da ligação reforço-matriz

(0,8 para barras de alta adesão e 1,6 para barras lisas) e a distribuição de tensões normais na seção (0,5 para flexão e 1 para tração direta).

- Deluce e Vecchio [58]

$$l_{s,max} = 25 + \frac{1}{8} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\phi_s}{\rho_{s,ef}} \left(1 - \frac{f_{t,sm}}{f_{ctm}} \right) \quad (2.6)$$

O modelo proposto pelos autores é muito similar com aquele proposto pela Rilem para reforço com fibras. Entretanto, no lugar dos parâmetros individuais das fibras (L/ϕ), leva-se em conta a resistência à tração máxima e residual do concreto com fibras. A explicação dos autores para esta troca está no fato do modelo da Rilem não levar em conta a fração volumétrica de fibras.

- Kharal e Sheikh [54]

$$l_{s,max} = \left(c_a + \frac{S_b}{10} \right) + k_3 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi_s}{2 \cdot \rho_{s,ef}} \quad (2.7)$$

Este modelo foi proposto tanto para barras de aço quanto para GFRP com diferentes superfícies. Os parâmetros c_a , S_b , k_3 e k_4 são referentes ao cobrimento mínimo de concreto (1,5 vezes o tamanho do agregado), o espaçamento entre as barras usadas como reforço, a aderência da barra com o concreto (0,4 para aço; 0,25; 0,2 e 0,3 dependendo do tratamento superficial adotado para a barra) e as condições de deformações (0,25 em caso de deformações uniaxiais).

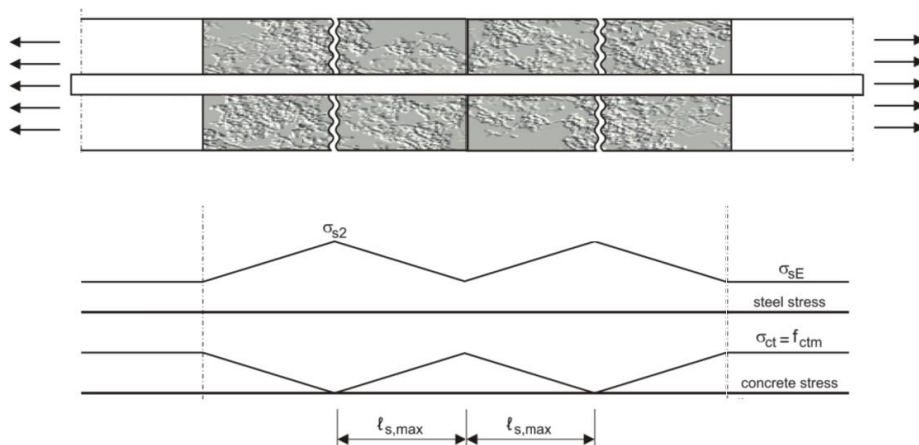


Figura 19. Distribuição de tensões aproximada no concreto e no aço submetidos à tração adaptado do Model Code [56]

Fica evidente uma falta de modelos que descrevam o espaçamento entre fissuras para reforço o reforço de fibras dispersas na matriz atuando em conjunto com barras de GFRP. Os modelos supracitados serão comparados com os resultados experimentais a fim de validar os mesmos para as condições utilizadas nesta pesquisa.

2.3 FLEXÃO EM ELEMENTOS DE CONCRETO REFORÇADOS POR BARRAS DE GFRP

Conforme visto até então conclui-se que fatores como as propriedades mecânicas do reforço, do concreto e de sua ligação, a taxa de armadura e o diâmetro das barras são essenciais para compreendermos seu comportamento a flexão de vigas de concreto armado. As diferenças levantadas até o momento entre barras de aço e de GFRP resultam em diferenças no dimensionamento destas estruturas com relação ao habitual sistema usado para dimensionar elementos reforçados por aço. O módulo inferior das barras de GFRP pode ter como consequência uma deflexão elevada e um padrão de fissuração da estrutura com grandes aberturas, resultando em um dimensionamento à flexão limitado pelos estados-limite de serviço [63].

Vale ressaltar ainda que, apesar da alta resistência à tração das barras, seu comportamento linear-elástico é caracterizado por uma ruptura frágil. Pensando

nisso, diversos autores recomendam o dimensionamento de elementos de concreto armado com barras de GFRP visando ruptura governada pelo concreto [11, 64]. Entretanto, o comportamento do concreto comprimido, embora não linear, também é tido como frágil. Sendo assim, aumentar a ductilidade do concreto é uma das maneiras de evitar ruptura frágil de vigas reforçadas com GFRP sujeitas à flexão.

Uma alternativa proposta por Wang e Balerbi [53] foi a utilização de fibras de polipropileno para promover ductilidade às vigas de concreto armado com barras de GFRP. Os autores não só avaliaram experimentalmente a respostas destes elementos à flexão, como também utilizaram uma equação proposta por Jaeger et al. [65] para avaliar a curvatura. O método consiste em usar as relações de máximo momento e deflexão (ou curvatura) com o seu correspondente para uma deformação do concreto de 0,001, onde o mesmo deixa de apresentar um comportamento aproximadamente linear. Sendo assim, o índice de ductilidade μ , pode ser definido conforme a equação 2.8. Foi observado um acréscimo de 30% no índice de ductilidade como o uso de fibras, além de uma redução de 20% na abertura de fissuras. Não foram observadas variações significativas de rigidez à flexão no estudo.

$$C_s = \frac{M_{max}}{M_{0,001}}; C_c = \frac{\varphi_{max}}{\varphi_{0,001}}; C_d = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_{0,001}} \quad (2.8)$$

$$\mu = C_s \cdot C_c \text{ ou } C_d \quad (2.9)$$

Sendo M_{max} o momento máximo resistido pela viga, $M_{0,001}$ o momento referente à perda de linearidade do concreto comprimido, φ_{max} a curvatura máxima sofrida pela viga, $\varphi_{0,001}$ a curvatura referente à perda de linearidade do concreto comprimido, Δ_{max} a deflexão máxima sofrida pela viga e $\Delta_{0,001}$ a deflexão referente à perda de linearidade do concreto comprimido.

Já em vigas armadas com barras de aço, o uso de fibras pode resultar em redução da ductilidade do material. Dancygier e Berkover [66] avaliaram vigas de concreto reforçado com fibras e barras de aço submetidas a flexão em quatro pontos. Os autores concluíram que adição de fibras, de fato reduz a ductilidade da viga. Relacionado a isto temos o fato da adição de fibras tornar a linha neutra mais

profunda, reduzindo a curvatura limite e a ductilidade como consequência. Os autores também observaram fissuras se destacando entre as demais (*crack localization*, do inglês) devido ao escoamento do aço.

O comportamento momento-curvatura de uma seção de concreto reforçado por barras de aço submetido à flexão é dividido em três estádios: estágio 1, onde ambos os materiais estão em regime linear, sem fissuração; estágio 2, quando o concreto fissura e passa a não mais contribuir na zona tracionada; e o estágio 3, quando os materiais constituintes se encontram em regime não-linear. Para barras de GFRP, como não há patamar de escoamento, apenas o concreto entra em regime não-linear apresentado uma leve alteração de rigidez [35]. Portanto, fica evidente a importância das propriedades não lineares do concreto comprimido para a compreensão do comportamento destes elementos. A relação entre momento e curvatura (ϕ) pode ser obtida através do somatório de forças longitudinais e momentos atuando na seção da viga. Basta fixar uma curvatura e variar posição da linha neutra até obter um somatório de forças e momentos igual à zero. Por fim, um novo valor da curvatura é fixado e o processo se repete até a deformação limite por atingida.

Conforme visto no item 2.2, o efeito de enrijecimento à tração do concreto pode proporcionar uma resposta mais rígida à estrutura mesmo com um baixo módulo de elasticidade da barra de GFRP. Nayal e Rasheed [67] observaram uma contribuição maior do concreto na rigidez global da estrutura para barras com módulos inferiores. Além disso, autores relataram um acréscimo de rigidez significativo devido a um número maior de barras de GFRP [68]. Segundo eles, às tensões radiais promovidas pelas barras interferem no confinamento das barras vizinhas, aumentando a rigidez da estrutura.

Por serem resistentes à corrosão, elementos reforçados por barras de GFRP têm uma tolerância maior à abertura de fissuras. No entanto, fatores como estética e aceitação visual restringem esta tolerância. A norma japonesa [69] por exemplo, limita a abertura de fissuras em 0,5 mm, apenas por razões estéticas. Já a norma canadense [70] possui limites para ambientes externos de 0,5 mm e para internos 0,7 mm. Isto seria 50% e 70% (respectivamente) superior ao limite adotado para a abertura de fissuras para reforço com aço na mesma norma [71].

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental apresentado nesta pesquisa tem como objetivo realizar caracterização mecânica dos materiais utilizados e avaliar, sob carregamento estático, a performance de elementos de concreto reforçados com barras de GFRP e fibras discretas de polipropileno. Todos os ensaios foram executados no Laboratório de Estruturas e Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Nesse capítulo são apresentados, detalhadamente, os procedimentos adotados ao longo da campanha experimental.

3.1 ETAPAS DO PROGRAMA

As etapas do programa experimental, assim como as quantidades de ensaios realizados usados nas análises desta pesquisa, são resumidamente apresentadas na Figura 20 a seguir. Para a identificação dos corpos de prova, utilizou-se as nomenclaturas SF, CF, P e A, que correspondem as amostras de concreto sem fibra, com fibra, utilizando barras GFRP e barras de aço, respectivamente.

A caracterização do concreto foi feita através de ensaios de compressão axial em corpos de prova cilíndricos e ensaios de tração direta em corpos de prova com formato de ‘osso de cachorro’ (*dog bone*). O módulo de elasticidade e a resistência à tração das barras de GFRP foram obtidos através de ensaios de tração direta. A interface concreto-GFRP foi avaliada através de ensaios de arrancamento (*Pullout*) e os resultados obtidos foram comparados com ensaios semelhantes usando barras de aço nervuradas tradicionalmente usadas como reforço em concreto. Estas, embora com propriedades amplamente conhecidas no mercado, também tiveram suas propriedades avaliadas em ensaio de tração direta.

Em seguida, ensaios estruturais em primas de concreto armado com barras GFRP submetidos à tração foram realizados, com o objetivo de se avaliar as diferenças no enrijecimento da estrutura, no número de fissuras e no tamanho de abertura das mesmas com a adição de 1% de fibra de polipropileno. Por fim, quatro vigas armadas longitudinalmente com barras GFRP foram testadas em flexão de

quatro pontos. Nestas, além de se verificar o efeito da adição de fibras na fissuração, foram avaliados os impactos também na deflexão e nas deformações superiores e inferiores das vigas. Elementos armados com barras de aço também foram ensaiados para fins comparativos.

Nos ensaios estruturais, foi utilizada técnica de correlação digital de imagem (DIC) para obtenção do campo de deslocamentos na região de interesse e melhor detecção das fissuras. A análise de imagem foi fundamental para medição das aberturas e distâncias entre fissuras para ambos os casos.

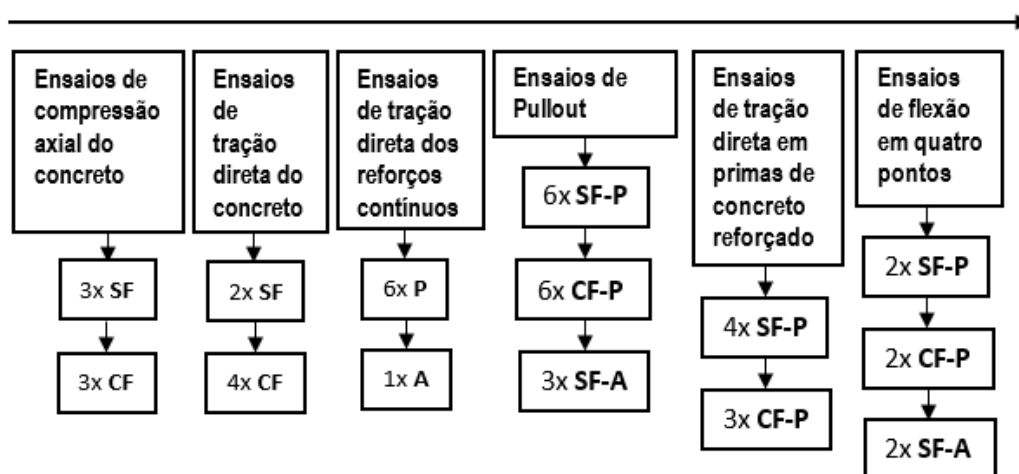


Figura 20. Etapas do programa experimental realizado neste estudo.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1 CONCRETO

A dosagem adotada para o volume de 1 m³ de concreto utilizado nesta pesquisa está apresentada na tabela 2 e foi a mesma utilizada por Silveira [25]. Como aglomerante, foi utilizado cimento Portland CPV ARI do fabricante LafargeHolcim. O agregado miúdo usado na mistura foi areia natural com 4,76 mm de diâmetro máximo e módulo de finura 1,80 e o agregado graúdo foi brita 0 de diâmetro máximo 19,1 mm e módulo de finura 5,29. Além disso, o aditivo superplastificante adotado foi o PLASTOL® 4100 da empresa Viapol.

Tabela 2. Traço do concreto utilizado

Traço do concreto		
Fração volumétrica de fibras:	0%	1%
Cimento (CPV)	410 kg	410 kg
Areia natural	569 kg	569 kg
Brita 0	1293 kg	1283 kg
Água	180 kg	180 kg
Superplastificante (SP)	2,05 kg	2,05 kg
Fibras de Polipropileno		10 kg
Relação água/cimento	0,44	
Relação água/materiais secos	0,08	
SP/CPV	0,005	

O procedimento de mistura do material segue os passos listados a baixo:

1) Mistura dos agregados e de 70 % do total de água por um minuto, tempo aproximado para homogeneização;

2) Adição do cimento à mistura, seguido por um minuto para homogeneização;

3) Adição do superplastificante em conjunto com 30% da água.

Após 5 minutos de mistura se encerrava a fabricação da matriz. Para traços com fibras de polipropileno, estas eram adicionadas de forma gradual durante aproximadamente dois minutos.

3.2.2 BARRA DE GFRP

As barras utilizadas nesta pesquisa foram fornecidas pela empresa Stratus Compostos Estruturais. Estas são compostas por resina termofixa éster vinílica e fibras de vidro do tipo E-glass, com fração volumétrica de fibras de 80%, segundo o fabricante. O diâmetro adotado para a análise foi de 12,5 mm. A seguir, a Tabela 3 apresenta as propriedades das barras fornecidas pela fabricante.

Tabela 3. Propriedades da barras de GFRP fornecidas pela empresa Stratus Compostos Estruturais.

Propriedades da barra de GFRP	
Resistência à tração (MPa)	989
Módulo de elasticidade à Tração (MPa)	48
Deformação máxima (%)	2,11
Resistência à compressão (MPa)	494
Resistência ao cisalhamento (MPa)	210
Coeficiente de Poisson	0,26

3.2.3 FIBRAS DE POLIPROPILENO

As fibras de polipropileno utilizadas são do tipo TUF-STRAND de 51 mm fornecidas pela empresa Viapol. Foi utilizado 10 kg de fibra de para cada metro cúbico de concreto misturado. Isto corresponde a aproximadamente 1% do volume de material cimentício produzido. As fibras possuem geometria torcida que, além de melhorar a ancoragem mecânica facilita o procedimento de mistura (Figura 21).

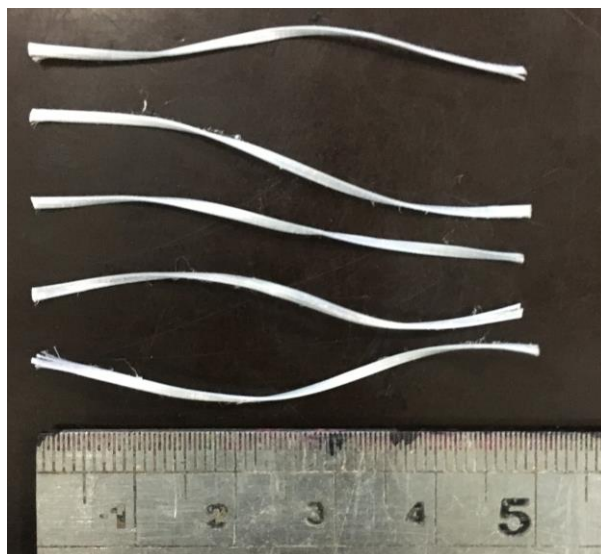


Figura 21. Fibras de polipropileno usadas na pesquisa

A Tabela 4 a seguir apresenta as propriedades físicas e mecânicas das fibras de polipropileno usadas no presente estudo. Os ensaios de caracterização da fibra foram realizados por Castoldi [26] em uma máquina universal de ensaios mecânicos MTS 810 com capacidade para 250 kN.

Tabela 4. Propriedades das fibras de polipropileno usada na pesquisa

Propriedades da fibra de polipropileno	
Resistência à tração*	260±13 MPa
Módulo de elasticidade*	2,29±0,56 GPa
Área da seção transversal*	0,63±0,13 mm ²
Comprimento**	51 mm
Fator de forma**	74
Densidade**	0,92 g/cm ³
*Obtido por Castoldi [26]	
**Disponibilizado pelo fabricante	

3.3 ENSAIOS REALIZADOS

3.3.1 COMPRESSÃO AXIAL

Os ensaios de compressão em amostras de concreto sem fibras foram realizados em uma máquina de ensaio mecânico da fabricante Controls, Modelo MCC8, com capacidade de 2000 kN e taxa de carregamento de 0,25 MPa/s (Figura 22).

Três amostras cilíndricas de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura foram fabricadas para as dosagens de referência (sem fibras) e com fibras e ensaiadas aos 28 dias de idade, conforme a NBR 5739. Para a moldagem, formas metálicas previamente lubrificadas com óleo desmoldante foram usadas. O adensamento foi feito com auxílio de uma haste metálica para golpes verticais e um martelo de borracha para golpes laterais. Vale ressaltar que durante as primeiras 24 horas os corpos de prova foram vedados por filme plástico para evitar perda de água. Após este período os mesmos foram desmoldados e deixados em condições de laboratório até completarem 28 dias de idade. Antes de todos os ensaios de compressão os corpos de prova eram faceados, evitando uma superfície irregular.

