



Rebecca Mansur de Castro Silva

**Comportamento mecânico de concretos têxteis
reforçados com tecido de carbono: aspectos materiais e
estruturais**

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. Flávio de Andrade Silva

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2018



Rebecca Mansur de Castro Silva

**Comportamento mecânico de concretos têxteis
reforçados com tecido de carbono: aspectos materiais e
estruturais**

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. Flávio de Andrade Silva

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Jose Roberto Moraes d’Almeida

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC-Rio

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

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

Rebecca Mansur de Castro Silva

Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal Fluminense – UFF – em 2014. Principais áreas de interesse: Materiais compósitos, concretos têxteis.

Ficha Catalográfica

Silva, Rebecca Mansur de

Comportamento mecânico de concretos têxteis reforçados com tecido de carbono: aspectos materiais e estruturais / Rebecca Mansur de Castro Silva; orientador: Flávio de Andrade Silva. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2018.

v. 140 f.: il. color; 29,7 cm.

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Compósitos. 3. Concreto têxtil. 4. Tecido de carbono. 5. Comportamento estrutural. I. Silva, Flávio de Andrade. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. III. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Ao meu orientador, professor Flávio, agradeço por me apresentar o mundo da pesquisa. Sou grata pelo incentivo, pelas sugestões e conhecimento compartilhados. Obrigada por acreditar e confiar em mim e no meu trabalho.

Agradeço também à equipe do laboratório de estruturas (LEM-Dec) da PUC-Rio. Aos técnicos: Euclides, José Nilson, Rogério, Marques, Bruno e Carlos meu muito obrigada. Sem a ajuda e experiência de vocês a realização desta pesquisa teria sido muito mais complicada. Aos estagiários e alunos de iniciação científica que passaram pelo laboratório e ajudaram no dia-a-dia do laboratório.

Aos meus pais, Danielle e Miguel, agradeço por seu amor incondicional. Obrigada por sempre acreditarem em mim e incentivarem a busca pelos meus sonhos, mesmo as vezes não entendendo completamente o que e o porquê. Aos meus irmãos, Leonardo e Antônio Miguel, obrigada por seu amor e pela certeza de que tenho dois amigos para vida toda.

Agradeço a minha família por entenderem a minha ausência nas reuniões familiares em alguns momentos e por sempre comemorarem e torcerem pelas minhas conquistas.

Ao meu namorado Bernardo, agradeço por acreditar mais em mim do que eu mesma. Obrigada por todo o seu amor. Obrigada por me fazer rir nos momentos que eu mais precisava e por entender a minha ausência durante alguns (vários) fins de semana. Não tenho palavras suficientes para agradecer o seu apoio.

A amizade torna a vida mais leve. Por isso agradeço aos amigos que fiz ao longo destes dois anos de mestrado. Vocês com certeza tornaram essa experiência muito mais significativa e divertida para mim. Obrigada por compartilhar as horas de estudos, os conhecimentos compartilhados e principalmente obrigada pela

companhia nos almoços, pelas conversas na copa do laboratório e pelos churrascos. Em especial agradeço a Ana Carolina, Daiana, Letícia e Raylane por serem a minha família “puquiana”. Vocês estiveram presentes comigo em todas as etapas deste mestrado. Compartilhamos desesperos e alegrias, acredito que muito mais da segunda do que do primeiro. Mesmo que às vezes eu não acreditasse em mim, vocês acreditaram e me incentivaram a continuar, porque no final “dá tudo certo”. Não importa onde a gente esteja no futuro, sei que a amizade e o carinho de vocês eu vou ter para sempre.

Não poderia deixar de agradecer as minhas amigas de longa data, que já considero parte da minha família. São as irmãs que a vida me deu. Obrigada Ana Claudia, Carolina, Caroline, Gabriela e Mariana. Mesmo de longe e às vezes sem entender o que eu faço, vocês comemoram comigo cada conquista. Sei que posso contar com vocês para tudo.

À Capes e ao CNPq pelo suporte financeiro para a realização desta pesquisa.

Resumo

Mansur de Castro Silva, Rebecca; de Andrade Silva, Flávio (Orientador). **Comportamento mecânico de concretos têxteis reforçados com tecido de carbono: aspectos materiais e estruturais.** Rio de Janeiro, 2018. 140p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A busca por novos materiais que possibilitem a construção de estruturas mais esbeltas, leves e de menor custo vem crescendo nos últimos anos. Concretos têxteis reforçados com tecido de carbono aparecem como uma solução interessante capaz de atingir resultados mecânicos elevados. O objetivo desta pesquisa foi avaliar o comportamento mecânico de concretos têxteis reforçados com tecidos de carbono no âmbito estrutural e material. O comportamento do material compósito foi avaliado por meio de ensaios de tração direta, flexão e arrancamento. As variáveis utilizadas foram: tipo do tecido de carbono (flexível e rígido), número de camadas (1 ou 2), e adição ou não de *coating* de resina epóxi e areia. Os compósitos reforçados com tecido rígido apresentaram desempenho mecânico superior. A utilização do *coating* gerou melhores resultados para ambos os tecidos, ainda que sua influência tenha sido mais significativa na impregnação de tecidos flexíveis. Estas superioridades foram comprovadas por meio dos resultados de arrancamento. O aumento da fração volumétrica também gerou uma melhora no desempenho final do compósito. Além disso, foi realizada uma análise do comportamento do concreto têxtil estrutural por meio de vigas curtas submetidas a flexão. Utilizou-se uma matriz autoadensável, com e sem a incorporação de fibras curtas de aço. Novamente, foram utilizados os dois tipos de tecidos de carbono na direção longitudinal. A influência da utilização de reforço têxtil na direção transversal também foi analisada. As vigas reforçadas com tecido rígido apresentaram maior rigidez para pequenas deflexões. A incorporação de fibras curtas de aço aumentou as cargas de primeira fissura e última, ainda que não tenham impedido totalmente a ruptura por cisalhamento. A adição do reforço têxtil transversal alterou o modo de ruptura para flexão, e elevou a carga última.

Palavras-chave

Compósitos; concreto têxtil; tecido de carbono; comportamento estrutural.

Abstract

Mansur de Castro Silva, Rebecca; de Andrade Silva, Flávio (Advisor). **Mechanical behavior of carbon textile reinforced concrete: materials and structural aspects.** Rio de Janeiro, 2018. 140p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The search for new materials that allow the construction of thinner, lighter and less expensive structures has grown considerably in the last years. Carbon textile reinforced concretes appear as interesting solutions capable of reaching higher mechanical results. The aim of this research was to evaluate the mechanical behavior of carbon textile reinforced concretes regarding their material and structural aspects. The behavior of the composite was evaluated through direct tensile, bending and pullout tests. The variables used were: the type of fabric (flexible and rigid), number of reinforcement layers (1 or 2), and the impregnation or not with a coating made with epoxy resin and sand. The composites reinforced with the rigid fabric showed superior mechanical performance. The use of the coating provided better results for both textiles, even though its influence appeared to be most significant in the impregnation of flexible fabrics. These superiorities were confirmed by pullout results. The increment of reinforcement layers also resulted in an improvement in the composite final behavior. Furthermore, an analysis of structural textile reinforced concrete was performed with short beams subjected to bending tests. A self-consolidating concrete with and without the incorporation of short steel fibers was used as matrix. Once again, the carbon fabrics were used as reinforcement in the longitudinal direction. The influence of the textile reinforcement in the transversal direction was also analyzed. The beams reinforced with rigid fabrics showed higher stiffness in small deflections. The incorporation of short steel fibers enhanced the first crack and ultimate loads, even though they were not able to prevent the shear failure of the beams. The addition of the transversal textile reinforcement modified the failure mode to a flexural one, and increased the ultimate load.