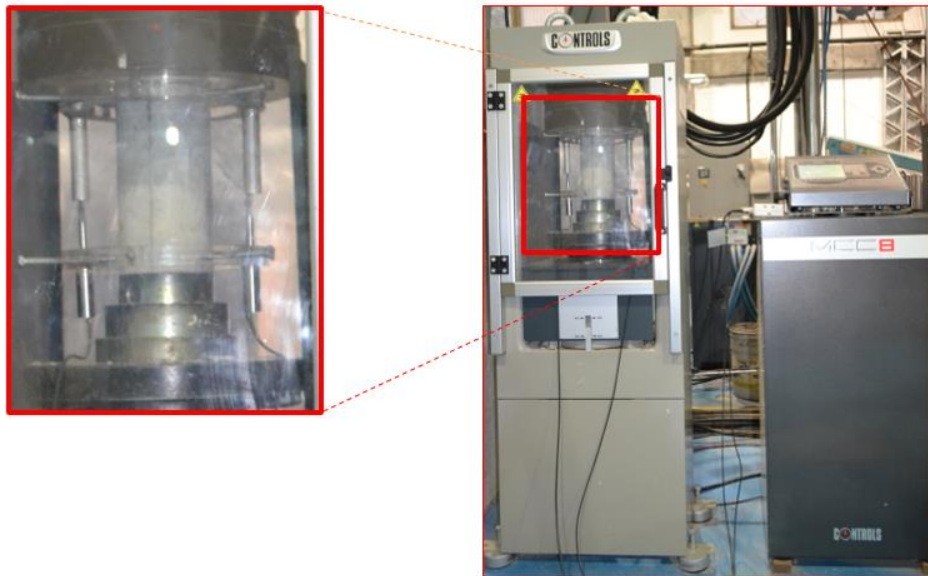


Figura 22. Máquina usada para ensaios de compressão uniaxial e detalhe do sistema de aquisição de dados adotado.

Para medição de deformação específica ao longo do carregamento, foram instalados dois transdutores de deslocamento (LVDTs) acoplados a anéis de acrílico presos levemente ao corpo de prova e distando 170 mm entre si (*gage length*), conforme Figura 22. A deformação específica foi determinada como a média entre os encurtamentos relativos medidos por cada um dos transdutores dividida pelo *gage length*.

3.3.2 TRAÇÃO DIRETA

Os ensaios de tração direta foram realizados em uma máquina universal de ensaios mecânicos MTS, modelo 311, com capacidade de 1000 kN, apresentada na Figura 23.

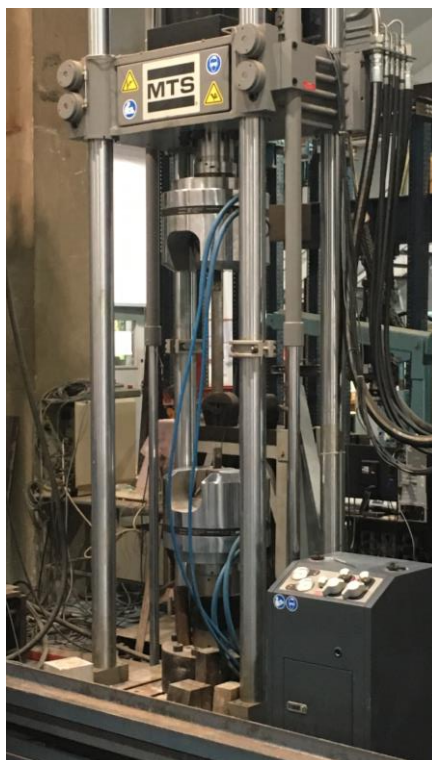


Figura 23. Máquina usada para ensaios de tração direta

3.3.2.1 ENSAIOS NA MATRIZ CIMENTÍCIA

Para a realização dos ensaios de tração direta na matriz cimentícia, foi adotada geometria de ‘osso de cachorro’ (*dog bone*), com comprimento total de 500 mm e diâmetro variando de 150 mm nos extremos a 68 mm no centro, conforme Figura 24. No total, foram ensaiadas quatro amostras para o concreto reforçado com fibras. Os ensaios para o concreto sem adição de fibras, foram realizados por Silveira [25] sob mesmas condições que os ensaios realizados nesta pesquisa para o mesmo traço adotado.

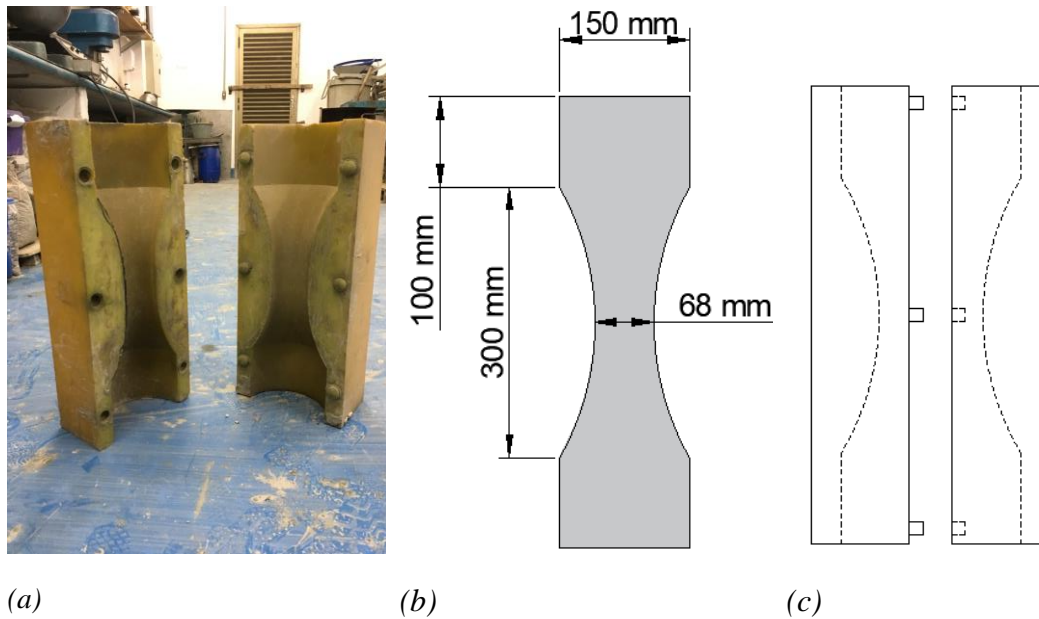


Figura 24. Fomas usada para moldagem (a), geometria adotada (b) e ilustração da forma utilizada (c) para a realização de ensaios de tração direta.

A produção dos corpos de prova era realizada com o auxílio de formas bipartidas de poliuretano, devidamente lubrificada com óleo desmoldante (Figura 24-a). Em seguida, com as formas unidas, a mesma era vedada com filme plástico e, para evitar possível abertura da forma e vazamento do material, braçadeiras plásticas eram usadas nas laterais. Por fim, o material foi adensado com auxílio de vibração externa com golpes laterais com martelo de borracha e uma haste metálica para golpes verticais.

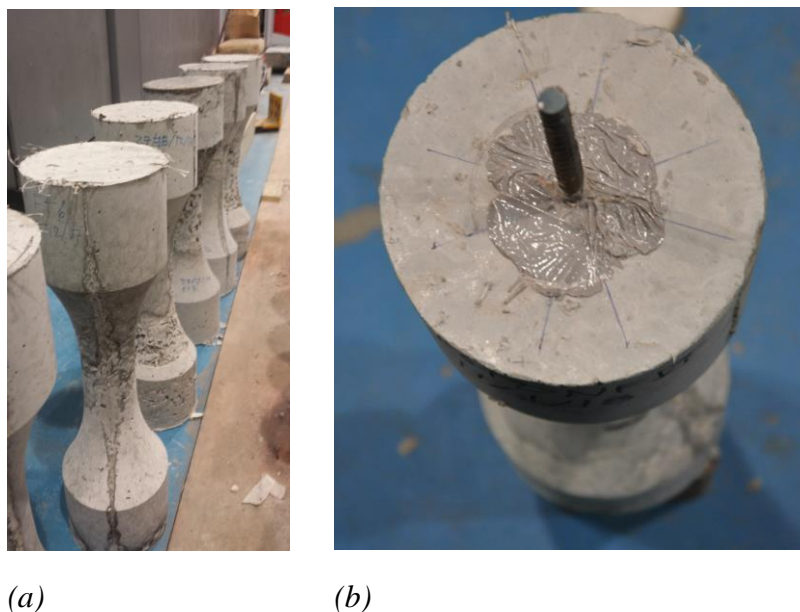


Figura 25. corpos de prova após a moldagem (a), Detalhe das barras de aço fixadas ao corpo de prova (b)

Após 24 horas, os corpos de prova, vedados por filmes plásticos, eram desmoldados e deixados em cura ao ar até a idade de 28 dias. Para a devida fixação do corpo de prova na máquina de ensaio, foram executados furos com 10 cm de profundidade nas duas extremidades e barras de aço com 10 mm de diâmetro foram instaladas e coladas ao concreto com auxílio de resina epóxi, conforme Figura 25-b.



Figura 26. Setup adotado para ensaio de tração direta

Os ensaios foram realizados até a ruptura através de controle pelo deslocamento do atuador com uma taxa de 0,1 mm/min. Anéis de acrílico distantes 170 mm entre si e levemente fixados ao corpo de prova foram utilizados para capturar as informações obtidas com os transdutores de deslocamento. Esses eram posicionados equidistantes do centro do corpo de prova e a deformação média equivalente foi obtida com o alongamento médio medido pelos transdutores dividido pelo *gage length*.

3.3.2.2 ENSAIOS NAS BARRAS DE GFRP

No total, seis amostras de barras GFRP foram ensaiadas. Todas as barras tiveram suas extremidades protegidas por tubos metálicos de 19 mm de diâmetro,

2 mm de espessura e 100 mm de comprimento. O tubo foi colado à barra com Sikadur®-32 (adesivo estrutural à base de resina epóxi) para evitar esmagamento da barra pelas garras (Figura 27-a). Assim sendo, as amostras de 400 mm de comprimento possuíam 200 mm livres entre as garras. No centro da barra foi fixado um *clip gage* para capturar as deformações específicas ao longo do ensaio. Os ensaios foram realizados com controle de deslocamento até a ruptura, com taxa de carregamento de 5 mm/min., conforme Figura 27-b.

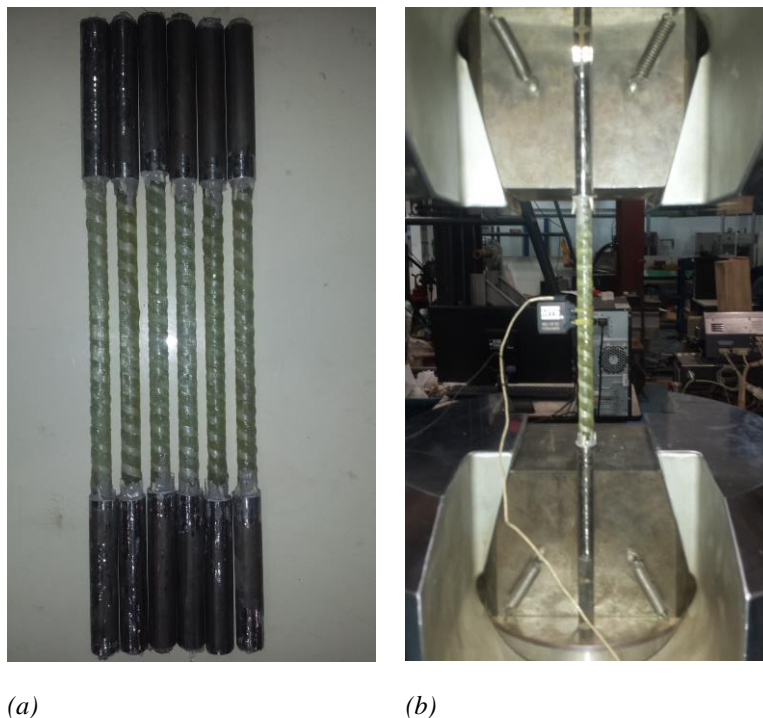


Figura 27. Corpos de prova após a fixação dos tubos de proteção (a) e setup do ensaio de tração direta em barras de GFRP (b).

3.3.2.3 ENSAIO EM BARRA DE AÇO

Apenas para confirmação das propriedades mecânicas, uma única barra de aço CA-50 com 12,5 mm de diâmetro também foi ensaiada à tração. Um *clip gage* foi usado para capturar a deformação das amostras, sendo fixado nos 25 mm centrais, cujo diâmetro foi reduzido para 10 mm para induzir a ruptura no local. A figura 28 apresenta a geometria dos corpos de prova (a) e a instrumentação usada para capturar a deformação (b).

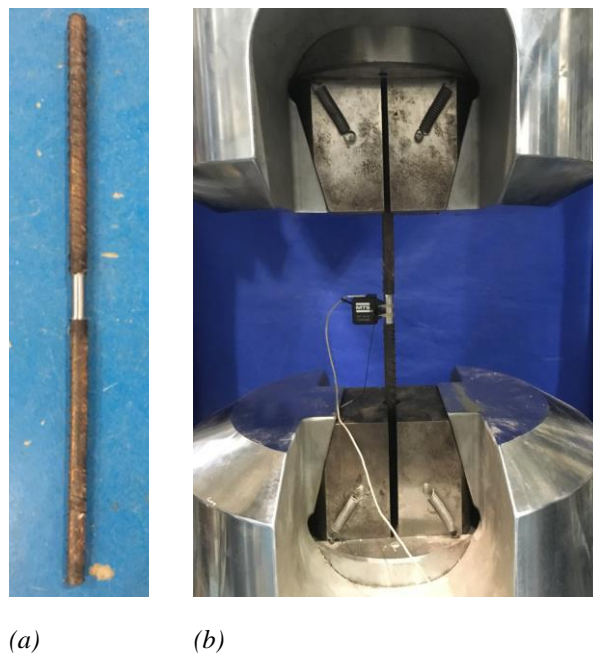


Figura 28. Corpos de prova (a) e setup do ensaio de tração direta em barras de aço (b).

3.3.3 ENSAIOS DE ARRANCAMENTO (*PULLOUT*)

Para avaliação da aderência das barras de GFRP, seis ensaios foram realizados, para as matrizes de referência e com fibra, resultando em doze ensaios no total. Estes foram adaptados da norma ASTM A1081/A1081M – 15 [72], para ensaios de arrancamento de cordoalhas de aço. Adicionalmente, três ensaios em barras de aço de mesmo diâmetro foram realizados para fins comparativos.

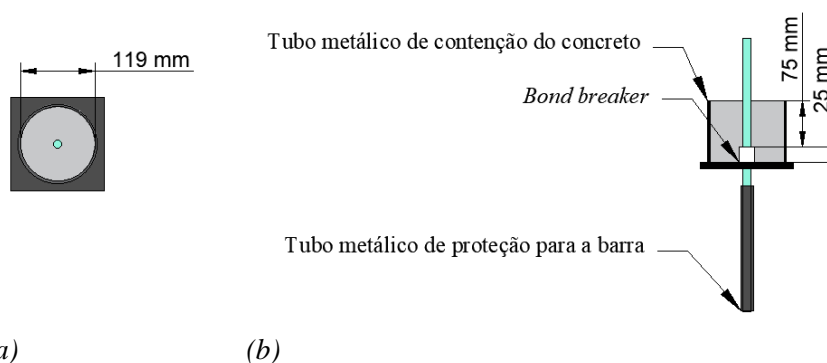


Figura 29. Corte da seção transversal (a) e longitudinal (b) dos corpos de prova usados para ensaios de arrancamento.

Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios mecânicos MTS modelo 311, com capacidade de 1000 kN, com uma taxa de deslocamento de 2,5 mm/min.. As barras de GFRP de 400 mm foram concretadas em um cilindro de aço com 140 mm de diâmetro e 100 mm de altura, conforme Figura 29. Dois transdutores de deslocamento foram usados para medir o deslizamento da barra: o primeiro foi posicionado no extremo carregado da barra enquanto o segundo no extremo descarregado com auxílio de uma base magnética, conforme Figura 30-a. Na extremidade carregada, também foi utilizado um tubo metálico para proteção da barra assim como nos ensaios de tração direta.

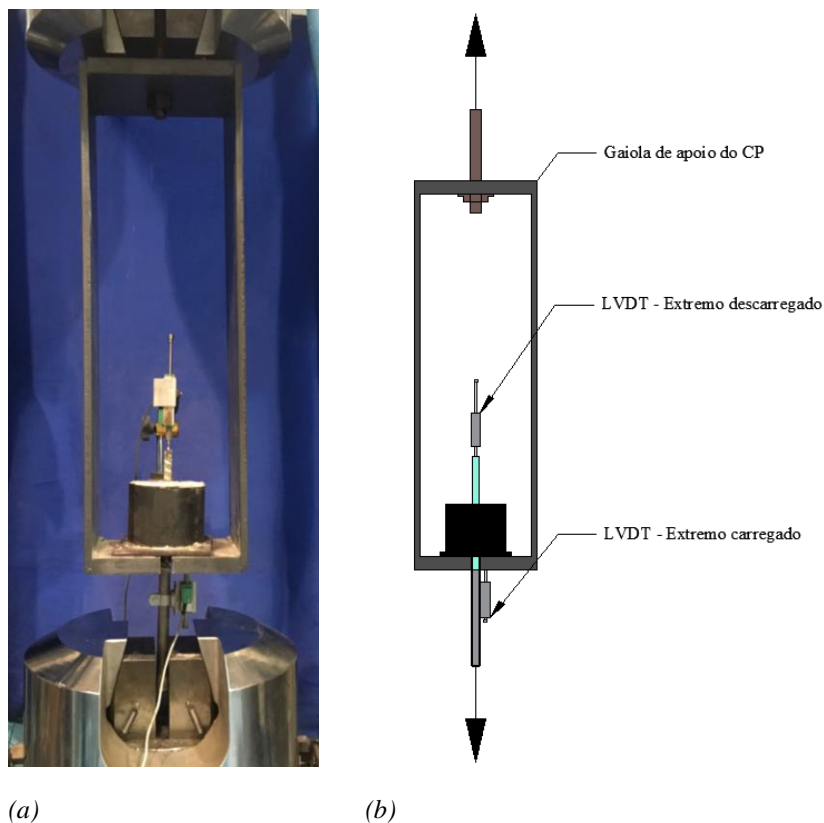
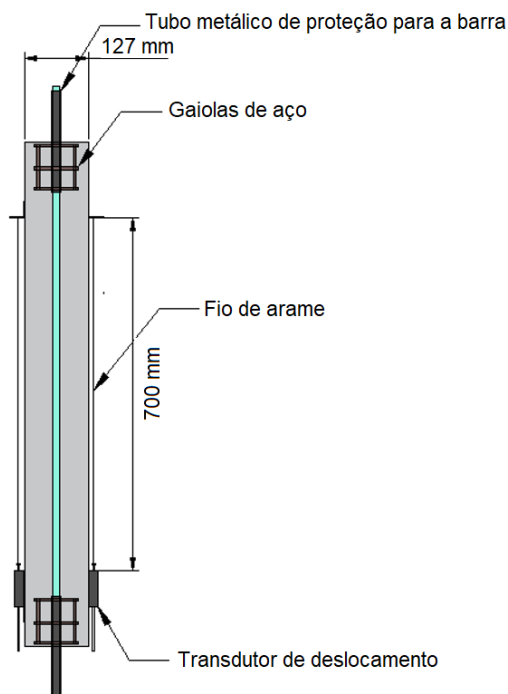


Figura 30. Arranjo do ensaio de arrancamento (a) e ilustração do mesmo (b).

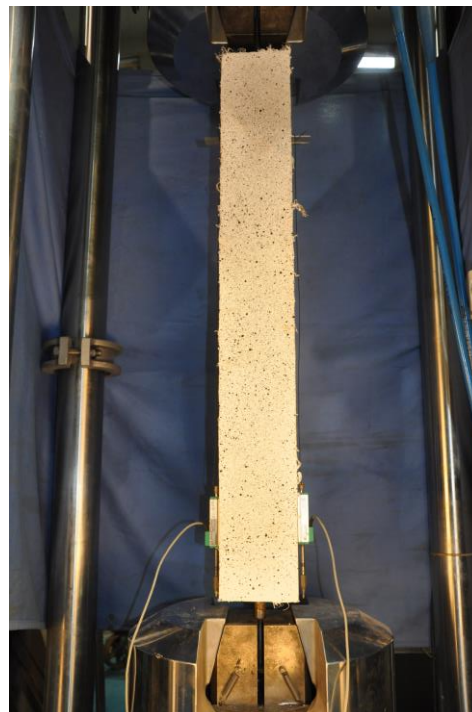
3.3.4 ENSAIOS DE TRAÇÃO DIRETA EM TIRANTES DE CONCRETO ARMADO (*TENSION STIFFENING*)

Os corpos de prova do ensaio de *tension stiffening* consistem em prismas de seção 127 mm x 127 mm x 1000 mm de comprimento. Imerso na matriz de concreto, no centro do prisma, foi posicionada uma barra GFRP de 12,5 mm de diâmetro e 1200 mm de comprimento. Assim como nos ensaios de tração direta da barra GFRP e de arrancamento, proteções metálicas foram utilizadas para evitar esmagamento das barras junto às garras da máquina de ensaios. No entanto, estas foram embutidas 100 mm no prisma de concreto além dos 100 mm já utilizado para proteção da garra, conforme Figura 31.

Para moldagem, foi utilizada forma de compensado naval com 20 mm de espessura. Antes do lançamento foi aplicado desmoldante para madeira. Foram utilizados três estribos de aço CA-50 de 4,2 mm de diâmetro junto às extremidades da barra para evitar ruptura localizada. Por fim, a barra de GFRP era posicionada e centralizada no eixo longitudinal do prisma. A moldagem foi realizada com auxílio de uma haste metálica, martelo de borracha e vibrador de imersão para o adensamento.



(a)



(b)

Figura 31. Arranjo do ensaio de tração direta em prismas de concreto (b) e ilustração do mesmo (a).

Os ensaios foram realizados sob uma taxa de carregamento de 0,7 mm/min. Dois transdutores de deslocamento foram colados nas laterais do prisma. Estes foram amarrados a fios de arames fixados em uma cantoneira a uma distância de 700 mm dos LVDTs. Além disso, uma das faces do corpo de prova foi pintada de branco com um padrão aleatório de pontos pretos para realização da correlação digital de imagem (DIC) em dois corpos de prova de cada mistura. A captura das fotos foi realizada a cada 30 segundos com uma câmera modelo Nikon D90 de resolução 12,3 MP. Uma área de 700x120 mm foi adotada para análise com o auxílio do software GOM correlate. A Figura 31 apresenta o esquema supracitado. Ao todo, foram realizados oito ensaios de tração em prismas com barras de GFRP, sendo quatro em matriz com fibra e outras quatro em matriz sem fibra. Para relacionar os dados obtidos pelo software com as cargas impostas pelo atuador, o tempo de aquisição das imagens foi devidamente sincronizado com o tempo de ensaio fornecido pelo sistema de aquisição de dados, possibilitando saber qual era carga no momento em que a foto foi tirada.

3.3.5 ENSAIOS DE FLEXÃO EM QUATRO PONTOS



Figura 32. Disposição de armaduras e de forma adotada para os ensaios de flexão em quatro pontos

No total seis vigas com 1600 mm de comprimento e uma seção transversal quadrada de 150 mm de lado foram moldadas: quatro reforçadas por três barras de GFRP com 12,5 mm de diâmetro sendo duas utilizando concreto sem fibras e duas com concreto contendo fibras; para fins comparativos, duas outras vigas reforçadas longitudinalmente com barras de aço foram moldadas. A primeira foi dimensionada com a quantidade de reforço de aço igual à adotada para as vigas com barras de GFRP (três barras de aço de 12,5 mm). Já a segunda, com quantidade de barras de aço que promovesse uma rigidez equivalente (EI) similar a rigidez equivalente das vigas armadas com barras de GFRP (quatro barras de 5 mm). As siglas para a identificação dos resultados para as vigas armadas com aço, são SF-A(A.eq.) e SF-A(E.eq.), respectivamente. As vigas armadas com GFRP foram dimensionadas para romper devido o esmagamento do concreto, conforme recomendado por investigações passadas [11, 35, 64], dando à estrutura um comportamento não linear antes da ruptura. Para evitar ruptura por prematura por cortante, as vigas tiveram seus vãos de cisalhamento reforçados com estribos de aço com 5 mm de diâmetro. Além disso, foi adotado um vão de 1500 mm

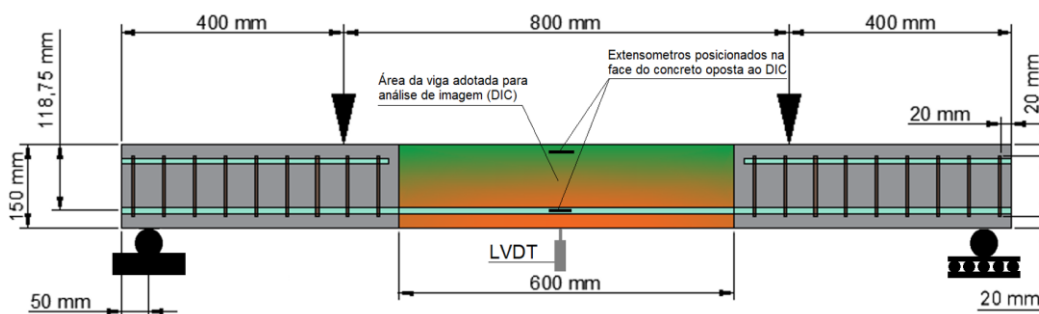


Figura 33. Distribuição dos reforços, longitudinais e transversais, dos apoios e pontos de aplicação de carga, adotados para os ensaios em vigas.

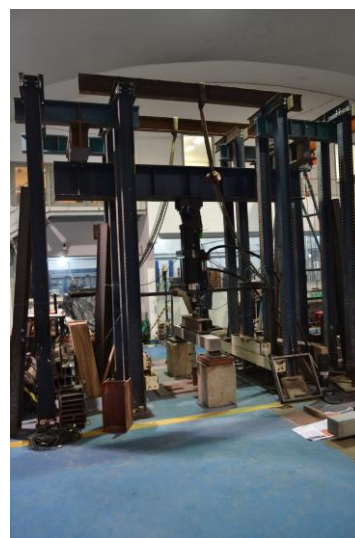
Um LVDT, posicionado no meio do vão, foi usado para capturar a deflexão do elemento. Para monitorar a curvatura com o momento aplicado, dois extensômetros foram colados em uma das faces laterais da viga, um no mesmo nível do eixo da barra (26 mm a partir do fundo) e outro 125 mm a partir do fundo da viga. Um atuador hidráulico com capacidade de 500 kN foi utilizado para aplicação de carregamento por controle de deslocamento do atuador a uma taxa de 1 mm/min.

Um perfil metálico de seção caixão foi utilizado para distribuir as forças com auxílio de rótulas metálicas a uma distância de 400 mm do centro. A viga foi centralizada e nivelada com o auxílio de um laser e uma rótula metálica foi utilizada para evitar qualquer desnível de aplicação de carga por parte do atuador.

Correlação digital de imagem também foi usada para monitorar o campo de deslocamentos e capturar a formação e propagação de fissuras usando os mesmos procedimentos adotados para os ensaios de tração direta em prismas. Uma área de 600x150 mm foi preparada e selecionada para análise usando o software GOM Correlate. Este procedimento foi adotado para todas as vigas, com exceção de uma das vigas armadas com barras de GFRP e concreto sem fibras. O tempo de aquisição das imagens foi relacionado com o tempo do sistema de aquisição de dados para associação das cargas em cada foto.



(a)



(b)

Figura 34. Esquema adotado para ensaios de flexão: (a) instrumentação, pontos de aplicação de carga e apoios; (b) Pórtico usado para os ensaios.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo os resultados obtidos com o procedimento experimental supracitado serão apresentados. Os dados obtidos com a aquisição de dados externa serão plotados a fim de obter-se o comportamento dos materiais constituintes, da ligação reforço-matriz, o efeito de enrijecimento dos prismas reforçados submetidos a tração direta e o comportamento à flexão das vigas. As imagens obtidas com o DIC serão usadas para verificar o comportamento da fissuração no caso dos ensaios estruturais. Por fim, os resultados serão comparados com resultados e modelos apresentados na revisão da literatura.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA E DO MÓDULO À COMPRESSÃO AXIAL DO CONCRETO

Após os ensaios, foi obtida uma resistência à compressão média em 28 dias de $53,8 \pm 3,8$ MPa. O módulo de elasticidade foi definido a partir de reta secante para de 30% da resistência de cada ensaio, resultando em valor médio igual a $36,7 \pm 4,3$ GPa. Já para os ensaios com adição de fibras de polipropileno, os resultados foram inferiores. A resistência à compressão foi de $45,4 \pm 2,1$ MPa com $28,7 \pm 3,8$ GPa de módulo de elasticidade. Esta redução está associada à presença de zonas interfaciais entre as fibras e a matriz de concreto. Tais zonas são caracterizadas por uma elevada porosidade e baixas propriedades mecânicas, conforme discutido no item 2.1.2. Os resultados obtidos em cada ensaio são apresentados na Figura 35 e na Tabela 5 a seguir.

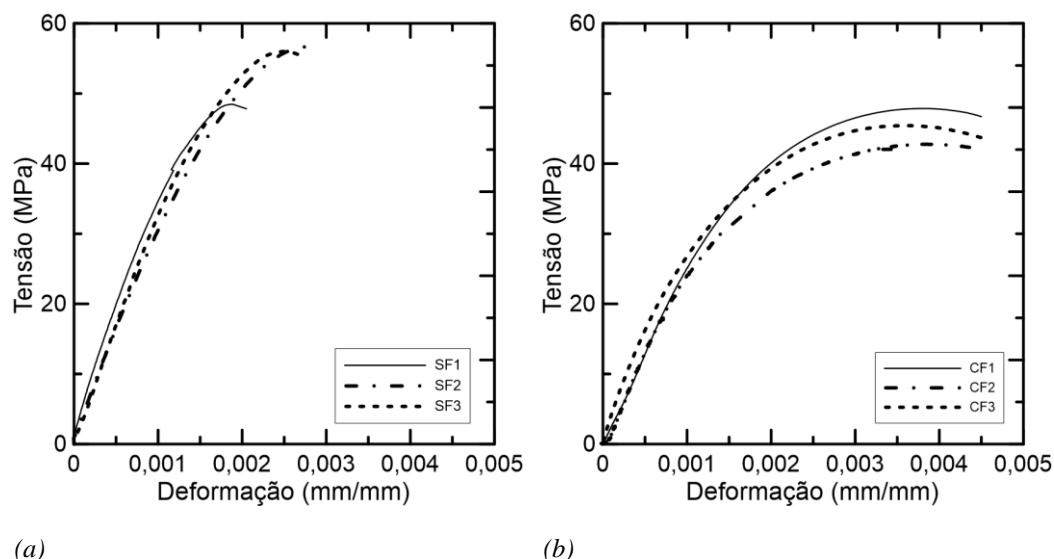


Figura 35. Resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial com (a) e sem adição de fibras (b).

Tabela 5. Resultado dos ensaios de compressão uniaxial.

	$\sigma_{\max}(\text{MPa})$	$\epsilon_{\max}(\text{mm/mm})$	E (GPa)
SF1	48,5	0,0019	42,7
SF2	56,8	0,0029	33,2
SF3	56,0	0,0027	34,1
Média	53,8	0,0025	36,7
Desvio padrão	3,8	0,0004	4,3
CF1	47,9	0,0039	26,1
CF2	42,8	0,0038	26,0
CF3	45,4	0,0036	34,1
Média	45,3	0,0038	28,7
Desvio padrão	2,1	0,0001	3,8

4.1.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA E DO MÓDULO À TRAÇÃO DIRETA DO CONCRETO

Assim como os corpos de prova submetidos à compressão, os resultados foram obtidos aos 28 dias de idade. Os resultados dos ensaios (Figura 36-a) para a dosagem de concreto sem fibra foram obtidos por Silveira [25] para uma matriz de dosagem igual a usada nesta pesquisa. A resistência obtida nos ensaios de tração direta para os corpos de prova sem fibra foi de $4,6 \pm 0,1$ MPa, com $62,0 \pm 15,5$ GPa de módulo. As imperfeições proporcionadas pela adição de fibra causaram uma redução na resistência e no módulo à tração do concreto: $2,8 \pm 0,2$ MPa e $27,7 \pm 4,3$ GPa, respectivamente. No entanto, houve um ganho de resistência residual à

tração de $0,6 \pm 0,1$ MPa para uma deformação de 0,01% e para grandes deformações, este se manteve constante com uma resistência residual média de 0,3 MPa.

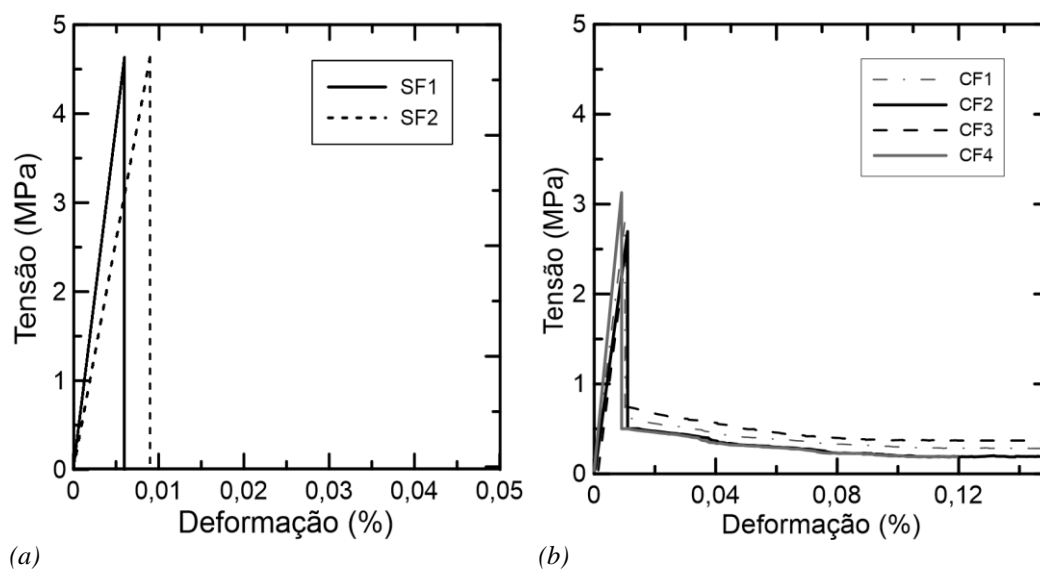


Figura 36. Resultados obtidos nos ensaios de tração direta: a) concreto simples obtido por Silveira[25]; b) com adição de fibras de polipropileno.