Keywords

Composites; textile reinforced concrete; carbon fabric; structural behavior.

Sumário

1 Introdução	21
1.1. Motivação	21
1.2. Objetivos	22
1.3. Organização da dissertação	22
2 Revisão Bibliográfica	24
2.1. Concreto reforçado com fibra	24
2.2. Uso de tecidos como reforço em compósitos de matriz cimentícia	26
2.3. Tecido de fibra de carbono	29
2.4. Interface reforço-matriz de concretos têxteis	31
2.5. Comportamento mecânico de concretos têxteis	33
2.6. Aplicações do concreto têxtil	38
2.6.1. Uso do concreto têxtil para reparo e reforço externo de elementos estruturais	38
2.6.2. Uso do concreto têxtil para a construção de novos elementos	41
3 Desenvolvimento e caracterização do compósito	44
3.1. Introdução	44
3.2. Materiais utilizados	44
3.2.1. Matriz cimentícia	44
3.2.2. Tecido de fibra de carbono	52
3.3. Fabricação dos compósitos	56
3.4. Comportamento mecânico	62
3.4.1. Ensaio de tração direta	63
3.4.2. Ensaio de flexão	66
3.4.3. Ensaio de arrancamento	67
3.5. Resultados e discussão	68
3.5.1. Ensaio de tração direta	68
3.5.2. Ensaio de flexão	80
3.5.3. Ensaio de arrancamento	93
3.6. Conclusão	97

4	Aplicação estrutural do concreto reforçado com tecido de fibra de carbono	99
4.1.	Introdução	99
4.2.	Materiais utilizados	99
4.2.1.	Matriz cimentícia	99
4.2.2.	Tecido de fibra de carbono	101
4.3.	Fabricação do elemento estrutural	101
4.4.	Comportamento mecânico	105
4.4.1.	Descrição do ensaio	105
4.4.2.	Resultados e discussão	106
4.5.	Conclusão	117
5	Conclusões e trabalhos futuros	119
5.1.	Conclusões	119
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros	121
6	Referências bibliográficas	122
	Apêndice A	130
	Apêndice B	137

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Curvas característica do comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras (a) na tração; (b) na flexão (Adaptada de [21]).....	26
Figura 2.2 – Exemplos de tecido (a) <i>woven</i> ; (b) <i>knitted</i> (adaptada de [24]).....	28
Figura 2.3 – Esquema da curva de arrancamento de diferentes tipos de tecido (adaptada de [1]).....	32
Figura 2.4 – Curva tensão <i>versus</i> deformação característica de um concreto têxtil (adaptada de [1]).....	34
Figura 3.1 – Molde tronco cônico usado para ensaio de espalhamento. Dimensões em cm.	47
Figura 3.2 – Etapas do ensaio de espalhamento: (a) argamassa sendo colocada no molde; (b) molde preenchido; (c) medição do primeiro diâmetro; (d) medição do segundo.	47
Figura 3.3 - Variação do espalhamento da matriz em função do teor de superplastificante adicionado.	48
Figura 3.4 – Arranjo experimental do ensaio de compressão. (a) Apenas para obtenção da resistência; (b) para obtenção da curva tensão <i>versus</i> deformação.	49
Figura 3.5 – Evolução da resistência à compressão da matriz ao longo do tempo.....	50
Figura 3.6 – Curvas tensão de compressão <i>versus</i> deformação.	51
Figura 3.7 – Tecido de fibra de carbono (a) fornecido pela V.Fraas, em forma de rolo; (b) fornecido pela Solidian, em forma de folha.	52
Figura 3.8 – Dimensões da abertura de malha. (a) Tecido de carbono flexível; (b) Tecido de carbono rígido.	53
Figura 3.9 – Tecido de carbono flexível visto no microscópio estereoscópio. (a) Abertura de malha do tecido; (b) e (c) região de ligação entre os cordões das duas direções; (d) seção transversal de um cordão da trama.	55

Figura 3.10 – Tecido de carbono rígido visto no microscópio estereoscópio. (a) Abertura da malha do tecido; (b) região de ligação entre os cordões das duas direções; (c) filamentos de fibra de carbono que formam o cordão da trama; (d) seção transversal de um cordão da trama.	56
Figura 3.11 - Esquema da identificação dos corpos de prova.....	57
Figura 3.12 - Fabricação das placas.	57
Figura 3.13 – Fabricação das placas para ensaio de tração direta.	58
Figura 3.14 – Detalhe da seção transversal reduzida nos compósitos ensaiados à tração direta.	58
Figura 3.15 – Amostras embaladas em plástico filme curando em sala com temperatura controlada.	60
Figura 3.16 – Moldes de PVC e corpos de prova para ensaio de arrancamento moldados.....	61
Figura 3.17 – (a) Processo de aplicação do <i>coating</i> nos tecidos; (b) <i>coating</i> aplicado apenas nas extremidades.	62
Figura 3.18 – Arranjo experimental do ensaio de tração direta.....	63
Figura 3.19 – Torquímetros usados para montagem do arranjo experimental do ensaio de tração. (a) Torquímetro de estalo; (b) torquímetro de relógio com ponteiro de arraste.....	64
Figura 3.20 – Curva tensão <i>versus</i> deformação de uma amostra submetida a ensaio de tração direta cujas condições de contorno não estavam adequadas.	65
Figura 3.21 – Arranjo experimental do ensaio de flexão a quatro pontos.	67
Figura 3.22 – (a) Arranjo experimental do ensaio de arrancamento. (b) Arranjo experimental do ensaio de arrancamento em detalhe.....	68
Figura 3.23 – Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação características dos comportamentos mecânicos obtidos para os concretos têxteis reforçados com tecido de carbono.	69
Figura 3.24 – Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação dos compósitos reforçados com uma (C1F) e duas (C2F) camadas de tecido de carbono flexível.....	70

Figura 3.25 – Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação dos compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível (C1F), com <i>coating</i> (C1FAr) e com <i>coating</i> apenas nas extremidades (C1FArE).....	72
Figura 3.26 – Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação dos compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono flexível (C2F), com <i>coating</i> (C2FAr) e com <i>coating</i> apenas nas extremidades (C2FArE).....	72
Figura 3.27 – Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação dos compósitos reforçados com uma (C1R) e duas (C2R) camadas de tecido de carbono rígido.....	74
Figura 3.28 – Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação dos compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono rígido com urdume (C1R) e trama (C1RL) na direção do carregamento.....	75
Figura 3.29 – Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação dos compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono rígido (C1R), com <i>coating</i> (C1RAr) e com <i>coating</i> apenas nas extremidades (C1RArE).....	76
Figura 3.30 – Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação dos compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono rígido (C2R), com <i>coating</i> (C2RAr) e com <i>coating</i> apenas nas extremidades (C2RArE).....	76
Figura 3.31 – Curva tensão de tração <i>versus</i> deformação do compósito reforçado com duas camadas de tecido de carbono rígido com areia apenas nas extremidades (C2RArE) exemplificando o comportamento linear do material até níveis de tensão próximos à tensão máxima.....	78
Figura 3.32 – Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação dos compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível (C1F) e rígido (C1R).....	79
Figura 3.33 – Comparação dos valores de tensão de tração máxima encontradas neste trabalho com resultados disponíveis na literatura. ...	79
Figura 3.34 – Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação de concretos reforçados com diferentes tipos de tecidos.....	80

Figura 3.35 – Curvas tensão equivalente na flexão <i>versus</i> deflexão características dos comportamentos mecânicos obtidos para os concretos têxteis reforçados com tecido de carbono.	81
Figura 3.36 – Curvas tensão equivalente na flexão <i>versus</i> deflexão dos compósitos reforçados com uma (C1F) e duas (C2F) camadas de tecido de carbono flexível.....	82
Figura 3.37 – Curvas tensão equivalente na flexão <i>versus</i> deflexão dos compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível (C1F) e uma camada de tecido de carbono flexível impregnado com <i>coating</i> (C1FAr).	83
Figura 3.38 – Curvas tensão equivalente na flexão <i>versus</i> deflexão dos compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono flexível (C1F) e duas camadas de tecido de carbono flexível impregnado com <i>coating</i> (C1FAr).	84
Figura 3.39 – Curvas tensão equivalente na flexão <i>versus</i> deflexão dos compósitos reforçados com uma (C1R) e duas (C2R) camadas de tecido de carbono rígido.	85
Figura 3.40 – Curvas tensão equivalente na flexão <i>versus</i> deflexão dos compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono rígido (C1R) e uma camada de tecido de carbono rígido impregnado com <i>coating</i> (C1RAR).	86
Figura 3.41 – Curvas tensão equivalente na flexão <i>versus</i> deflexão dos compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono rígido (C2R) e duas camadas de tecido de carbono rígido impregnado com <i>coating</i> (C2RAR).	86
Figura 3.42 – Curvas tensão equivalente na flexão <i>versus</i> deflexão dos compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível (C1F) e rígido (C1R).	88
Figura 3.43 - Amostra C1RAR submetida à flexão durante o ensaio.	88
Figura 3.44 – Curvas tensão equivalente na flexão <i>versus</i> deformação. (a) de compressão; (b) de tração.	90
Figura 3.45 – Curvas tensão equivalente na flexão <i>versus</i> deformação. (a) de compressão; (b) de tração.	91

Figura 3.46 – Variação da altura da linha neutra ao longo da deformação de tração. (a) Comparação entre compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono flexível impregnado (C2F _{Ar}) e não (C2F) com <i>coating</i> . (b) Comparação entre compósitos reforçados com tecido de carbono flexível (C2F) e rígido (C2R).....	93
Figura 3.47 – Curvas típicas de força <i>versus</i> deslizamento. (a) Comparação entre tecido de carbono flexível e tecido de carbono rígido. (b) Comparação entre tecido de carbono flexível com e sem adição de <i>coating</i> . (c) Comparação entre tecido de carbono rígido com e sem adição de <i>coating</i>	95
Figura 4.1 – Fibra de aço HE 45/30 utilizada.	100
Figura 4.2 – Processo de moldagem das vigas V1 a V4.....	103
Figura 4.3 – Armadura de tecido de fibra de carbono flexível. (a) Vista lateral. (b) Vista frontal.	104
Figura 4.4 – Falhas devido à concretagem da viga V5.	105
Figura 4.5 – (a) Arranjo experimental do ensaio de flexão. (b) Esquema do arranjo experimental do ensaio de flexão, medidas em cm (Adaptada de [73]).....	106
Figura 4.6 – (a)-(b) Curvas força <i>versus</i> deflexão das vigas reforçada com tecido de carbono flexível (V1) e rígido (V2).....	108
Figura 4.7 – (a)-(b) Curvas força <i>versus</i> deflexão das vigas reforçadas com tecido de carbono flexível (V3) e rígido (V4) com 2% de fibras curtas de aço incorporadas na matriz.	109
Figura 4.8 – Curvas força <i>versus</i> deflexão das vigas reforçadas com tecido de carbono flexível sem (V1) e com 2% de fibras curtas de aço incorporadas na matriz (V3).	110
Figura 4.9 – Curvas força <i>versus</i> deflexão das vigas reforçadas com tecido de carbono rígido sem (V2) e com 2% de fibras curtas de aço incorporadas na matriz (V4).	111
Figura 4.10 – Curvas força <i>versus</i> deflexão das vigas reforçadas com tecido de carbono flexível nas direções longitudinal (V3) e longitudinal e transversal (V5) com 2% de fibras curtas de aço incorporadas na matriz.	111

Figura 4.11 – Modo de ruptura da viga reforçada com tecido flexível (V1).	112
Figura 4.12 – Modo de ruptura da viga reforçada com tecido rígido (V2).	112
Figura 4.13 – Modo de ruptura da viga reforçada com tecido flexível e 2% de fibra de aço discreta incorporada na matriz (V3).....	112
Figura 4.14 – Modo de ruptura da viga reforçada com tecido rígido e 2% de fibra de aço discreta incorporada na matriz (V4).....	113
Figura 4.15 – (a) Modo de ruptura; (b) detalhe da vista da face inferior da viga reforçada com tecido flexível nas direções longitudinal e transversal (V5) e 2% de fibra de aço discreta incorporada na matriz.....	113
Figura 4.16 – Curvas força <i>versus</i> deflexão das vigas de concreto reforçado com tecido de fibra de carbono e vigas de concreto armado, sem adição de fibras curtas de aço na matriz.	115
Figura 4.17 – Curvas força <i>versus</i> deflexão das vigas de concreto reforçado com tecido de fibra de carbono e vigas de concreto armado, com adição de fibras curtas de aço na matriz.	115
Figura A.1 - Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível.	130
Figura A.2 - Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível impregnado com <i>coating</i>	130
Figura A.3 - Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível impregnado com <i>coating</i> apenas extremidades.....	131
Figura A.4 - Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono flexível.	131
Figura A.5 - Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono flexível impregnado com <i>coating</i>	132

Figura A.6 - Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono flexível impregnado com <i>coating</i> apenas nas extremidades.	132
Figura A.7 - Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono rígido.	133
Figura A.8 - Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono rígido com a trama na direção do carregamento.	133
Figura A.9 - Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono rígido impregnado com <i>coating</i>	134
Figura A.10 - Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono rígido impregnado com <i>coating</i> apenas nas extremidades.	134
Figura A.11 - Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono rígido.	135
Figura A.12 - Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono rígido impregnado com <i>coating</i>	135
Figura A.13 - Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono rígido impregnado com <i>coating</i> apenas nas extremidades.	136
Figura B.1 - Curvas tensão equivalente na flexão <i>versus</i> deflexão para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível.	137
Figura B.2 - Curvas tensão equivalente na flexão <i>versus</i> deflexão para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível impregnado com <i>coating</i>	137
Figura B.3 - Curvas tensão equivalente na flexão <i>versus</i> deflexão para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono flexível.	138