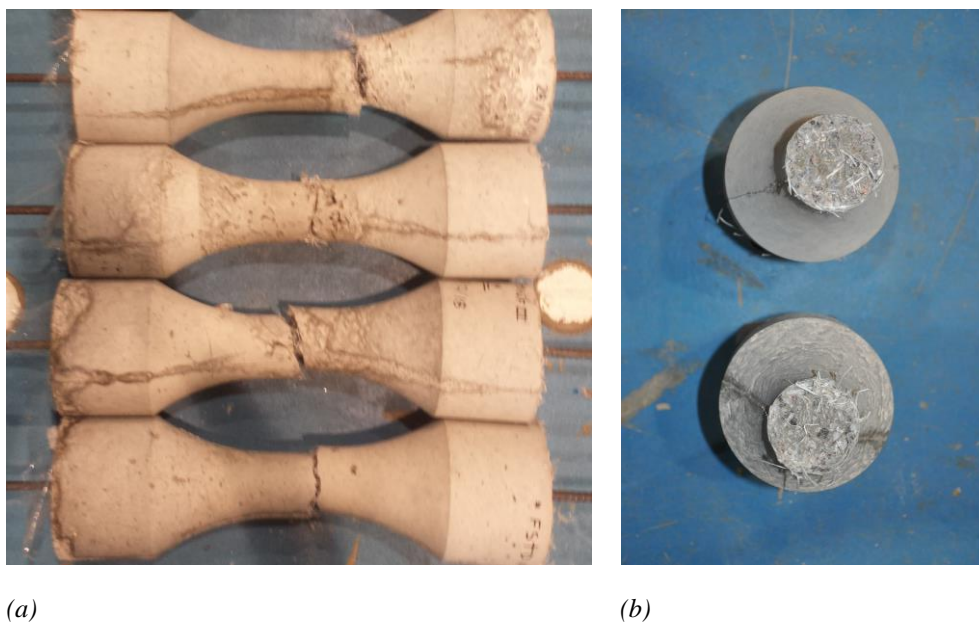


Figura 37. Modos de falhas dos corpos de prova de concreto submetidos a tração (a) e um detalhe do mesmo (ultimo corpo de prova de cima para baixo)

Tabela 6. Resultados dos ensaios de tração direta do concreto com adição de 1% de fibras de polipropileno

	σ_{tmax} (MPa)	σ_{tres} (MPa)	ϵ_{max} (mm/mm)	E_t (GPa)
CF1	2,8	0,62	0,00010	27,8
CF2	2,7	0,50	0,00011	24,5
CF3	2,6	0,75	0,00011	23,8
CF4	3,1	0,51	0,00009	34,7
Média	2,8	0,60	0,00010	27,7
Desvio padrão	0,2	0,10	0,00001	4,3

4.1.3 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA E DO MÓDULO À TRAÇÃO DAS BARRAS DE GFRP

A solução proposta para evitar o esmagamento das garras para os ensaios de tração em amostras de barras de GFRP foi bem sucedida. Todos os diagramas tensão-deformação obtidos confirmam o comportamento essencialmente elástico-linear das barras de compósitos. A resistência à tração média da barra foi de $899,5 \pm 47,7$ MPa e o módulo de elasticidade $46,2 \pm 6,1$ GPa. Embora os resultados médios obtidos sejam próximos aos fornecidos pelo fabricante (Tabela 3), uma variação não esperada nos resultados foi observada, provavelmente associada ao uso de frações volumétricas diferentes nas barras, o que explica o módulo de elasticidade acentuado para os corpos de prova P3, P4 e P6. Mais adiante, nos resultados dos elementos estruturais, é possível perceber que as barras lá utilizadas têm aparentemente um módulo mais baixo, correspondente ao dos corpos de prova P1, P2 e P5. A Figura 38-b, apresenta os modos de falha observados nos ensaios. A ruptura das barras ocorreu na região central do comprimento livre, com exceção da última barra (da esquerda para direita na imagem), e foi caracterizado pela aparição de fissuras paralelas ao eixo da barra e, em alguns casos, ruptura dos fios helicoidais na superfície da mesma.

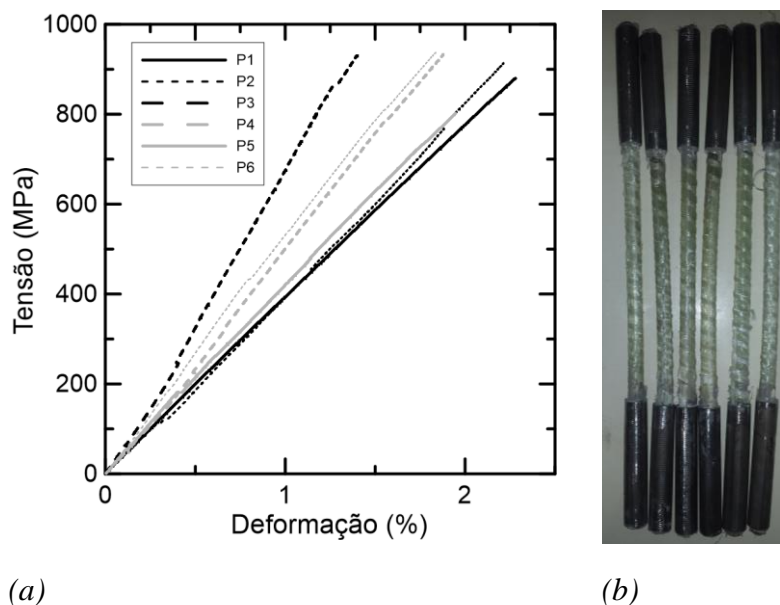


Figura 38. a) Resultados obtidos para os ensaios de tração direta em barras de GFRP; b) modo de falha das barras ensaiadas.

Tabela 7. Resultados dos ensaios de tração direta em barras de GFRP.

	σ_{tmax} (MPa)	ϵ_{tmax} (mm/mm)	E_t (GPa)
P1	879,4	2,3%	40,7
P2	916,9	2,3%	39,0
P3	930,5	1,4%	57,5
P4	801,6	1,9%	47,5
P5	932,6	1,9%	43,6
P6	936,1	1,8%	49,1
Média	899,5	1,9%	46,2
Desvio padrão	47,8	0,3%	6,1

4.1.4 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA E DO MÓDULO À TRAÇÃO DAS BARRAS AÇO

O resultado do ensaio de tração direta na barra de aço usada nesta pesquisa é apresentado na Figura 39 e segue forma típica dos diagramas, contendo trecho de encruamento após uma deformação de aproximadamente 2,5%. A tensão de escoamento chegou a 480 MPa, enquanto o módulo de elasticidade verificado foi de 198 GPa. Comparando o resultado com os obtidos para as barras de GFRP, as barras de aço apresentaram uma resistência inferior. No entanto, possuem um módulo muito maior, da ordem de 5 vezes o valor do módulo de elasticidade das barras de GFRP.

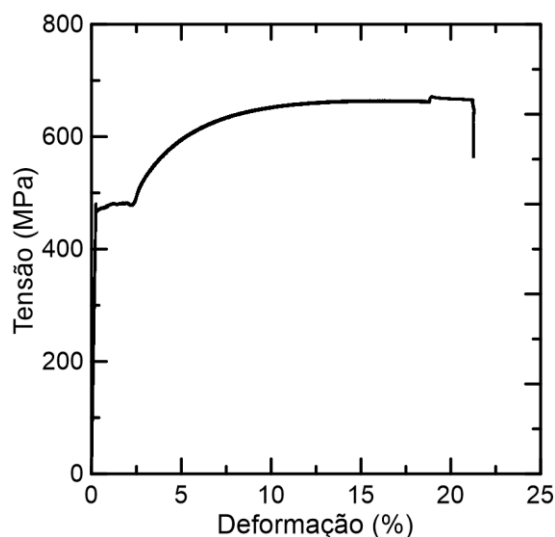


Figura 39. Resultado do ensaio de tração direta em barra de aço

4.2 ENSAIO DE ARRANCAMENTO

A relação típica entre tensão de aderência e deslizamento da barra na extremidade carregada é apresentada a seguir, na Figura 40, onde é possível identificar os três estágios do comportamento interfacial típicos observados nos ensaios. Interessante notar um comportamento em forma de onda na etapa de atrito puro. Isto ocorre em função da presença dos fios helicoidais na superfície da barra, pois as deformações na mesma se ajustam ao concreto realizando uma tensão radial de compressão no concreto, que reage aumentando o confinamento na barra.

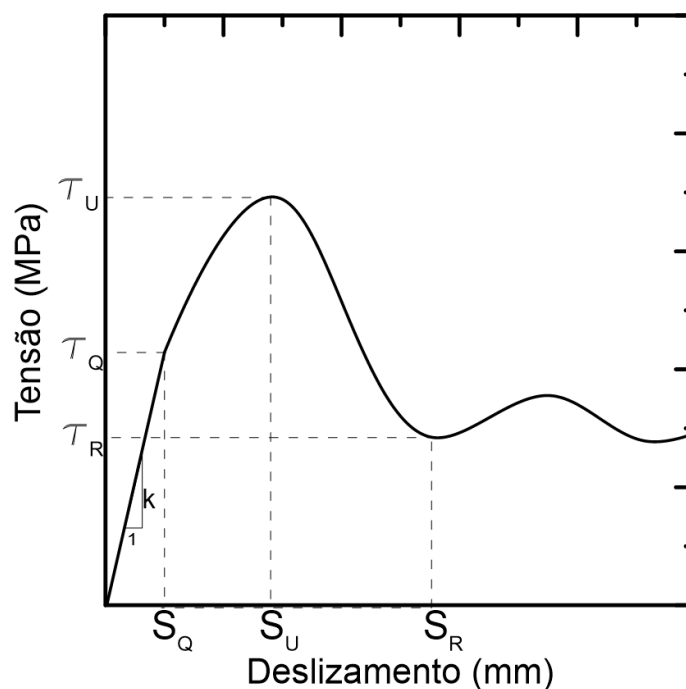


Figura 40. Comportamento típico dos ensaios de arrancamento

Nas Figuras 41-a e 41-b são apresentadas as curvas tensão de aderência versus deslizamento medidos com o transdutor do lado carregado, para as condições sem e com fibra, respectivamente. As fibras de polipropileno não reagem com a matriz de concreto e, sendo assim, nenhuma alteração significativa foi notada no estágio 1 (adesão química) com a adição das mesmas. O resultado dos ensaios é apresentado na Tabela 5. O confinamento proporcionado pelas fibras resultou em um acréscimo de 17% na tensão máxima e 55% na tensão residual de ligação concreto-GFRP. Já na Figura 42 são apresentados os resultados para a extremidade descarregada da barra. Claramente os resultados obtidos pelo LVTD no extremo carregado apresentaram maior deslizamento, resultante da deformação sofrida pela barra ao longo do comprimento de transferência de força para o concreto.

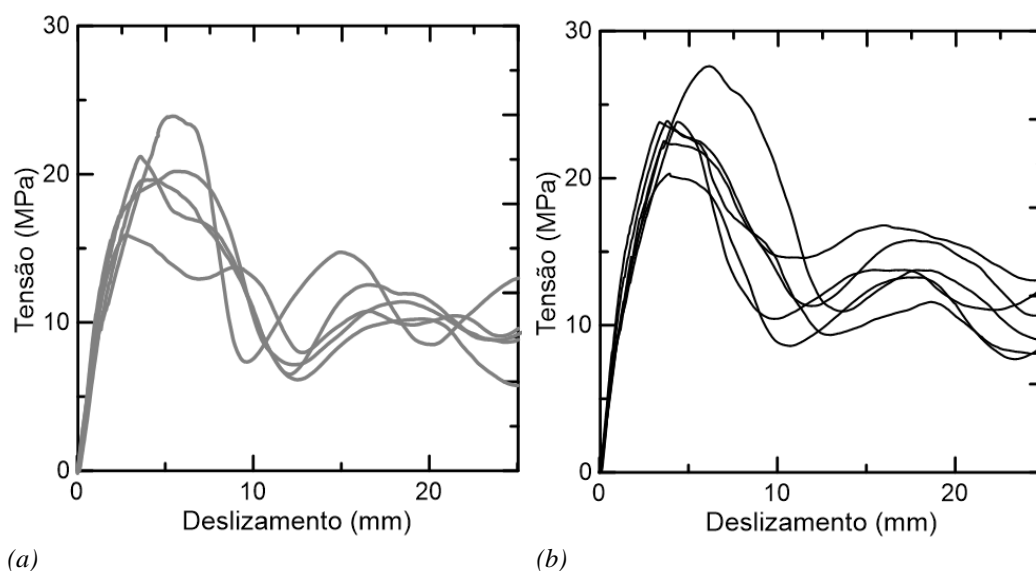


Figura 41. Resultados dos ensaios de arrancamento de barras de GFRP obtidos pelos LVDTs do lado carregado: a) sem fibras; b) com fibras.

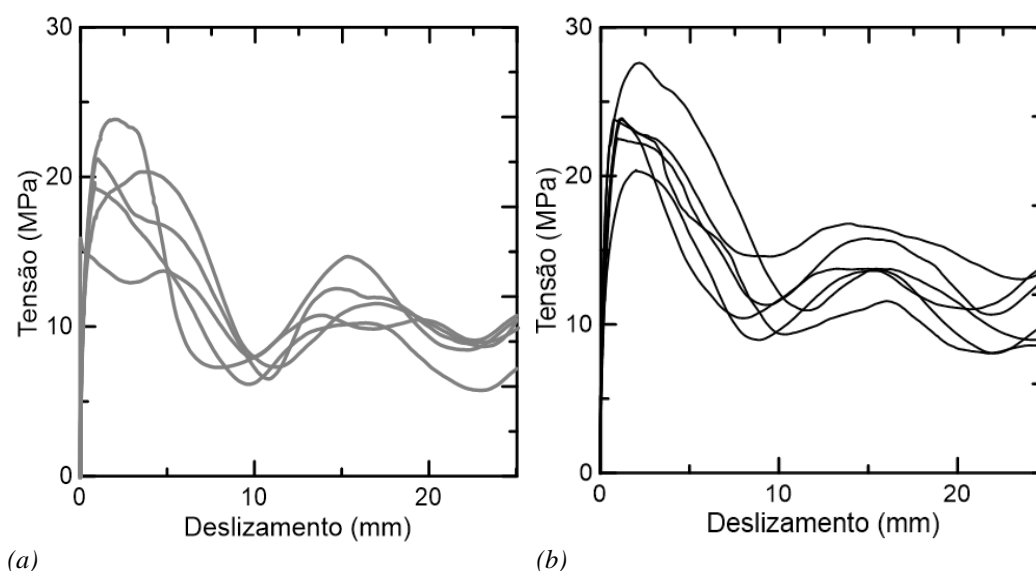


Figura 42. Resultados dos ensaios de arrancamento de barras de GFRP obtidos pelo LVDT descarregado para corpos de prova sem fibras (a) e com fibras (b).

Os ensaios realizados em barras de aço, apresentaram comportamento similar, conforme resultados para os extremos carregado e descarregado apresentados nas Figuras 43-a e 43-b, respectivamente. No entanto, pode-se perceber que as barras atingiram o escoamento aparentemente antes da fase de descolamento. Interessante observar que esse fenômeno aconteceu somente junto ao lado carregado.

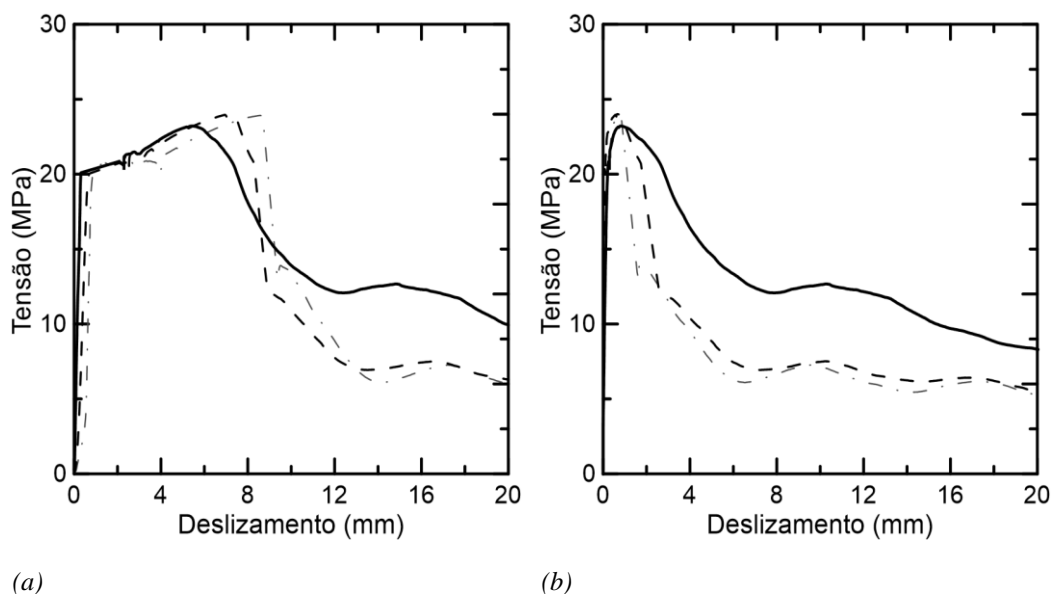


Figura 43. Resultados dos ensaios de arrancamento de barras de aço obtidos pelos LVDTs descarregado (a) e carregado (b)

Foi verificado, uma considerável diferença na tensão adesional entre os corpos de prova com barras de aço e de GFRP. Sem levar em conta os resultados para matrizes com fibras, a tensão de ligação entre a barra e a matriz é superior nos três estágios, sendo 74% na tensão adesional, 17% na tensão máxima e 18% na tensão residual. No entanto, vale ressaltar que o deslizamento da barra de aço foi, em média, 46% inferior que o observado para as barras de não-metálicas. Quando fibras de PP são adicionadas ao concreto ligado às barras de GFRP o comportamento da interface se equipara ao das barras de aço embebidas em concreto em termos de resistência máxima e residual. Já a relação de adesão química se mantém praticamente a mesma com uma superioridade do aço de 69%.

Também foram verificadas as tensões de adesão principais destes materiais conforme a equação 21, proposta pela RILEM-FIP-CEB [47]. O comportamento foi similar ao observado para as demais tensões analisadas. As barras de aço apresentaram uma tensão principal 38 e 26% maior que as barras de GFRP embebidas em concreto puro e com adição de fibras, respectivamente. É interessante notar que a relação entre tensão e deslizamento (k) foi reduzida, devido redução do módulo de elasticidade do concreto promovida pela adição de fibras.

Tabela 8. Tensão (τ) e deslizamento no extremo carregado (S_c) e descarregado (S_d) obtidos nos ensaios de arrancamento para as barras de GFRP embebidas em concreto simples e com fibra e para as barras de aço em concreto simples.