Figura B.4 - Curvas tensão equivalente na flexão <i>versus</i> deflexão para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono flexível impregnado com <i>coating</i>	138
Figura B.5 - Curvas tensão equivalente na flexão <i>versus</i> deflexão para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono rígido.	139
Figura B.6 - Curvas tensão equivalente na flexão <i>versus</i> deflexão para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono rígido impregnado com <i>coating</i>	139
Figura B.7 - Curvas tensão equivalente na flexão <i>versus</i> deflexão para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono rígido.	140
Figura B.8 - Curvas tensão equivalente na flexão <i>versus</i> deflexão para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono rígido impregnado com <i>coating</i>	140

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Resumos das propriedades mecânicas das fibras de carbono encontradas na literatura.....	30
Tabela 3.1 – Traço correspondente a 1 m ³ de matriz.....	45
Tabela 3.2 – Evolução da resistência à compressão da matriz.....	50
Tabela 3.3 – Resumo dos resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade da matriz aos 28 dias.	51
Tabela 3.4 – Área da seção transversal dos cordões do tecido de carbono.	53
Tabela 3.5 – Propriedades físicas e mecânicas dos tecidos de fibra de carbono. (<i>Fonte: V.Fraas e Solidian</i>).....	54
Tabela 3.6 – Espessura média para cada tipo de compósito ensaiado à flexão.	59
Tabela 3.7 – Espessura média para cada tipo de compósito ensaiado à tração.....	59
Tabela 3.8 – Resumo das condições de contorno de cada amostra ensaiada na tração direta.....	66
Tabela 3.9 – Resultados obtidos nos ensaios de tração direta para os compósitos reforçados com tecido de carbono flexível.	73
Tabela 3.10 – Resultados obtidos nos ensaios de tração direta para os compósitos reforçados com tecido de carbono rígido.	77
Tabela 3.11 – Resultados obtidos nos ensaios de flexão a quatro pontos para os compósitos reforçados com tecido de carbono flexível.	84
Tabela 3.12 – Resultados obtidos nos ensaios de flexão a quatro pontos para os compósitos reforçados com tecido de carbono rígido....	87
Tabela 3.13 – Resultados dos ensaios de arrancamento para os diferentes tipos de tecido de carbono.....	96
Tabela 4.1 – Traço do concreto autoadensável [73].	100
Tabela 4.2 – Propriedades da fibra de aço utilizada, segundo o fabricante.....	101
Tabela 4.3 – Propriedades mecânicas das matrizes [73].....	101

Tabela 4.4 – Resumo das vigas de concreto têxtil analisadas.....	102
Tabela 4.5 – Resultados obtidos nos ensaios de flexão para as vigas reforçadas com tecido de carbono flexível (V1) e rígido (V2) sem a incorporação de fibra de aço discreta na matriz; reforçadas com tecido de carbono flexível (V3) e rígido (V4) com a incorporação de 2% de fibra de aço discreta na matriz e reforçada com tecido de carbono flexível nas direções longitudinal e transversal (V5) com a incorporação de 2% de fibra de aço discreta na matriz.....	107
Tabela 4.6 – Força equivalente à deflexão de 4,4 mm e coeficiente de segurança das vigas de concreto têxtil	116

The mind that opens to a new idea never returns to its original size.
Albert Einstein

1

Introdução

1.1. Motivação

O desejo de se fazer estruturas cada vez mais esbeltas, leves e de menor custo tem impulsionado o estudo de novos materiais [1,2]. Dentre estes novos materiais, pode-se citar os compósitos de matriz cimentícia reforçada com fibras.

Os concretos reforçados com fibras podem ser usados para fins estruturais e não estruturais. As fibras adicionadas às matrizes cimentícias controlam a fissuração da matriz e alteram o comportamento mecânico do compósito após a formação da primeira fissura, melhorando a sua ductilidade [3]. Além disso, elas podem aumentar a resistência final e a rigidez do compósito [3,4].

A fração volumétrica e a orientação das fibras, assim como o tipo e a geometria, influenciam no comportamento mecânico do compósito [3]. Fibras contínuas e alinhadas à direção do carregamento melhoram o desempenho mecânico destes materiais [5,6]. As fibras fornecem um meio de transferir as tensões através das fissuras da matriz, aumentando assim a resistência do compósito [3]. O reforço contínuo passa a ser particularmente atrativo para o caso de elementos finos, sendo possível adequá-lo para elementos com diferentes geometrias [1,3].

O termo concreto reforçado com tecido surgiu no final dos anos 1990 [7]. Segundo Naaman [7], concreto reforçado com tecido, ou concreto têxtil, é um compósito de matriz cimentícia reforçado com múltiplas camadas de tecido 2D ou 3D. Os tecidos podem ser poliméricos, sintéticos, metálicos ou orgânicos.

As fibras de carbono são conhecidas pelo seu uso nas indústrias aeroespacial, nuclear, de bens esportivos, biomédica e automobilística [8]. Entretanto, devido as suas boas propriedades mecânicas [3,9–11] e de durabilidade [3,12–14] elas vêm se tornando extremamente atraentes na indústria da engenharia civil, como reforço de matrizes cimentícias.

O comportamento mecânico dos concretos têxteis depende das propriedades da matriz, do reforço e, principalmente, da interface entre estas duas fases. A aderência entre o reforço e a matriz é uma das principais características da interface [1].

A aderência de tecidos formados por cordões de multifilamentos de fibras, como é o caso dos tecidos de carbono, não é elevada [1,3]. Entretanto, existem meios de se melhorar a aderência entre o tecido e a matriz e, conseqüentemente, o comportamento mecânico do compósito [15–18].

Devido a seu elevado desempenho mecânico, os concretos têxteis podem ser usados para o reparo ou reforço de elementos estruturais já existentes de concreto armado ou outro material e para a construção de novos elementos, estruturais e não estruturais [19].

Desta forma, esta pesquisa se propõe a analisar o comportamento mecânico de concretos têxteis reforçados com tecido de carbono sob aspectos materiais e estruturais.

1.2. Objetivos

Esta pesquisa tem como um dos seus objetivos avaliar o comportamento mecânico de concretos têxteis reforçados com tecido de carbono. Foram consideradas como variáveis o tipo do tecido de carbono (flexível e rígido), o número de camadas de tecido (uma e duas) e a adição ou não de uma camada de *coating* feito com resina epóxi e areia. Os compósitos foram submetidos a ensaios de tração direta, flexão a quatro pontos e arrancamento.

Além disso, esta pesquisa analisa o comportamento mecânico do concreto reforçado com tecido de carbono quando em uma aplicação estrutural. Vigas curtas de concreto têxtil foram submetidas à flexão a quatro pontos.

1.3. Organização da dissertação

O Capítulo 1 traz a introdução e os objetivos da pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, contendo informações e resultados disponíveis na literatura sobre concretos reforçados com fibras, o uso

de tecidos como reforço de matrizes cimentícias, dando ênfase ao tecido de fibra de carbono, a interface entre o reforço têxtil e a matriz e o comportamento mecânico de concretos reforçados com tecido. A revisão bibliográfica também engloba as aplicações do concreto têxtil, abordando seu uso como reforço externo de elementos estruturais e para a construção de novos elementos.

O Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento e caracterização do concreto reforçado com tecido de fibra de carbono. Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados, o processo de fabricação dos compósitos e a metodologia dos ensaios realizados. Também é feita a análise dos resultados e estes são discutidos.

O Capítulo 4 apresenta o uso do concreto reforçado com tecido de fibra de carbono em uma aplicação estrutural. São apresentados os materiais utilizados, o processo de fabricação do elemento estrutural e a metodologia de ensaio. Os resultados obtidos são analisados e discutidos.