	<i>SF-P</i>	<i>CF-P</i>	<i>SF-A</i>
τ_Q (MPa)	9,3±1,8	9,5±1,2	16,1±1,1
S_{Qc} (mm)	1,0±0,2	1,0±0,1	
S_{Qd} (mm)	0,1±0,05	0,13±0,04	0,11±0,04
τ_U (MPa)	20,2±2,6	23,7±2,1	23,7±0,4
S_{Uc} (mm)	4,3±1,1	4,2±0,9	
S_{Ud} (mm)	1,5±1,0	1,4±0,5	0,8±0,1
τ_R (MPa)	7,1±0,6	10,9±1,8	8,4±2,5
S_{Rc} (mm)	11,9±1,1	11,8±1,2	
S_{Rd} (mm)	9,9±1,1	9,6±1,0	7,3±0,62
τ_{bm} (MPa)	10,7±0,6	11,7±1,3	14,8±1,6
K (MPa/mm)	93±3,6	71±2,4	145±2,1

4.3 ENSAIO DE TRAÇÃO DIRETA EM PRISMAS DE CONCRETO ARMADO

Setes corpos de prova foram ensaiados com sucesso. Um prisma reforçado com fibras de polipropileno e barra de fibra de vidro teve uma ruptura prematura e não foi ensaiado. Dois ensaios resultaram em ruptura da barra no trecho central do prisma, enquanto cinco apresentaram ruptura da barra junto à garra da máquina, mesmo com a proteção metálica. A Figura 45 apresenta os modos de falha típicos observados. Nas Figuras 44-a e 44-b os resultados de força aplicada por deformação relativa ($\Delta L/L$) são plotados para os corpos de prova com e sem fibras, respectivamente. Uma reta representando a rigidez média obtida experimentalmente para a barra de GFRP ‘nua’ também é plotada.

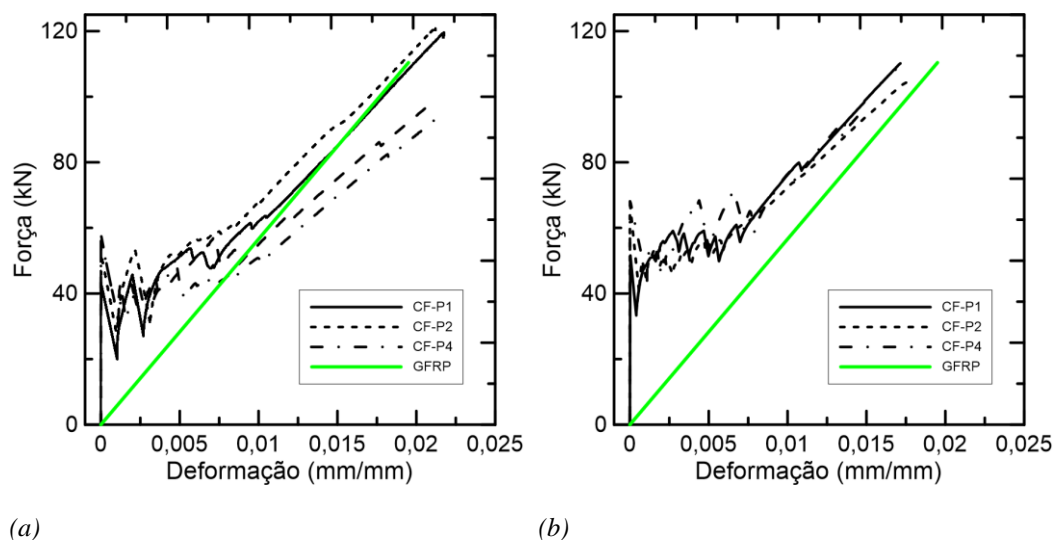


Figura 44. Resultados dos ensaios de tração direta em prismas de concreto reforçados por barras de GFRP: (a) sem adição de fibra; (b) com adição de fibra

Da Figura 44, pode-se perceber que o concreto entre fissuras contribui de maneira importante para a rigidez do conjunto. Além disso, a Tabela 6 apresenta as alterações de resistência e rigidez até a primeira fissura ($F_{1^{\circ}f}$ e $EA_{1^{\circ}f}$, respectivamente) e após o estágio de múltipla fissuração (F_{\max} e EA_{\max} , respectivamente). Assim como para os ensaios de tração direta do concreto sem reforço, a adição de fibras resultou em uma redução drástica do módulo de elasticidade de 56%. Porém, foi observado um aumento de 19% da resistência à primeira fissura. Além disso, para os espécimes com adição de fibras, houve um acréscimo de 13% na rigidez após a abertura de fissuras. Como é possível observar na Figura 44, a reta representando o comportamento médio a tração da barra de GFRP “nua” está com um comportamento mais rígido que alguns espécimes ensaiados o que não faz sentido, visto que o concreto auxilia na rigidez aumentando a mesma. Isto pode estar associado com uma falha de execução das barras o que justificaria a variação do comportamento da barra, observada no item 4.1.3. Dessa forma, o resultado médio observado pode não representar o real valor do módulo da barra.

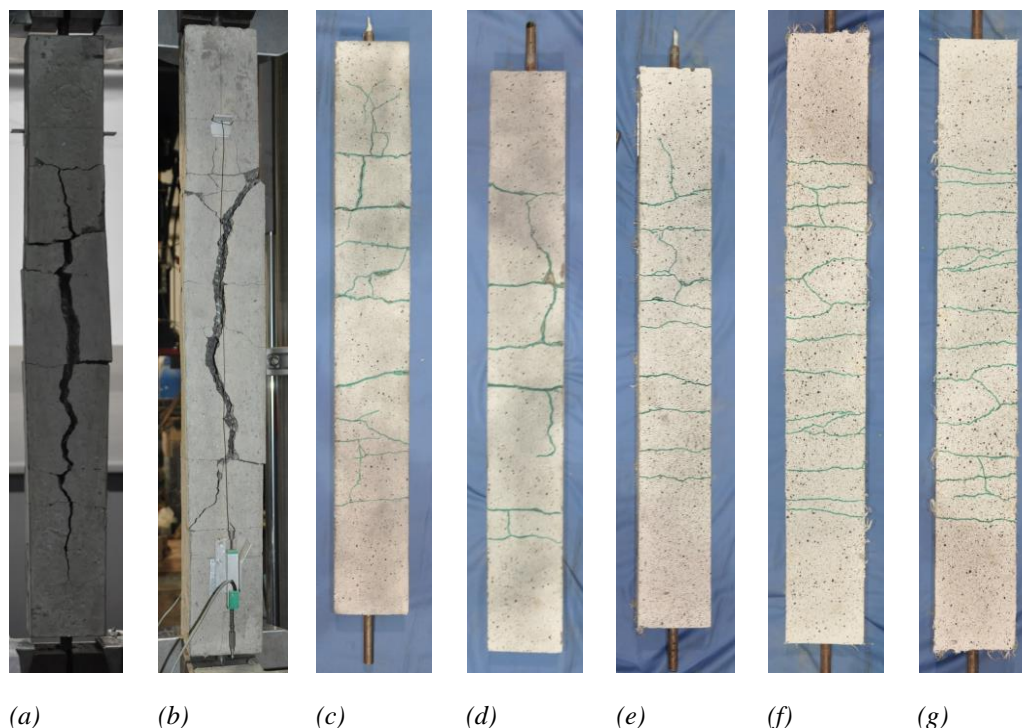


Figura 45. Modo de falha dos prismas reforçados por barras de GFRP à tração: a) SF-P1; b) SF-P2; c) SF-P3; d) SF-P4; e) CF-P1; f) CF-P2 g) CF-P4

As médias das forças obtidas nos ensaios foram usadas para o cálculo do fator de enrijecimento, β , para deformações correspondentes à primeira fissura e para deformações de 0,0025; 0,0050; 0,0075 e 0,0100 mm/mm. Os resultados do fator de enrijecimento por deformação para as barras de GFRP são apresentados na Figura 46, juntamente com o resultado de prismas reforçados por barras de aço reportado por Silveira [25]. Vale ressaltar que os ensaios da autora foram realizados para um mesmo traço e sob as mesmas condições que os ensaios realizados na presente pesquisa. A contribuição à rigidez do concreto se faz muito mais presente quando as barras de GFRP são utilizadas se comparadas a barras de aço. Isto pode ser explicado, pelo fato das barras de GFRP possuírem um módulo de elasticidade na ordem de cinco vezes menor que o aço, conforme explicado na seção 2.1.1.1.

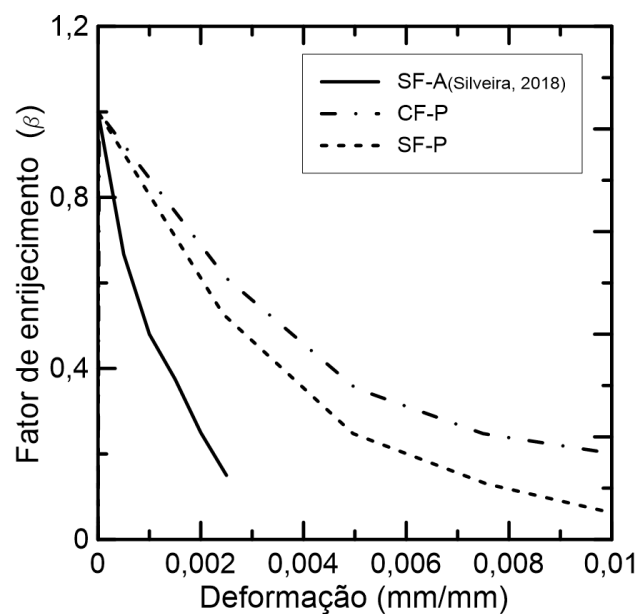


Figura 46. Comparação entre a média do fator de enrijecimento com o acréscimo de deformação dos resultados obtidos em prismas de concreto reforçado com barras de GFRP (com e sem fibras) e com barras de aço (Silveira [65])

Tabela 9. Resultado dos ensaios de tração direta em prismas de concreto reforçado

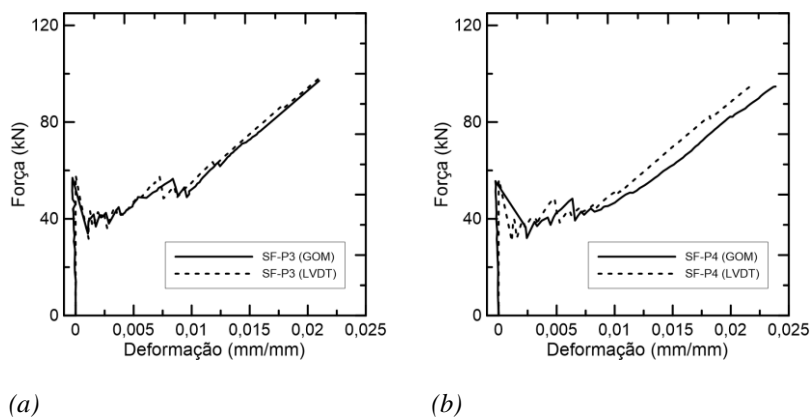
	$\epsilon_{1^{ef}}$ (mm/mm $\times 10^3$)	$F_{1^{ef}}$ (kN)	$EA_{1^{ef}}$ (kN/ 10^6)	ϵ_{max} (mm/mm)	F_{max} (kN)	EA_{max} (kN)
SF-P1	0,008	42,54	5,39	0,022	118,5	4844
SF-P2	0,008	52,15	6,51	0,021	120,7	4750
SF-P3	0,009	57,90	6,43	0,021	97,10	3953
SF-P4	0,009	56,04	6,23	0,022	94,71	3765
Média SF	0,008	52,16	6,15	0,021	107,8	4328
Desvio padrão	0,001	5,93	0,45	0,0003	11,90	475,0
CF-P1	0,030	51,58	1,72	0,017	110,2	5314
CF-P2	0,016	67,01	4,12	0,018	105,3	4277
CF-P3	0,023	68,12	2,94	0,015	97,37	5396
Média CF	0,023	62,24	2,69	0,017	104,3	4996
Desvio padrão	0,006	7,55	0,98	0,001	5,280	509,2



Figura 47. Detalhe do fendilhamento que ocorreu no corpo de prova SF-P1

4.3.1 CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM EM ENSAIOS DE TRAÇÃO DIRETA

A fim de validar os resultados apresentados pelo *software*, pontos próximos às faces do prisma simulando os LVTDs foram selecionados para obtenção da deformação total do conjunto. Os resultados foram comparados com os resultados dos transdutores de deslocamento (Figura 48), tendo sido considerados aceitáveis. A comparação entre os resultados do GOM e dos transdutores de deslocamento é realizada na Figura 48 a seguir.



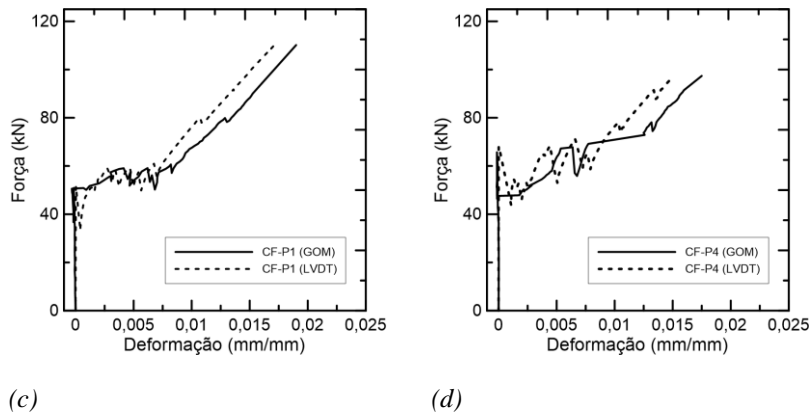


Figura 48. Comparação entre os resultados obtidos com os transdutores de deslocamento e o software GOM correlate: a) SF-P3; b) SF-P4; c) CF-P1; d) CF-P4

A análise de abertura de fissuras foi realizada com o auxílio do medidor de distância entre dois pontos do software GOM correlate. A Figura 49 ilustra a disposição das distancia avaliadas para a abertura de fissuras (Figura 49-a) e o esquema adotado para verificação da deformação total do conjunto (Figura 49-b).

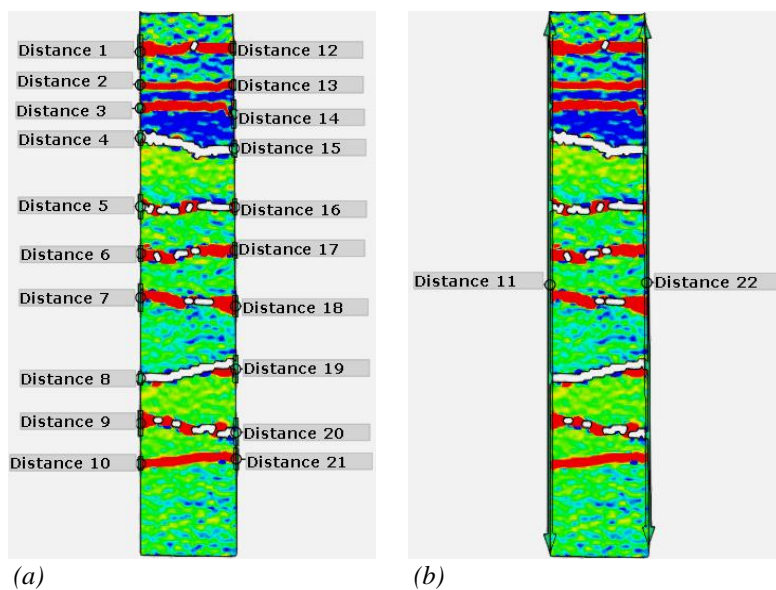
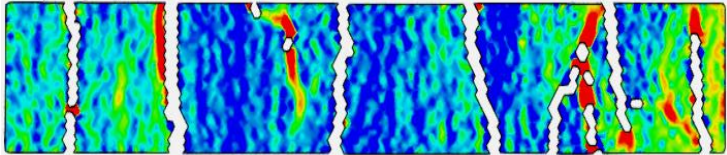
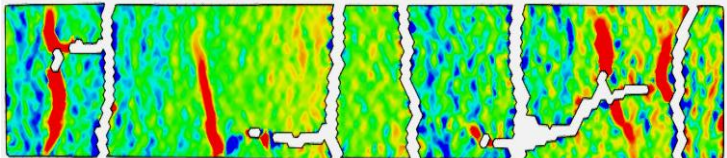
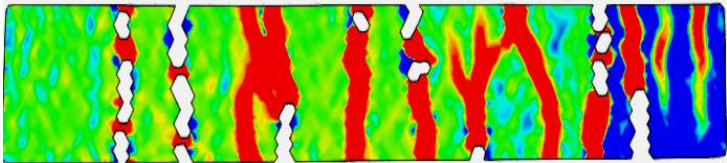
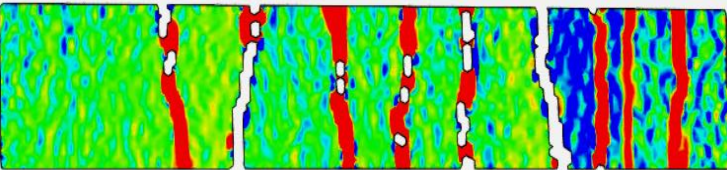


Figura 49. Método adotado para medição da abertura de fissuras (a) e verificação do deslocamento (b) no programa GOM correlate.

Como mencionado anteriormente, as fibras atuam como pontes de transferências de força através fissuras. Desta forma, contribuem para aproximar as fissuras e reduzir as aberturas. Isto fica evidente analisando os resultados obtidos

pelo GOM correlate. Na Tabela 7 a seguir, o número de fissuras (N_f) e a abertura média (W_m) para alguns ensaios são reportadas para uma força aplicada de 75 kN.

Tabela 10. Resultados obtidos pela análise de imagens nos prismas de concreto.

Imagem gerada pelo GOM	N_f	W_m (mm)	CP
	7	1,56	SF
	6	2,03	SF
	12	0,73	CF
	9	0,89	CF
Onde N_f representa o número de fissuras, W_m a abertura média de fissuras e CP as condições de matriz usada no corpo de prova: com fibra CF e sem fibra SF.			

O acréscimo de fibras proporcionou um aumento de 77% no número de fissuras e uma redução de 54% do tamanho médio das mesmas para a referida carga. Reduções de mesma ordem podem ser observadas em todos os ensaios como é possível verificar nas Figuras 50-a e 50-b, que mostram a evolução das aberturas média e da primeira fissura formada com o carregamento, respectivamente.