O Capítulo 5 traz as conclusões do trabalho e apresenta sugestões para pesquisas futuras que complementem este trabalho.

2

Revisão Bibliográfica

2.1.

Concreto reforçado com fibra

Um material diz-se compósito quando é constituído por duas ou mais fases diferentes, matriz e reforço. A combinação dessas fases pode originar um material com melhor desempenho [9]. A fase matriz é responsável por dar forma ao compósito, além de proteger e manter o reforço na posição correta [3]. Ela pode ser um metal, um polímero, uma cerâmica ou carbono. A fase dispersa ou reforço existe em diversas formas, como partículas, fibras, lâminas, dentre outras. Em geral, essa fase é responsável por gerar resistência e rigidez, podendo também aumentar a resistência à temperatura, corrosão e condutividade do compósito. O reforço pode ser colocado para melhorar todas ou apenas algumas destas propriedades. Os materiais compósitos podem ser classificados de acordo com o material que forma a matriz ou com a geometria do reforço [20].

O uso de fibras como reforço de materiais frágeis é um processo que remonta aos tempos antigos [3]. Segundo Herakovich [10], os egípcios, em 4000 a.C., já usavam materiais compósitos reforçados com fibras para a fabricação de papiros. Além disso, eles também usavam as fibras para fazer barcos, cestas e cordas. Em 1300 a.C., acredita-se que a palha começou a ser usada como reforço de tijolos feitos de lama [3,10].

De acordo com Herakovich [10], apenas a partir de 1960, os materiais compósitos reforçados com fibras passaram a ter seu potencial realmente explorado e estudado no âmbito da engenharia.

Segundo Bentur et al. [3] e Mobasher [11], o cimento amianto foi o primeiro material compósito de matriz cimentícia a ganhar popularidade em termos industriais, por volta do ano 1900. Os principais produtos feitos com o cimento amianto na indústria da construção civil eram revestimentos e telhas para telhados e chapas onduladas [11]. Durante as décadas de 1960 e 1970 ficou comprovado que as fibras de amianto apresentavam danos à saúde de quem as manipulava,

podendo levar ao desenvolvimento de câncer. Por esse motivo o uso desse material foi banido em alguns países [3].

Atualmente, existem inúmeros tipos de fibras que podem ser usadas como reforço de matrizes cimentícias, como por exemplo: fibras de aço, de vidro, naturais e de carbono. As propriedades, a eficácia e o custo dessas fibras variam consideravelmente [3].

As fibras se apresentam de duas maneiras: em forma de multifilamentos separados uns dos outros; ou agrupadas, formando feixes de filamentos. O arranjo do reforço fibroso pode se dar de duas formas: através do reforço discreto, que é feito com fibras curtas, geralmente menores que 50 mm; e através de reforço contínuo, feito com fibras longas [3].

Os concretos reforçados com fibras podem ser usados para fins estruturais e não estruturais. As fibras adicionadas às matrizes cimentícias controlam a fissuração da matriz e alteram o comportamento mecânico do compósito após a formação da primeira fissura, melhorando a sua ductilidade [3]. Além disso, elas podem aumentar a resistência final e a rigidez do compósito [4].

A fração volumétrica e a orientação do reforço, assim como o tipo e a geometria influenciam em como esse reforço irá contribuir para o comportamento mecânico do compósito [3,4]. Em compósitos nos quais a fração volumétrica é baixa, isto é, inferior a 1%, a principal função das fibras é reduzir a fissuração devido à retração [4]. Quando a fração volumétrica do reforço é de 1% a 2%, as fibras contribuem na melhora da resistência ao impacto e fadiga do compósito, propriedades que estão relacionadas à tenacidade do material [4]. Nos dois casos anteriores, o compósito apresenta comportamento *strain-softening*, na tração (Figura 2.1.a), e *deflection-softening*, na flexão (Figura 2.1.b). As fibras fornecem mecanismos de absorção de energia ao compósito através do seu deslocamento e/ou arrancamento da matriz. A curva tensão *versus* deformação deste tipo de material é descendente após a primeira fissura da matriz [3]. Em compósitos com altas frações volumétricas, acima de 2%, de reforço, as fibras garantem, possivelmente, ao material um comportamento *strain-hardening*, na tração (Figura 2.1.a), e *deflection-hardening*, na flexão (Figura 2.1.b) [4]. As fibras fornecem um meio de transferir os esforços através das fissuras da matriz, aumentando assim a resistência do compósito. A curva tensão *versus* deformação neste caso é ascendente após a primeira fissura da matriz [3].

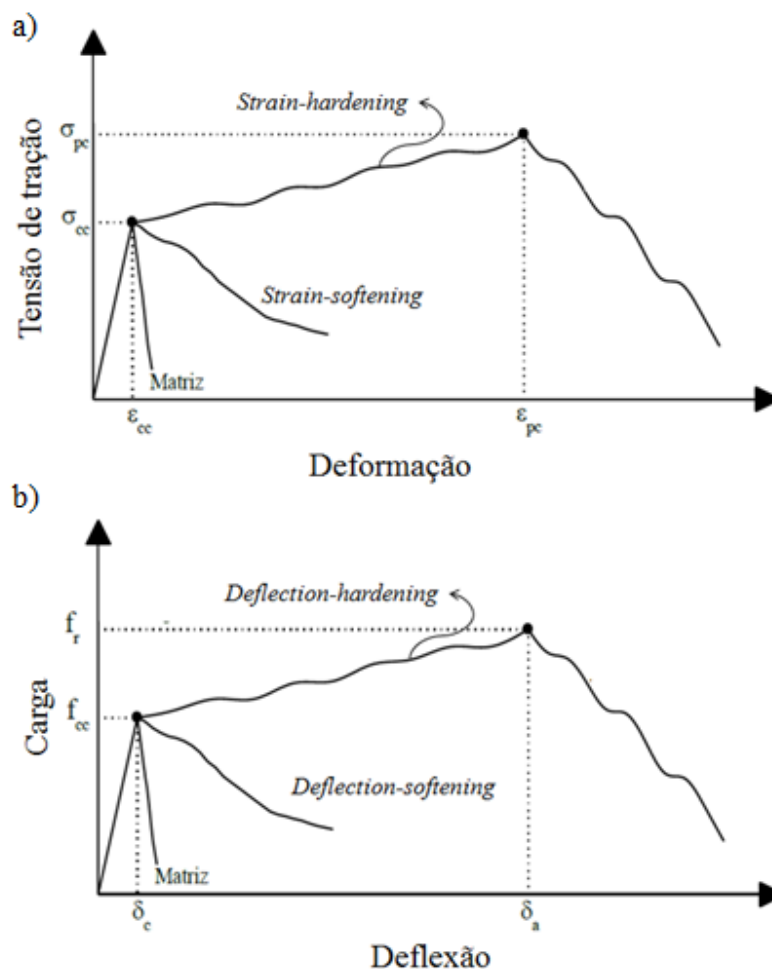


Figura 2.1 – Curvas característica do comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras (a) na tração; (b) na flexão (Adaptada de [21]).

2.2.

Uso de tecidos como reforço em compósitos de matriz cimentícia

Tradicionalmente o reforço de compósitos cimentícios tem sido feito com fibras curtas distribuídas na matriz de maneira aleatória [22]. Para que as fibras possam contribuir para o aumento da resistência, bem como para a tenacidade do compósito, é necessária a incorporação de altas frações volumétricas de fibra [5]. Muitas vezes isso não é possível utilizando os métodos convencionais. Com baixas frações volumétricas de fibras, os compósitos apresentam comportamento *strain-softening*, podendo ser usados apenas em aplicações não estruturais. [6].

Estudos [5,6] mostram que compósitos com altas frações volumétricas são possíveis de serem obtidos com o uso de fibras contínuas alinhadas. Dessa forma, o reforço é capaz de aumentar a resistência dos compósitos, fazendo com que eles

apresentem comportamento *strain-hardening* e possam ser usados para fins estruturais.

O reforço contínuo passa a ser particularmente atrativo para o caso de elementos finos. Além disso, é possível adequar esse tipo de reforço para elementos com diferentes geometrias [1,3].

O termo concreto reforçado com tecido surgiu no final dos anos 1990 [7]. Segundo Naaman [7], concreto reforçado com tecido, ou concreto têxtil, é um compósito de matriz cimentícia reforçado com múltiplas camadas de tecido 2D ou 3D. Os tecidos podem ser poliméricos, sintéticos, metálicos ou orgânicos.

Os tecidos são formados por um conjunto de cordões. Um cordão é a união de diversos filamentos, e sua finura depende do número e da média do diâmetro dos filamentos. Filamentos são fibras longas e contínuas com um formato, muitas vezes, circular [3,11].

A resistência de um cordão pode ser diferente da resistência dos filamentos que o formam. Isso pode ser explicado pela inerente variabilidade na resistência dos mesmos. Dessa forma, o comportamento do cordão é governado pelo filamento mais fraco. Além disso, devido à falta de um alinhamento ideal de todos os filamentos, alguns acabam por contribuir apenas parcialmente para a capacidade resistente de carga do cordão. Deve-se também considerar na resistência do cordão o mecanismo de transferência de tensões entre os filamentos de um cordão, que depende de interações friccionais entre filamentos vizinhos [3].

A tecnologia atual oferece uma grande variedade de tecidos. As variáveis em um tecido são a geometria e a distribuição das fibras em duas ou três dimensões, assim como a combinação de diferentes tipos de fibras em um mesmo tecido. Estruturas têxteis planas ou em 2D são tecidos nos quais os cordões estão arranjados no plano e são capazes de suportar cargas em uma ou mais direções [22]. Estruturas têxteis em 3D possuem cordões orientados em três direções [22]. Dessa forma, os tecidos espaciais são capazes de resistir a carregamentos não apenas em ou uma ou duas direções, mas também dentro de um volume, isto é, através da espessura do elemento reforçado com este material [3].

A terminologia de tecidos técnicos define as direções do tecido como sendo trama (*warp*) e urdume (*weft*). Em geral, a trama é a direção dos cordões principais, e o urdume é a direção dos cordões secundários, que tem como objetivo manter a forma do tecido [3,11].

Dependendo de como é feita a ligação entre os cordões de direções diferentes, os tecidos podem ser classificados como *woven*, *knitted*, *braided* ou *nonwoven* [3,11,23,24]. Nos tecidos *woven*, os cordões assumem uma geometria ondulada, conforme um passa por cima do outro (Figura 2.2.a). Nos tecidos *knitted*, os cordões de uma direção, geralmente a considerada como principal, permanecem retos, enquanto os cordões da outra direção são costurados em pontos que unem os filamentos nas diferentes direções (Figura 2.2.b) [3,23]. Dependendo do tipo de processo de produção do tecido, os cordões que são costurados podem assumir diversas geometrias [3]. Os tecidos *nonwoven* são produzidos por processos mecânicos, químicos [11] ou térmicos [22].

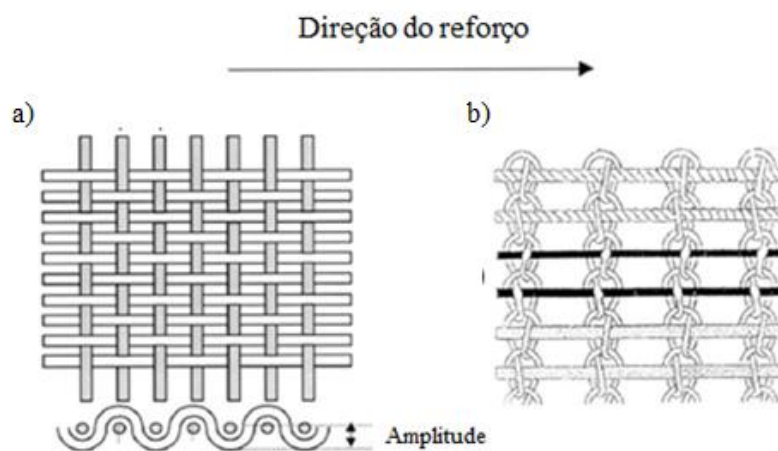


Figura 2.2 – Exemplos de tecido (a) *woven*; (b) *knitted* (adaptada de [24]).

Estudos [23–27] mostram que a geometria do cordão (ondulada ou reta), ou seja, a forma com que o tecido é fabricado influencia na aderência entre o reforço e a matriz e, consequentemente, no desempenho do compósito. Em tecidos *woven*, os cordões perpendiculares à direção de aplicação do carregamento contribuem positivamente para a aderência entre a matriz e o reforço. Por outro lado, em tecido *knitted*, estes cordões são prejudiciais à aderência entre a matriz e o reforço. Tecidos cujos cordões possuem uma geometria especial complicada apresentam ancoragem mecânica. Esse tipo de ancoragem melhora a aderência entre o reforço e a matriz [24,27].

2.3. Tecido de fibra de carbono

A primeira fibra de carbono foi produzida por T. Edison, nos Estados Unidos, e J.W. Swan, na Inglaterra, por volta de 1880, a partir de celulose. As fibras de carbono modernas foram desenvolvidas no fim da década de 1950 e início da década de 1960 por W. Watt, na Inglaterra, A. Shindo, no Japão e R. Bacon, nos Estados Unidos [8].

As fibras de carbono geralmente encontram-se disponíveis na forma de *tows*, que consistem na união de vários filamentos de fibras contínuas. Estes filamentos têm diâmetro variando de 4 a 15 μm [3,10].

A fibra de carbono pode ser obtida de diferentes matérias primas, como a poliacrilonitrila (PAN), *rayon* ou piche [10]. Atualmente, a poliacrilonitrila (PAN) é o precursor predominantemente usado na obtenção da fibra de carbono, seguido do piche [8,12]. O piche, por sua vez, é um precursor mais barato que a poliacrilonitrila (PAN) [12], porém as fibras de carbono obtidas dele são de qualidade inferior [3]. O processo de produção da fibra de carbono envolve a polimerização, estabilização térmica, carbonização e grafitização da matéria prima [8]. Esses processos ocorrem em temperaturas que variam de 1000°C a 3000°C. Propriedades da fibra de carbono, como o módulo de elasticidade e a resistência à tração, dependem das condições de temperatura e tensões envolvidas no processo de fabricação da mesma [3,10].

Geralmente, as fibras de carbono apresentam seção transversal não circular e sua microestrutura é heterogênea. A morfologia da fibra de carbono depende da matéria prima a partir da qual ela é obtida [10].