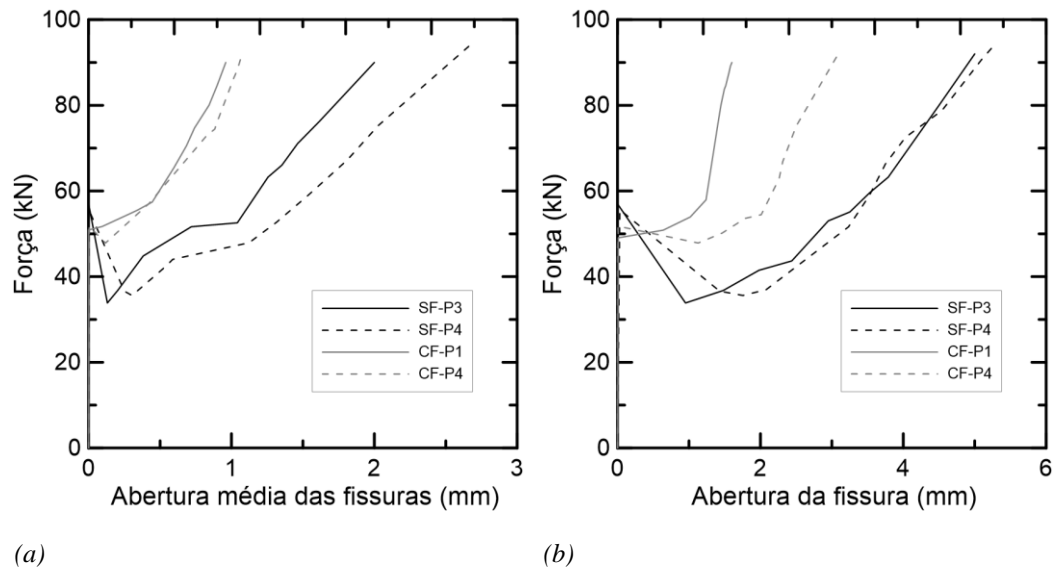


Figura 50. Resultado da análise de abertura de fissuras obtidas com a análise de imagens: (a) media das fissuras; (b) evolução da primeira fissura

Uma curva de distância entre fissuras com o acréscimo de deformação foi usada para verificar o comportamento de múltipla fissuração dos corpos de prova. Conforme o resultado, apresentado na Figura 51, as amostras com adição de fibras apresentaram fissuras mais próximas que aquelas sem fibras.

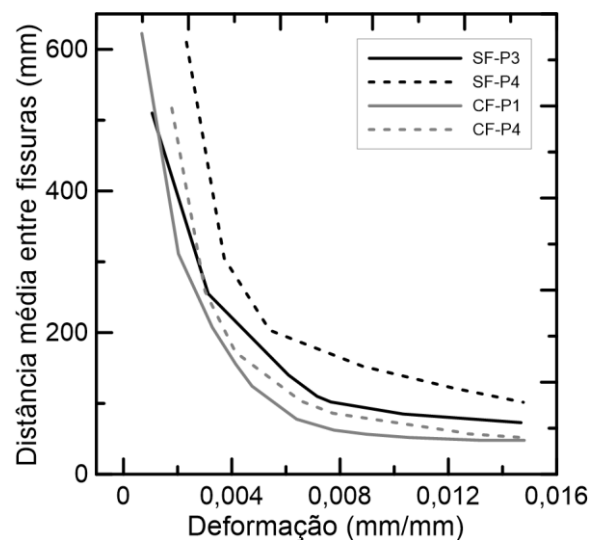


Figura 51. Distância média entre fissuras com o acréscimo de deformação

Para a análise do espaçamento entre fissuras, a média dos resultados experimentais dos prismas sem reforço fibroso foi comparada com as previsões segundo os modelos analíticos recomendados pela FIB [52] e por Kharal e Sheikh

[50]. Já os espécimes com fibras tiveram seu espaçamento médio entre fissuras comparado com as previsões segundo os modelos propostos pela FIB [52], RILEM [62] e por Deluce e Vecchio [58]. Todos os resultados experimentais foram capturados para uma carga de 60 kN, logo após a etapa de múltipla fissuração. A Figura 52 apresenta a diferença encontrada entre estes modelos analíticos (L_{steo}) e os resultados experimentais (L_{exp}). Os modelos que mais se aproximaram dos resultados experimentais foram, o proposto pela CEB-FIP [52], para matrizes sem adição de fibras. Para matrizes com adição de fibra de PP, não houve um modelo que se destacou em termos de proximidade com os resultados experimentais, os resultados propostos pela CEB-FIP [52] tiveram um resultado ligeiramente mais próximo. Sendo assim, constata-se uma falta de modelos representativos para espaçamento entre fissura de elementos de concreto armado com barras de GFRP e reforçado por fibras de polipropileno.

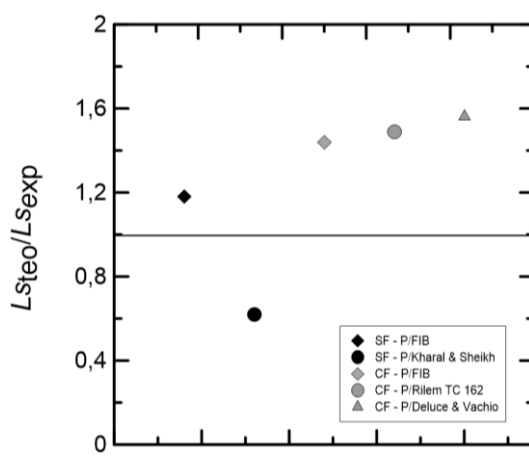


Figura 52. Comparação de resultados experimentais e analíticos para o espaçamento entre fissuras em prismas de concreto reforçado.

4.4 ENSAIOS DE FLEXÃO EM QUATRO PONTOS

As curvas força-deflexão obtidas pelos transdutores de deslocamento são mostradas na Figura 53. Através dela é possível observar um comportamento 10% mais rígido e 14% mais resistente para as vigas com adição de fibras de PP. Isto pode ser atribuído principalmente ao acréscimo de força transferida na zona tracionada por conta da tensão residual do concreto pós-fissuração. A ductilidade das vigas também foi afetada pelo uso de fibras. Utilizando a equação 2.8, proposta

por Jaeger et al. [65] para a relação força-deflexão foi observado um acréscimo de 28% na ductilidade do material. Este acréscimo está relacionado com um comportamento não-linear mais expressivo para o concreto comprimido quando adicionado fibras de PP. Os resultados dos extensômetros não foram satisfatórios e por isso não foram levados em conta.

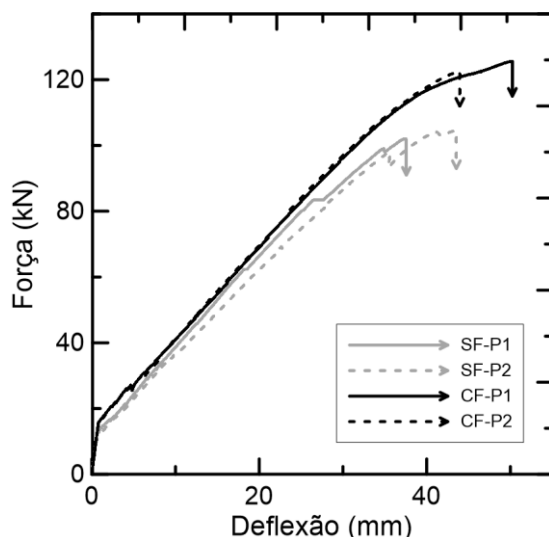


Figura 53. Resultados dos ensaios de flexão para as vigas reforçadas com barras de GFRP.

Na Figura 54, o desempenho das vigas reforçadas por barras de fibras de vidro sem fibras (SF-P) e com fibras (CF-P,) respectivamente, é comparado ao desempenho de vigas reforçadas com barras de aço de mesma taxa de reforço adotada (SF-AAeq) e com a mesma rigidez equivalente (SF-AEeq). Fica evidente a diferença de rigidez utilizando a mesma área de reforço e a diferença de resistência utilizando reforços que proporcionam a mesma rigidez ao elemento. Comparando os resultados da deflexão última apresentada pelas vigas de mesma área de reforço longitudinal, aquelas armadas com GFRP apresentaram maiores deslocamentos, indicando que as vigas podem apresentar grandes deflexões antes da ruptura.

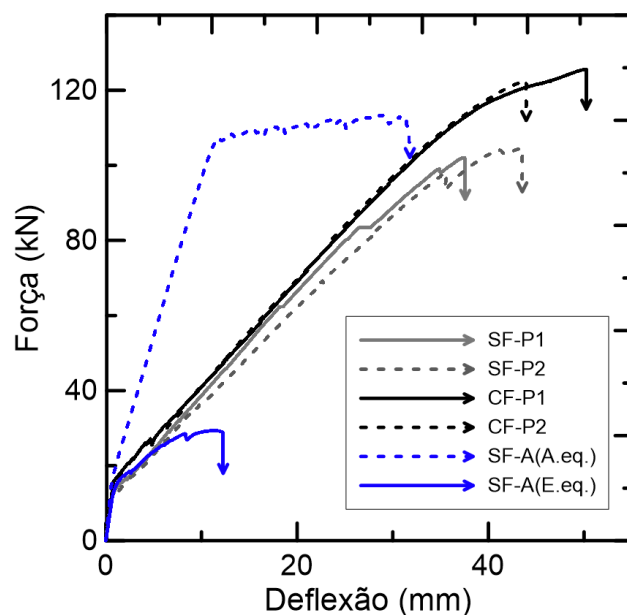


Figura 54. Resultados dos ensaios de flexão para as vigas reforçadas com barras de GFRP.

Fazendo uma comparação em pequenas deflexões (Figura 55), é possível observar que não há muita diferença entre o desempenho das vigas. Isto pode ser explicado, pois nesta etapa, o concreto ainda não se encontra fissurado, contribuindo para a tração de maneira mais importante que as barras de reforço. Após a fissuração o reforço começa a ser o maior responsável por realizar a transferência das forças de tração, dessa forma o concreto deixa de contribuir, caso não tenha fibras, em resistir aos esforços de tração, resultando na alteração da inclinação observada na Figura 55. Quando há fibras no concreto, este passa a auxiliar também após a fissuração, conforme já explicado neste capítulo.

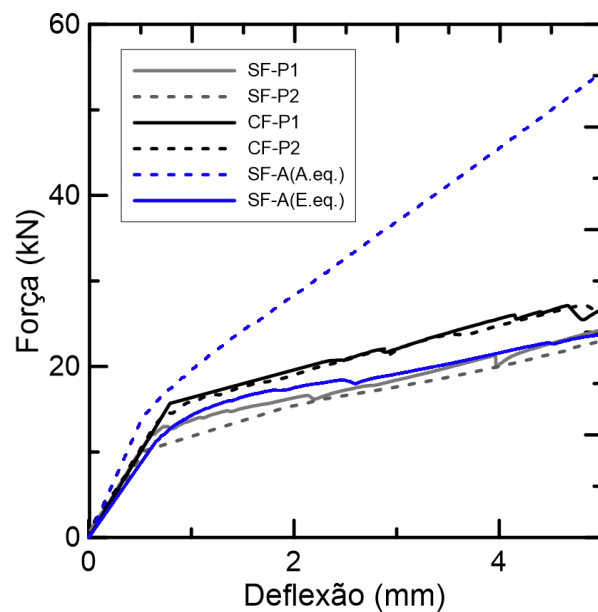


Figura 55. Resultados dos ensaios de flexão para as vigas reforçadas com barras de GFRP com uma deflexão até 5 mm.

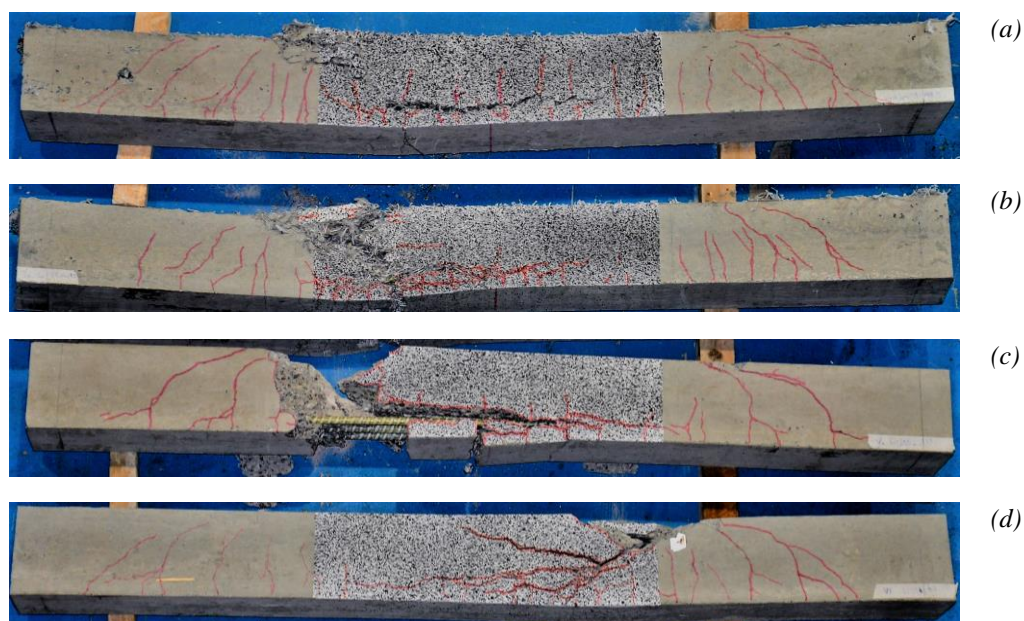


Figura 56. Modos de falha das vigas reforçadas por GFRP ensaiadas: a) CF-P1; b) CF-P2; c) SF-P2; d) SF-P1

4.4.1 CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM EM ENSAIOS DE FLEXÃO

Uma vez que os dados provenientes dos extensômetros foram desprezados, apenas os resultados obtidos pelo GOM Correlate foram usados para traçar a curva momento-curvatura dos ensaios. O procedimento para aquisição dos dados do *software* foi similar ao usado para os ensaios de tração direta em prismas de concreto reforçado. A Figura 57, apresenta o esquema adotado para capturar a abertura de fissuras (Figura 57-a) e a relação momento-curvatura (Figura 57-b), similar ao usado para os ensaios de tração direta.

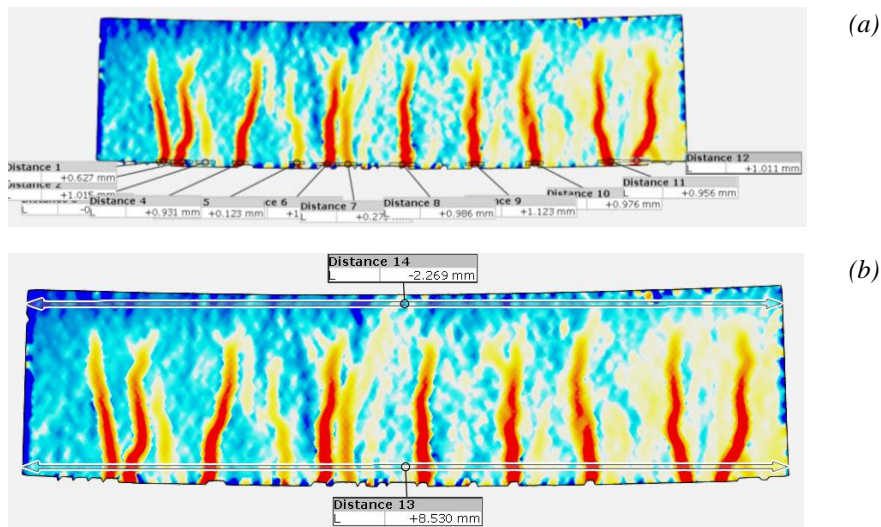
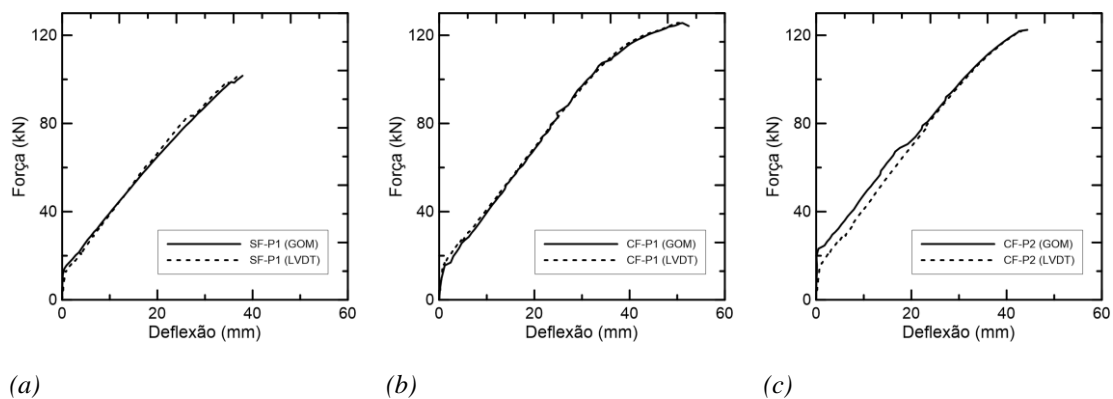


Figura 57. Método adotado para medição da abertura de fissuras (a) e verificação do deslocamento (b) no programa GOM correlate para o ensaio de flexão em quatro pontos.

O resultado capturado pelo transdutor de deslocamento foi comparado com o resultado obtido no software GOM, para um deslocamento vertical no centro das vigas. A Figura 58, a seguir, apresenta esta comparação. Os resultados foram considerados satisfatórios.