As fibras de carbono obtidas da poliacrilonitrila (PAN) costumam ser divididas em dois grupos, dependendo da temperatura na qual são fabricadas. As fibras do primeiro grupo são obtidas em temperaturas entre 1500°C e 1700°C e possuem alta resistência à tração, enquanto as fibras do segundo grupo são obtidas em temperaturas entre 2200°C e 3000°C e possuem alto módulo de elasticidade [11].

Até o desenvolvimento de uma fibra de carbono obtida do piche mesofásico, na década de 1980, as fibras de carbono obtidas da poliacrilonitrila (PAN) possuíam propriedades mecânicas superiores às fibras de carbono obtidas do piche

isotrópico, até então usado. A fibra de carbono a partir do piche mesofásico apresenta alto módulo de elasticidade, superando as fibras de carbono obtidas da poliacrilonitrila (PAN). Entretanto, o seu processo de produção é muito mais caro [3,8].

Os valores da resistência à tração e do módulo de elasticidade das fibras de carbono divergem um pouco na literatura. A Tabela 2.1 apresenta alguns valores para essas propriedades encontradas na literatura disponível.

Tabela 2.1 – Resumos das propriedades mecânicas das fibras de carbono encontradas na literatura.

<i>Tipo de fibra</i>	<i>Resistência à tração (MPa)</i>	<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>	<i>Fonte</i>
<i>Fibra de carbono PAN Tipo I</i>	2200	390	<i>Hull (1996), Bentur e Mindess (2006)</i>
	3599	235	<i>Herakovich (1998)</i>
	3000 - 5000	200 - 250	<i>Mobasher (2012)</i>
<i>Fibra de carbono PAN Tipo II</i>	2700	250	<i>Hull (1996), Bentur e Mindess (2006)</i>
	5171	310	<i>Herakovich (1998)</i>
	2000 - 4500	350 - 450	<i>Mobasher (2012)</i>
<i>Fibra de carbono piche</i>	2199	724	<i>Herakovich (1998)</i>
	600 - 750	30 - 32	<i>Bentur e Mindess (2006)</i>

Quando submetidas a temperaturas elevadas, as fibras de carbono apresentam boa durabilidade, sendo capazes de manter suas propriedades mecânicas. A temperatura na qual a fibra de carbono começa a perder resistência e apresenta diminuição do módulo de elasticidade depende do tipo de precursor usado para a sua fabricação. Até temperaturas de 1550°C a 1800°C, as fibras de carbono obtidas da poliacrilonitrila (PAN) mantêm ou apresentam pequena melhora na resistência à tração [13,14]. O módulo de elasticidade destas fibras apresenta queda discreta conforme a temperatura aumenta até 1500°C [13,14]. Fibras de carbono obtidas do piche não apresentaram variação significativa da resistência à tração e módulo de elasticidade com o aumento da temperatura de 20°C a 1300°C [28].

As fibras de carbono apresentam como propriedades: estabilidade em ambientes alcalinos, alta condutividade térmica, baixo coeficiente de expansão térmica e baixa resistividade elétrica [3,12,29–31].

As fibras de carbono são conhecidas pelo seu uso nas indústrias aeroespacial, nuclear, de bens esportivos, biomédica e automobilística [8]. Entretanto, devido às suas boas propriedades mecânicas e de durabilidade elas vêm se tornando extremamente atraentes na indústria da engenharia civil, como reforço de matrizes cimentícias.

2.4. Interface reforço-matriz de concretos têxteis

Compósitos cimentícios apresentam uma zona de transição interfacial (ZTI) na região próxima ao reforço. A microestrutura da matriz nesta região é diferente da microestrutura da matriz longe do reforço. A natureza e o tamanho da ZTI dependem do tipo de reforço e do processo de produção do compósito [3].

Como já dito anteriormente, os cordões que formam os tecidos são constituídos por inúmeros filamentos. Os espaços entre estes filamentos são muito pequenos, na ordem de μm . Por isso, é difícil que os grãos de cimento penetrem entre os filamentos. Após o tempo de cura, a microestrutura da ZTI é caracterizada por espaços vazios ou pela formação localizada e limitada de produtos de hidratação entre os filamentos. Dessa forma, o cordão permanece flexível e cada filamento possui certa liberdade de movimento relativa aos demais [3]. Neste caso, a aderência entre o reforço e a matriz não é uniforme; a aderência interna é menor que a aderência externa. Como ilustrado na Figura 2.3, a curva tensão *versus* deslizamento do compósito é abatida, isto é, a resistência do material não é alta, porém é possível observar a existência de uma pseudo ductilidade. Este efeito ocorre devido ao deslizamento dos filamentos, que leva a tensões diferentes e consequente ruptura sucessiva dos filamentos [1].

Quando todos os filamentos estão ancorados na matriz, eles não possuem liberdade de movimento relativa uns com os outros. Neste caso, a aderência interna é maior que a aderência externa. Como se pode observar na Figura 2.3, a resistência do compósito é maior que no caso anterior. Entretanto, logo após a tensão máxima ser atingida há uma queda abrupta da curva tensão *versus* deslizamento, não existindo a pseudo ductilidade. Isso ocorre porque todos os filamentos rompem ao mesmo tempo [1].

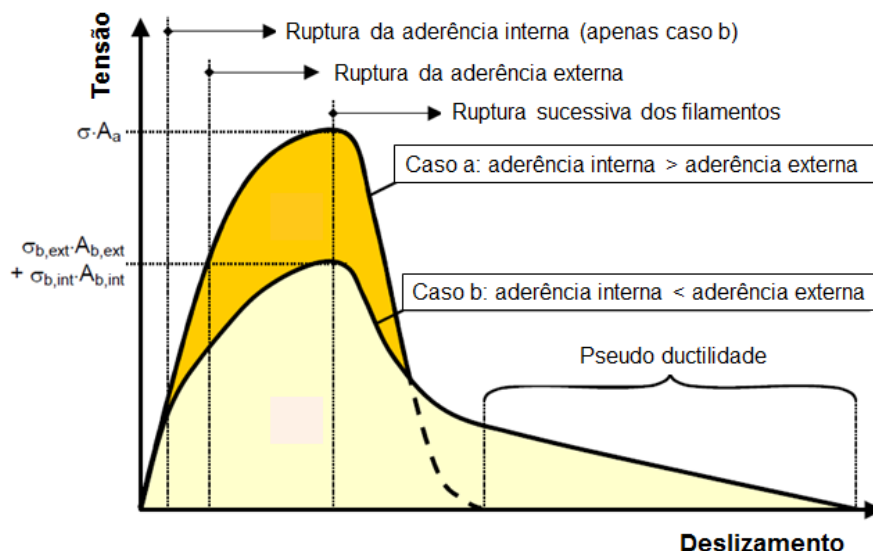


Figura 2.3 – Esquema da curva de arrancamento de diferentes tipos de tecido (adaptada de [1]).

Em geral, os tecidos de carbono disponíveis comercialmente são feitos com cordões de filamentos muito finos [3]. Portanto, quando usados como reforço de matrizes cimentícias, os grãos de cimento não são capazes de penetrar entre os filamentos e a sua eficiência é baixa.