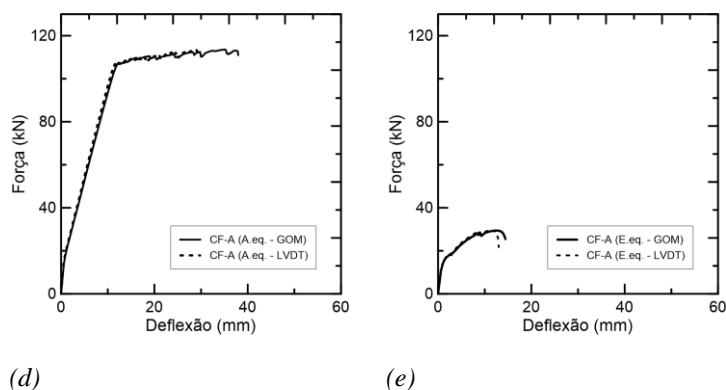


Figura 58. Comparação de aquisição dos dados do comportamento força-deflexão entre o software GOM correlate e o transdutor de deslocamento posicionado no centro do vão: a) SF-P1; b) CF-P1; c) CF-P2; d) SF-AAeq; f) SF-AEeq.

Os resultados para da curva momento-curvatura são apresentados a seguir. Assim como os resultados de força-deflexão, as vigas com acréscimo de fibras dispersas sofreram um acréscimo de rigidez e de momento máximo como era de se esperar (figura 59-a). Além disso, mais evidente é a diferença de performance em comparação com a viga reforçada com mesma área de aço, que apresentou um comportamento mais rígido. A viga com barras de aço de mesma rigidez apresentou uma carga última consideravelmente inferior. As vigas com barra de aço também apresentaram uma ductilidade bastante superior às vigas com barras de GFRP. Um aspecto interessante, no entanto, diz respeito ao fato de que as vigas com mesma área de reforço em aço apresentaram resistência bastante semelhante às vigas de GFRP, o que pode ser explicado pelo fato de que, no primeiro caso, a resistência é governada pelo reforço, enquanto no segundo a resistência é limitada pelas deformações no concreto. As barras de GFRP, portanto, não atingem sua plena capacidade. Apesar de esperadas, essas observações sustentam o fato de que o material possui características específicas, necessitando, portanto de um olhar diferenciado em condições de projeto.

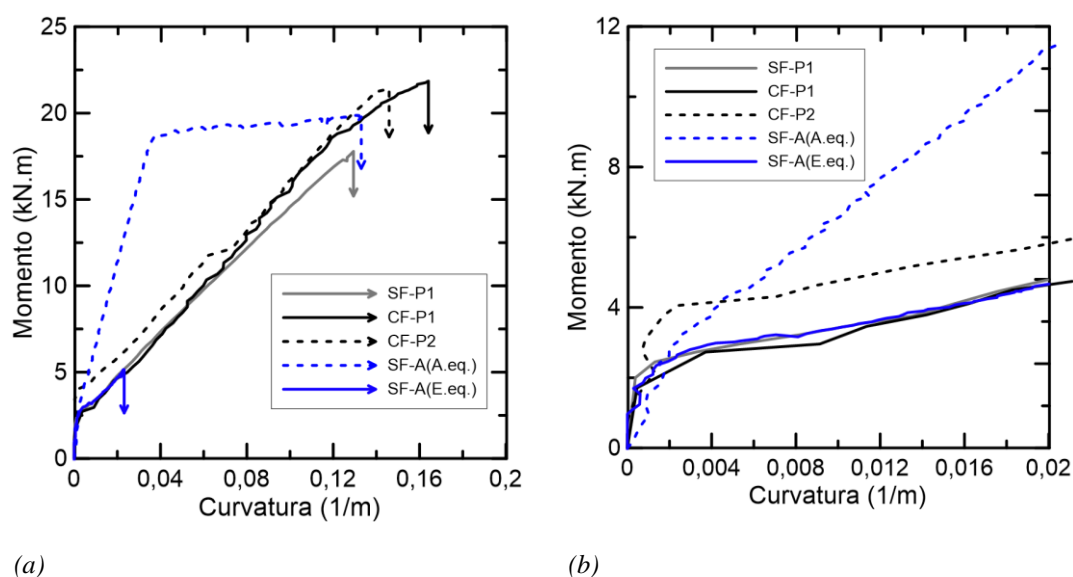


Figura 59. Resultados momento-curvatura obtidos pela análise de imagens: (a) até a ruptura; (b) até uma curvatura de 0,02.

Na Tabela 8 a seguir são apresentadas comparações entre os momentos atuantes em cada viga para aberturas de fissura máximas iguais a 0,5 e 0,7 mm para as vigas armadas com GFRP e 0,3 e 0,4 para as vigas armadas com aço, limites esses sugeridos pela norma canadense [70]

Tabela 11. Resultado do momento aplicado para aberturas de fissura determinadas sugeridos pela norma canadense [70] obtidos com DIC.

	DIC	M (kNm)
SF-P		$M_{0,5\text{mm}}=12,5$
		$M_{0,7\text{mm}}=16,6$
CF-P		$M_{0,5\text{mm}}=15,4$
		$M_{0,7\text{mm}}=19,9$
CF-P		$M_{0,5\text{mm}}=14,7$
		$M_{0,7\text{mm}}=19,9$
SF-AAeq		$M_{0,3\text{mm}}=18,8$
		$M_{0,4\text{mm}}=18,9$
SF-AEq		$M_{0,3\text{mm}}=5,1$

Analisando a Tabela 7 pode-se observar que mesmo com uma tolerância maior para as para as vigas armadas com GFRP à capacidade de carga das mesmas é 34% menor que as vigas armadas com aço para uma abertura média de fissuras destas de 0,3 mm caindo para 17% para aberturas médias de 0,4 mm. Quando fibras são adicionadas à mistura o momento resistido pelas vigas aumenta 20% para as duas aberturas, chegando a superar o momento resistido pelas vigas armadas com aço uma vez que estas entraram em escoamento. Diferente do que ocorreu nas vigas armadas com GFRP, na viga SF-A(Aeq) foi possível observar o fenômeno de *crack localization* antes da ruptura. A viga SF-A(Eeq) rompeu antes de atingir uma abertura de fissura média de 0,4 mm e deixou claro que para mesmas rigidez a performance das vigas armadas com GFRP é muito superior. O desenvolvimento das fissuras com o acréscimo de momento pode ser observado na Figura 60 a seguir.

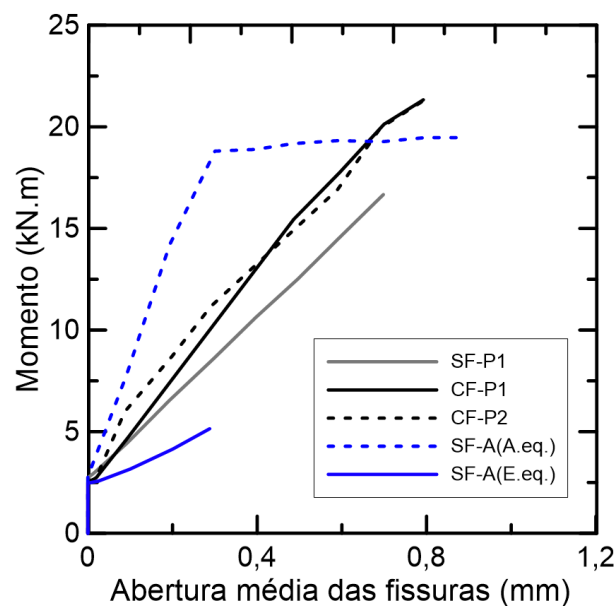


Figura 60. Resultados de momento-abertura de fissura média obtidos nos ensaios de flexão de quatro pontos.

Uma rotina computacional foi implementada no software Maple, a fim de simular o processo iterativo baseado no equilíbrio de forças e momentos da seção transversal descrito no item 2.3 para obter a previsão teórica do comportamento momento-curvatura para as vigas reforçadas por GFRP com e sem fibras. A relação tensão-deformação do concreto inserida no programa foi baseada nas propriedades

obtidas nos ensaios experimentais adaptadas para uma curva parábola retângulo proposta pela NBR 6118 [73]. Para geração deste modelo algumas hipóteses são consideradas, são elas: seções planas permanecem planas; aderência perfeita entre o reforço longitudinal e o concreto; as tensões internas podem ser calculadas a partir dos diagramas tensão-deformação dos materiais constituintes. A Figura 61 apresenta os resultados desta análise, onde o “A” representa os resultados analíticos obtidos na rotina implementada e a sigla “E” os resultados experimentais.

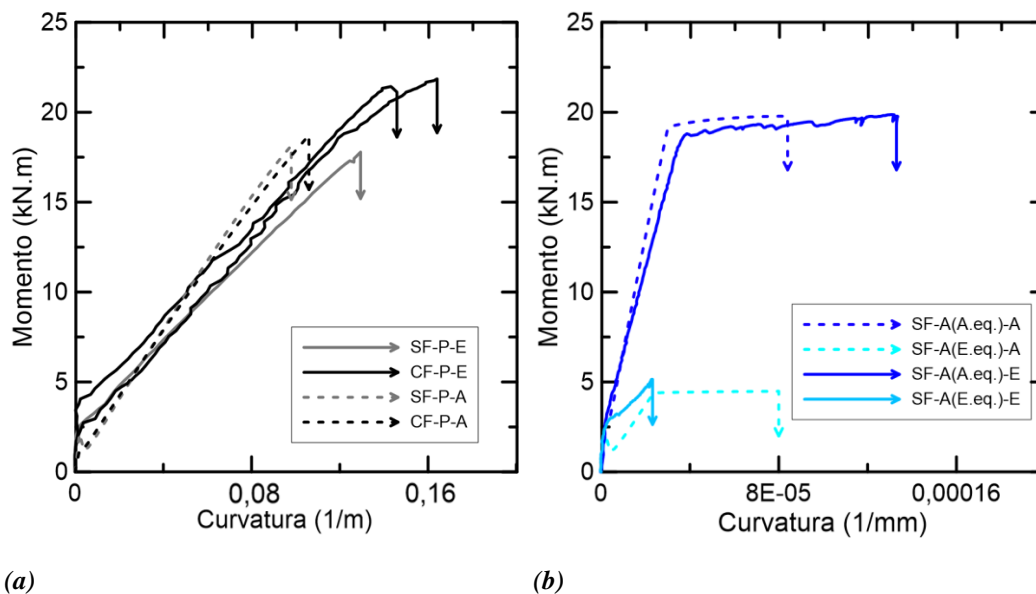


Figura 61. Resultado experimental e analítico para as vigas reforçadas com barras de GFRP (b) e aço (a).

Avaliando o estágio I, i.e., antes da formação de fissuras, tem-se um momento máximo aproximadamente 40% inferior para as vigas reforçadas com barras GFRP com adição de fibras, se comparadas às vigas de mesmo reforço longitudinal sem adição de fibras. O resultado obtido pela análise experimental foi o oposto neste estágio. Nele as amostras com fibras tiveram um desempenho 40% superior comparado com as amostras sem fibras. Analisando o estágio 2, após a formação de fissuras, a diferença diminui. As vigas com fibra tiveram um desempenho 3% superior que as vigas sem fibras no modelo analítico. Comparando os resultados experimentais no mesmo estágio, o resultado foi 20% superior para as amostras com fibras. A maior diferença entre os modelos está na rigidez a flexão, principalmente no estágio 2 com uma variação entre os modelos analíticos e experimentais de 22%. Além disso, os modelos analíticos apresentaram uma

variação de rigidez praticamente nula com a adição de fibras enquanto os resultados experimentais apresentaram um acréscimo de 13% na rigidez. Analisando a ductilidade das vigas, houve um aumento 42% com o uso de fibras. A tabela 9, a seguir, apresenta um resumo dos resultados analíticos e experimentais usados nesta análise.

Tabela 12. Resultado experimental e analítico para as vigas reforçadas com barras de GFRP e aço.

		M_{E1} (kN.m)	φ_{E1} (1/m)	EI_{E1} (kN.m ²)	M_{E2} (kN.m)	φ_{E2} (1/m)	EI_{E2} (kN.m ²)
SF A(A.eq)	Analítico	2,90	0,00200	1450	19,11	0,0300	579
	Experimental	2,65	0,00198	1338	18,75	0,0396	428
SF - A(E.eq)	Analítico	2,10	0,00200	1050	4,40	0,0240	136
	Experimental	2,45	0,00193	1269	5,15	0,0232	127
SF - P	Analítico	2,10	0,00200	1050	18,15	0,0980	172
	Experimental	2,13	0,00200	1065	17,78	0,1290	124
CF - P*	Analítico	1,29	0,00200	645	18,72	0,1060	168
	Experimental	2,15	0,00237	907	21,85	0,1540	140
*média dos resultados; M_{E1} , φ_{E1} , EI_{E1} momento, curvatura e rigidez no estágio 1, respectivamente; M_{E2} , φ_{E2} , EI_{E2} momento, curvatura e rigidez no estágio 2, respectivamente;							

A explicação para esta diferença se dá no resultado médio do módulo de elasticidade obtido para nos ensaios de tração direta. Conforme mencionado na Seção 4.1.3, acredita-se que as barras utilizadas nos ensaios estruturais tenham uma fração volumétrica de fibras mais baixa, compatível com a das amostras de barras 1, 2 e 5 (Figura 38-a), com um módulo de elasticidade mais baixo. Considerando apenas as referidas amostras, o módulo ficaria aproximadamente $41 \pm 1,8$ GPa e o resultado do modelo se aproxima do experimental, conforme mostrado na Figura 62.

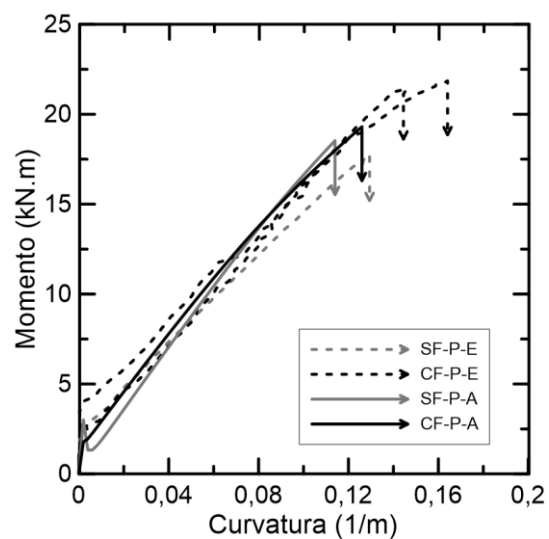


Figura 62. Resultado experimental e analítico para as vigas reforçadas com barras de GFRP considerando um módulo de 41 GPa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa uma solução para as deficiências de elementos de concreto armado com barras de GFRP foi estudada através da incorporação de uma fração volumétrica de 1% de fibras de polipropileno. No total 65 ensaios foram realizados, dentre eles, 10 de caracterização do concreto (simples e misturado com fibras) e 7 para caracterização das barras de GFRP e de aço. Uma nova proposta para ensaios de arrancamento direto foi testada em 15 corpos de prova dos quais 12 de concreto sem e com fibras com barras de GFRP e 3 de concreto sem fibra com barras de aço. Em uma escala estrutural, 7 ensaios de tração direta em prisma foram conduzidos a fim de identificar a influência da presença das fibras na fissuração e no efeito de enrijecimento à tração em elementos de concreto armado com barras de GFRP. Além disso, 6 ensaios de flexão em quatro pontos foram executados para avaliar a ductilidade e os efeitos em condições de serviço, mais especificamente fissuração e rigidez à flexão de tais elementos. Sendo assim, algumas conclusões podem ser destacadas e serão apresentadas neste capítulo.

Para todos os casos a adição de fibras resultou em uma redução da rigidez do concreto antes da fissuração devido ao acréscimo de imperfeições atrelado a um baixo módulo de elasticidade da fibra e aderência fibra-matriz. Entretanto, atuando em conjunto com as barras de GFRP, o uso de fibras no concreto resultou em maior resistência e rigidez após a fissuração.

A solução para evitar o esmagamento em barras de GFRP com proteção de tubos metálicos de 19mm de diâmetro, 2 mm de espessura e 100 mm de comprimento de contato com a garra foi satisfatória para os ensaios de tração direta em barras ‘nuas’ e para os ensaios de arrancamento. Já para os ensaios de tração em primas de concreto a solução deixou a desejar, principalmente quando fibras eram adicionadas ao concreto. Tubos de maior espessura ou com um comprimento embutido na garra maior poderiam evitar esta situação.

O modelo de ensaio de arrancamento adaptado da norma ASTM A1081, proposto nesta pesquisa, se mostrou uma boa alternativa para avaliar a ligação entre o concreto e a armadura a ser adotada. A introdução de fibras no concreto pouco afetou a adesão química na interface entre a barra de GFRP e o concreto. Entretanto,

resultou em um acréscimo de 17% na resistência máxima ao arrancamento e 55% na tensão residual da ligação. A aderência do concreto com as barras de aço foi em geral superior a aderência com as barras GFRP

O efeito de enrijecimento a tração foi amplificado com o uso de fibras após a fissuração se iniciar. Os corpos de prova com fibras dispersas apresentaram uma rigidez 13% maior, além de uma resistência à primeira fissura superior. Com relação à fissuração, o número de fissuras quase dobrou, enquanto a abertura média das mesmas foi reduzida pela metade em função do efeito de “ponte” entre as faces das fissuras. Além disso, foi constatado uma carência de modelos que representam o espaçamento entre as fissuras para concreto reforçado por fibras de polipropileno armado com barras de GFRP.

Finalmente, os ensaios de flexão em quatro pontos apresentaram variações similares aos ensaios de tração direta, porém menos expressivas. Foi observado um ganho de rigidez de 13% e a abertura de fissuras foi reduzida com o uso de fibras. Além disso, a ductilidade das vigas teve um acréscimo de 28% com a adição de fibras de polipropileno. Comparando com os resultados obtidos em vigas armadas com barras de aço, foi observado um comportamento 245% mais rígido para vigas armadas com a mesma área de reforço longitudinal, e 71% menos resistente, quando compara-se com os resultados da viga de rigidez equivalente similar às vigas armadas com barras de GFRP. Também foi verificada uma ductilidade superior para o caso das vigas armadas com barras de aço. A resistência similar entre as vigas de mesma área de reforço, SF-P e SF-A(Aeq), pode ser explicada pelo fato da ruptura da primeira se governada pelo concreto comprimido, ou seja, as barras de GFRP não atingem sua capacidade máxima. Já a segunda, rompe devido o reforço tracionado, resultando em escoamento das barras de aço. Conforme já ressaltado, essas observações evidenciam o fato do material possuir características específicas, necessitando de um olhar diferenciado em condições de projeto.

Avaliando a fissuração nos ensaios de flexão em quatro pontos foi possível observar um comportamento 20% mais rígido, o que resultou em fissuras menores quando as fibras de polipropileno foram adicionadas. Além disso, não foi observado o fenômeno de crack localization, observado nas vigas armadas com aço, quando barras de GFRP são utilizadas como reforço.

Conforme mencionado na Seção 4.1.3, acredita-se que as barras utilizadas nos ensaios estruturais tenham uma fração volumétrica de fibras mais baixa, compatível com a das amostras de barras 1, 2 e 5 (Figura 38-a), com um módulo de elasticidade mais baixo. Considerando apenas as referidas amostras, o módulo ficaria aproximadamente $41 \pm 1,8$ GPa e o resultado do modelo se aproxima do experimental, conforme mostrado na Figura 62.

O modelo analítico proposto para o comportamento momento-curvatura não apresentou resultados satisfatórios quando comparado aos resultados experimentais, o que confirma o que foi mencionado na seção 4.1.3. Uma parcela dos resultados obtidos nos ensaios de tração direta nas barras de GFRP (P3, P4 e P6) possuía uma fração volumétrica de fibras superior às demais barras usadas para os ensaios estruturais e, conseqüentemente, apresentaram um módulo de elasticidade acima da média. Entretanto, este comportamento se aproxima dos resultados experimentais quando utilizado a média obtidas através das barras P1, P2 e P5 (Figura 62). Além disso, diferenças entre o comportamento observado no modelo analítico e o no resultado experimental podem estar relacionadas à curva parábola-retângulo adotada para o concreto comprimido e a variações intrínsecas dos materiais. A verificação da rigidez da barra se faz necessária para validar a comparação entre o modelo analítico e experimental.

Sendo assim, a solução proposta nesta pesquisa de utilizar 1% de fibras de polipropileno dispersas se mostrou eficaz ao seu objetivo de melhorar o comportamento de fissuração, a rigidez e a ductilidade de elementos de concreto armado por barras de GFRP.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de melhorar a compreensão de estrutura de concreto reforçadas por barras de GFRP e propor novas alternativas para solucionar os problemas relacionados ao seu uso, algumas sugestões são apresentadas a seguir:

- Avaliar o efeito de fluência em elementos de concreto reforçado por fibras de PP e armados por barras de GFRP.

- Avaliar o comportamento de vigas de concreto reforçado por fibras de PP e armado por barras de GFRP com ruptura governada pelos esforços cortantes.
- Avaliar o comportamento de concreto reforçado com fibras de PP armado com barras de GFRP sujeito a carregamentos cíclicos.
- Variar as frações volumétricas de fibras de polipropileno em elementos de concreto armado com barras de GFRP.
- Utilizar outros tipos de fibras, podendo ser um reforço híbrido, explorando uma ruptura dúctil do concreto comprimido à flexão.
- Realizar uma análise mais detalhada com novos modelos do comportamento da ligação concreto-GFRP para o ensaio de arrancamento proposto, variando o comprimento da ligação entre os materiais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NANNI, A.; BAKIS, C. E.; BOOTHBY, T. E. **Test methods for FRP-concrete systems subjected to mechanical loads: State of the art review.** Journal of Reinforced Plastics and Composites, v. 14, n. 6, p. 524-558, 1995..
- [2] OLIVEIRA, L.; SOUZA, R.; TEIXEIRA, B., **Utilização de armaduras não metálicas no Brasil.** Rio de Janeiro: X Congresso de pontes e estruturas
- [3] WANG, W; GOORANORIMI, O; MYERS, J. J., and NANNI A. **Microstructure and Mechanical Property Behavior of FRP Reinforcement Autopsied from Bridge Structures Subjected to In Situ Exposure.** International Congress on Polymers in Concrete. Springer, Cham, 2018. p. 585-591..
- [4] FIGUEIREDO, A; TANESI, J.; NINCE A **Concreto com fibras de polipropileno (CFP)** Téchné, v.10, n 66, p. 48 - 51, 2002.
- [5] KALIFA, P.; CHENE, G.; GALLE, C. **High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: From spalling to microstructure.** Cement and concrete research, v. 31, n. 10, p. 1487-1499, 2001.
- [6] HULL, D.; CLYNE, T. W. **An introduction to composite materials**, vol. 1. Cambridge university press, pp. 1–320, 1996.
- [7] CHAWLA, K. **Composite materials: science and engineering.** Springer Science & Business Media, 2012
- [8] VAN MIER, J. G. M.; VERVUURT, A. **Test methods and modelling for determining the mechanical properties of the ITZ in concrete.** RILEM REPORT, p. 19-52, 1999.
- [9] NEŞER, G. **Polymer based composites in marine use: history and future trends.** Procedia engineering, v. 194, p. 19-24, 2017.
- [10] NANNI, A.; DE LUCA, A.; ZADEH, H. J. **Reinforced concrete with FRP bars: mechanics and design.** CRC Press, 2014
- [11] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. COMMITTEE 440. **Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars: ACI 440.1 R-06**
- [12] BAKIS, C. E.; BANK, L. C.; BROWN, V.; COSENZA, E.; DAVALOS, J. F.; LESKO, J. J.; MACHIDA, A.; RIZKALLA, S. H.; TRIANTAFILLOU,

- T. C. **Fiber-reinforced polymer composites for construction—State-of-the-art review.** v. 6, n. 2, p. 73-87, 2002.
- [13] SÁ, M. F., GOMES, A. M., CORREIA, J. R., & SILVESTRE, N. **Creep behavior of pultruded GFRP elements - Part 1: Literature review and experimental study** *Composite Structures*, v. 93, n. 10, p. 2450-2459, 2011.
- [14] KASSEM, C.; FARGHALY, A. S.; BENMOKRANE, B. **Evaluation of flexural behavior and serviceability performance of concrete beams reinforced with FRP bars.** *Journal of composites for construction*, v. 15, n. 5, p. 682-695, 2011
- [15] ROBERT, M.; BENMOKRANE, B. **Behavior of GFRP reinforcing bars subjected to extreme temperatures.** *Journal of Composites for Construction*, v. 14, n. 4, p. 353-360, 2009.
- [16] MICELLI, F.; NANNI, A. **Durability of FRP rods for concrete structures.** *Construction and Building materials*, v. 18, n. 7, p. 491-503, 2004.
- [17] TAVARES, D. H.; GIONGO, J. S.; PAULTRE, P. **Behavior of reinforced concrete beams reinforced with GFRP bars.** *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 1, n. 3, p. 285-295, 2008.
- [18] ROBERT, M.; BENMOKRANE, B. **Combined effects of saline solution and moist concrete on long-term durability of GFRP reinforcing bars.** *Construction and Building Materials*, v. 38, p. 274-284, 2013.
- [19] BERARDI, V. P.; PERRELLA, M.; FEO, L.; CRICRÌ, G. **Creep behavior of GFRP laminates and their phases: experimental investigation and analytical modeling.** *Composites Part B: Engineering*, v. 122, p. 136-144, 2017.
- [20] ASCIONE, L.; BERARDI, V. P.; D'APONTE, A. **Creep phenomena in FRP materials.** *Mechanics Research Communications*, v. 43, p. 15-21, 2012.
- [21] BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites.** CRC Press, 2014
- [22] DAS, C. S.; DEY, T.; DANDAPAT, R.; MUKHARJEE, B. B.; KUMAR, J. **Performance evaluation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 189, p. 649-659, 2018.

- [23] NAAMAN, A. **Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites.** Journal of advanced concrete technology, v. 1, n. 3, p. 241-252, 2003
- [24] BENTUR, A.; MINDESS, S.; BANTHIA, N. **The interfacial transition zone in fibre reinforced cement and concrete.** RILEM REPORT, p. 89-112, 1999.
- [25] SILVEIRA, P. **Estudo do concreto reforçado com fibras de aço e sua aplicação em dormentes ferroviários.** Rio de Janeiro, 2018. Dissertação de mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [26] CASTOLDI, R. **Propriedades mecânicas e durabilidade de concretos reforçados com fibras de polipropileno e sisal.** Rio de Janeiro, 2018. Dissertação de mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
- [27] FANELLA, D.; NAAMAN, A. **Stress-strain properties of fiber reinforced mortar in compression.** Journal of the American Concrete Institute, v. 82, n. 4, p. 475-483, 1985.
- [28] CAO, Q.; CHENG, Y.; CAO, M.; GAO, Q. **Workability, strength and shrinkage of fiber reinforced expansive self-consolidating concrete.** Construction and Building Materials, v. 131, p. 178-185, 2017.
- [29] ASLANI, Farhad; NEJADI, Shami. **Creep and shrinkage of self-compacting concrete with and without fibers.** Journal of Advanced Concrete Technology, v. 11, n. 10, p. 251-265, 2013.
- [30] HE, X. B.; YAN, B., GU, J. Y., & SHEN, Q **Combined impacts of polypropylene fibres on workability, strength and permeability of SCC.** Magazine of Concrete Research, v. 66, n. 3, p. 127-140, 2014.
- [31] MASTALI, M.; DALVAND, A.; SATTARIFARD, A. R.; ABDOLLAHNEJAD, Z.; ILLIKAINEN, M. **Characterization and optimization of hardened properties of self-consolidating concrete incorporating recycled steel, industrial steel, polypropylene and hybrid fibers.** Composites Part B: Engineering, v. 151, p. 186-200, 2018.
- [32] AKÇA, K. R.; ÇAKIR, Ö.; IPEK, M. **Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates.** Construction and Building Materials, v. 98, p. 620-630, 2015.
- [33] DE ALENCAR MONTEIRO, V. M.; LIMA, L. R.; DE ANDRADE SILVA, F. **On the mechanical behavior of polypropylene, steel and hybrid fiber**

- reinforced self-consolidating concrete.** Construction and Building Materials, v. 188, p. 280-291, 2018.
- [34] COSENZA, E.; MANFREDI, G.; REALFONZO, R. **Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete.** Journal of composites for construction, v. 1, n. 2, p. 40-51, 1997.
- [35] NANNI, A. **Flexural behavior and design of RC members using FRP reinforcement.** Journal of structural engineering, v. 119, n. 11, p. 3344-3359, 1993.
- [36] DING, Y.; NING, X.; ZHANG, Y.; PACHECO-TORGAL, F.; AGUIAR, J. B. **Fibres for enhancing of the bond capacity between GFRP rebar and concrete.** Construction and Building Materials, v. 51, p. 303-312, 2014.
- [37] CHAALLAL, O.; BENMOKRANE, B. **Pullout and bond of glass-fibre rods embedded in concrete and cement grout.** Materials and structures, v. 26, n. 3, p. 167-175, 1993.
- [38] ISLAM, S.; AFEFY, H. M.; SENNAH, K.; AZIMI, H. **Bond characteristics of straight-and headed-end, ribbed-surface, GFRP bars embedded in high-strength concrete.** Construction and Building Materials, v. 83, p. 283-298, 2015.
- [39] MALVAR, L. J. **Bond stress-slip characteristics of FRP rebars.** Naval Facilities Engineering Service Center Port Hueneme CA, 1994.
- [40] CHOI, E.; KIM, D.; PARK, K. **Effect of confining pressure due to external jacket of steel plate or shape memory alloy wire on bond behavior between concrete and steel reinforcing bars.** Journal of nanoscience and nanotechnology, v. 14, n. 12, p. 9657-9661, 2014.
- [41] TASTANI, S. P.; PANTAZOPOULOU, S. J. **Bond of GFRP bars in concrete: Experimental study and analytical interpretation.** Journal of composites for construction, v. 10, n. 5, p. 381-391, 2006.
- [42] AIELLO, M.; LEONE, M.; PECCE, M. **Bond performances of FRP rebars-reinforced concrete.** Journal of materials in civil engineering, v. 19, n. 3, p. 205-213, 2007.
- [43] VELJKOVIC, A.; CARVELLI, V.; HAFFKE, M. M.; PAHN, M.. **Concrete cover effect on the bond of GFRP bar and concrete under static loading.** Composites Part B: Engineering, v. 124, p. 40-53, 2017.
- [44] TAERWE, L. **Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete**

Structures: Proceedings of the Second International RILEM Symposium. CRC Press, 2014

- [45] YAN, F.; LIN, Z. **Bond durability assessment and long-term degradation prediction for GFRP bars to fiber-reinforced concrete under saline solutions.** Composite Structures, v. 161, p. 393-406, 2017.
- [46] CHOI, Yun Cheol. **Bond Characteristics between ECC (Engineered Cementitious Composites) and GFRP Rebars.** In: Advanced Materials Research. Trans Tech Publications, 2013. p. 1010-1013.
- [47] RILEM-FIP-CEB. **Bond test for reinforcing steel: 1-Beam test (7-II-28 D). 2-Pullout test (7-II-128): Tentative recommendations.** RILEM Journal Materials and Structures, v. 6, n. 32, 1973. .
- [48] KIM, B.; LEE, J. Y. **Resistance of interfacial debonding failure of GFRP bars embedded in concrete reinforced with structural fibers under cycling loads.** Composites Part B: Engineering, v. 156, p. 201-211, 2019.
- [49] YAN, F.; LIN, Z.; ZHANG, D.; GAO, Z.; LI, M. **Experimental study on bond durability of glass fiber reinforced polymer bars in concrete exposed to harsh environmental agents: freeze-thaw cycles and alkaline-saline solution.** Composites Part B: Engineering, v. 116, p. 406-421, 2017.
- [50] BISCHOFF, P.; PAIXAO, R. **Tension stiffening and cracking of concrete reinforced with glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars.** Canadian Journal of Civil Engineering, v. 31, n. 4, p. 579-588, 2004.
- [51] MACGREGOR, J. G. et al. **Reinforced concrete: Mechanics and design,** Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997.
- [52] MÖRSCH, E. **Concrete-Steel Construction,** 3 ed. Zurich: The Engineering news publishing company, 1909. 368p.
- [53] WANG, H.; BELARBI, A. **Ductility characteristics of fiber-reinforced-concrete beams reinforced with FRP rebars,** Construction and Building Materials, v. 25, n. 5, p. 2391-2401, 2011.
- [54] KHARAL, Z.; SHEIKH, S. **Tension Stiffening and Cracking Behavior of Glass Fiber-Reinforced Polymer-Reinforced Concrete.** ACI Structural Journal, v. 114, n. 2, 2017.
- [55] SOORIYAARACHCHI, H.; PILAKOUTAS, K.; BYARS, E. **Tension stiffening behavior of GFRP-reinforced concrete.** Special Publication, v. 230, p. 975-990, 2005.

- [56] CEB-FIP, CEBFIP. **Model code 2010**. Comite Euro-International du beton, 2010.
- [57] BISCHOFF, P. H. **Tension stiffening and cracking of steel fiber-reinforced concrete**, Journal of materials in civil engineering, v. 15, n. 2, p. 174-182, 2003.
- [58] DELUCE, J. R.; VECCHIO, F. J. **Cracking Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Members Containing Conventional Reinforcement**. ACI Structural Journal, v. 110, n. 3, 2013.
- [59] MORENO, Daniel M. et al. **Tension stiffening in reinforced high performance fiber reinforced cement-based composites**, Cement and Concrete Composites, v. 50, p. 36-46, 2014.
- [60] BAENA, M. et al. **Analysis of cracking behaviour and tension stiffening in FRP reinforced concrete tensile elements**. Composites Part B: Engineering, v. 45, n. 1, p. 1360-1367, 2013.
- [61] DELUCE, Jordon R.; LEE, Seong-Cheol; VECCHIO, Frank J. **Crack model for steel fiber-reinforced concrete members containing conventional reinforcement**. ACI Structural Journal, v. 111, n. 1, p. 93, 2014.
- [62] VANDEWALLE, L. **RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete**. Materials and structures, v. 33, n. 225, p. 3-6, 2000.
- [63] GRIBNIAK, Viktor et al. **Comparative analysis of deformations and tension-stiffening in concrete beams reinforced with GFRP or steel bars and fibers**. Composites Part B: Engineering, v. 50, p. 158-170, 2013.
- [64] CANEIRO, J. A. H.; RIVAS, H. W.; PÉREZ, IdCD. **Empleo de Barras y Telas de Mallas de PRF como Refuerzo del Hormigón y el Ferrocemento**. Diseño Estructural, p. 200, 2015.
- [65] JAEGER, L. G.; MUFTI, A. A.; TADROS, G. **The concept of the overall performance factor in rectangular-section reinforced concrete members**. In: Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Sapporo, Japan. 1997. p. 551-559.
- [66] DANCYGIER, A. N.; BERKOVER, E. **Cracking localization and reduced ductility in fiber-reinforced concrete beams with low reinforcement ratios**. Engineering Structures, v. 111, p. 411-424, 2016

- [67] NAYAL, R.; RASHEED, H. A. **Tension stiffening model for concrete beams reinforced with steel and FRP bars**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 18, n. 6, p. 831-841, 2006.
- [68] GRIBNIAK, Viktor et al. **An experimental study on cracking and deformations of tensile concrete elements reinforced with multiple gfrp bars**. Composite Structures, 2018.
- [69] JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, **Proceedings of the Utilization of FRP-Rods for Concrete Reinforcement**. 1992.
- [70] CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION et al. **Specification for Fibre-Reinforced Polymers,(CAN/CSA S807-10)**. Canadian Standards Association, Mississauga, Ont, 2010.
- [71] JU, M.; PARK, Y.; PARK, C. **Cracking control comparison in the specifications of serviceability in cracking for FRP reinforced concrete beams**. Composite Structures, v. 182, p. 674-684, 2017.
- [72] SUBCOMMITTEE, A. S. T. M. **A01. 05., 2012. Standard Test Method for Evaluating Bond of Seven-Wire Steel Prestressing Strand**. ASTM A1081/A1081M-15. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [73] NBR, ABNT. 6118: **Projeto de Estruturas de Concreto**. Rio de Janeiro, 2014.