Existem algumas formas de modificar a aderência entre o reforço e a matriz. Uma delas é a impregnação do cordão com material polimérico. Estudos mostram que a adição de uma camada polimérica ao tecido melhora o comportamento mecânico dos concretos têxteis [1,15–18,32–34]. Entretanto, quando este tipo de material é usado é constatada a delaminação do compósito, que ocorre entre as camadas de reforço e a matriz cimentícia [32,33]. O fato de isso ocorrer indica que a aderência entre o reforço e a matriz cimentícia é baixa [32]. A melhora do comportamento mecânico é explicada pela habilidade do polímero de fazer com que os filamentos do cordão funcionem como unidade. O cordão pode ser considerado um compósito, no qual a matriz é o polímero [1,16,32,33].

Uma forma de evitar a delaminação do compósito quando é usado o tecido impregnado com material polimérico é polvilhar uma camada de areia sobre a camada de polímero. A camada de areia fornece uma ancoragem mecânica entre a matriz e o reforço e, conseqüentemente, melhora o desempenho mecânico do compósito. Além disso, ela é capaz de manter certo nível de pseudo ductilidade do compósito [16,18,34].

Outra forma de modificar a aderência entre o reforço e a matriz é com a adição de *fillers* minerais, como microsilica [32,35]. A microsilica é considerada um *filler* reativo. Ela reage com o hidróxido de cálcio (CH) disponível na matriz, proveniente da hidratação do cimento, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) [3] entre os filamentos dentro do cordão. Essa reação pozolânica [3] aumenta a aderência entre o tecido e a matriz, melhorando, conseqüentemente, o comportamento mecânico do compósito [32,35]. O uso de *fillers* minerais também é interessante quando o compósito estiver sujeito a temperaturas elevadas, uma vez que esses materiais apresentam alta resistividade térmica [35].

O pré-tensionamento do tecido durante a fabricação do compósito também colabora para a melhora da aderência entre o reforço e a matriz. Após a pré-tensão, os filamentos do cordão são empacotados, esticados e apresentam deformação transversal. O efeito do coeficiente de Poisson e o efeito do empacotamento do cordão aumentam a fricção entre os filamentos internos e conseqüentemente a aderência entre o tecido e a matriz. Dessa maneira, há uma melhora no comportamento mecânico do compósito [15,16,22,36].

2.5.

Comportamento mecânico de concretos têxteis

O comportamento mecânico dos concretos têxteis deve ser avaliado levando-se em consideração as propriedades da matriz, do reforço e da região de transição entre eles, ou seja, as características da aderência [1].

O princípio do comportamento mecânico de concretos têxteis é o mesmo de concretos reforçados com fibras curtas (CRF). Assim que ocorre a primeira fissura da matriz, a carga é transferida para o reforço [1,3]. Entretanto, com relação à ductilidade, há uma diferença entre o CRF e o concreto têxtil. A ductilidade dos CRF é obtida do arrancamento das fibras, e por isso, a carga de arrancamento deve ser menor que a resistência das fibras, para o caso de fibras frágeis. Já em concretos têxteis, a ductilidade é obtida a partir da deformação de ruptura do reforço [1].

Em geral, o comportamento mecânico de concretos têxteis é caracterizado por meio de ensaios de tração direta e de flexão. Apesar de ensaios de flexão serem mais fáceis de serem executados, os resultados de ensaios de tração

possuem mais detalhes sobre o comportamento do material [1]. A Figura 2.4 apresenta uma curva tensão *versus* deformação típica de um concreto têxtil ensaiado à tração direta. Esta curva pode ser dividida em quatro zonas, identificadas na figura.

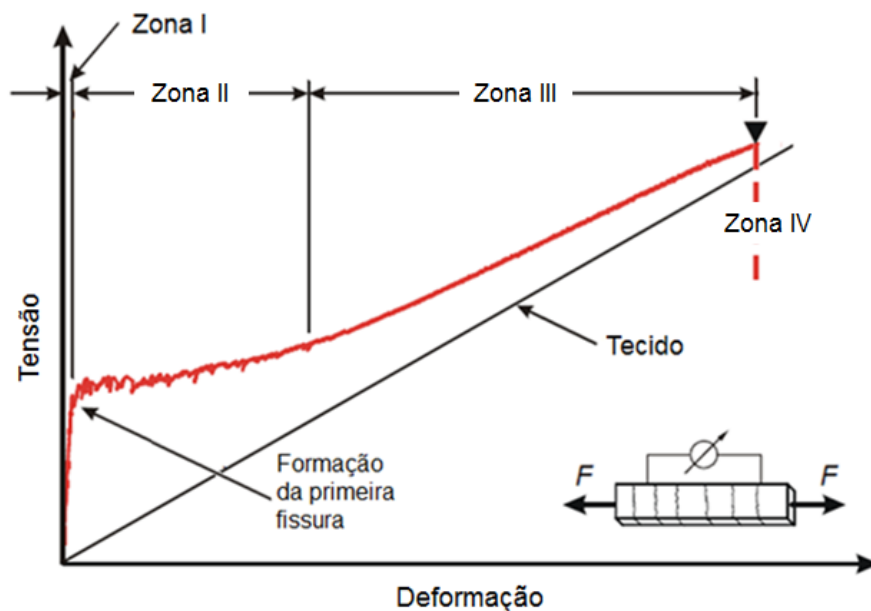


Figura 2.4 – Curva tensão *versus* deformação característica de um concreto têxtil (adaptada de [1]).

A Zona I corresponde ao início da curva. Nesta zona a matriz não está fissurada e a rigidez do compósito corresponde aproximadamente ao módulo de elasticidade da matriz. A Zona I termina no ponto onde ocorre a formação da primeira fissura da matriz. Com o aumento da tensão, há a formação de novas fissuras. A Zona II é então caracterizada pela múltipla fissuração da matriz. Quando não há formação de novas fissuras, o acréscimo de tensão é absorvido pelo reforço (Zona III). A curva tensão versus deformação do compósito na Zona III é aproximadamente paralela à curva do tecido. Quando a tensão aplicada atinge a resistência do tecido ocorre a ruptura do compósito (Zona IV) [1,3].

Na Zona III, onde o reforço é responsável por suportar as tensões, a curva tensão *versus* deformação do compósito deveria ser paralela à curva tensão *versus* deformação do tecido. Entretanto, estudos [37] mostram que apesar de ser uma reta, ela não é paralela. A rigidez do compósito nesta zona é menor que a rigidez do tecido ($E_f V_f$, onde E_f é o módulo de elasticidade dos filamentos e V_f a quantidade de filamentos no reforço). Como o módulo de elasticidade dos

filamentos é uma propriedade constante, a redução na rigidez do tecido é causada por uma redução na quantidade de filamentos no reforço, que só pode ser explicada pela ruptura de alguns filamentos [37].

Atualmente, existem dois grupos principais que estudam o comportamento mecânico de concretos têxteis, um na Universidade de Aachen e outro na Universidade de Dresden, ambas na Alemanha. Através de ensaios de tração direta e de flexão, eles traçaram algumas diretrizes para o entendimento do comportamento mecânico dos concretos têxteis.

Ensaio de tração direta feitos em compósitos reforçados com diferentes tecidos mostram que o material do tecido não influencia na rigidez do compósito não-fissurado (Zona I). Logo após a formação da primeira fissura, o módulo de elasticidade do tecido influencia na rigidez do compósito. Dessa forma, quanto maior o módulo de elasticidade do tecido, maior a rigidez do compósito fissurado. Além disso, os resultados também mostraram que o tipo de fibra do tecido não influencia na distância entre as fissuras. Entretanto, tem bastante influência na largura das mesmas [1,38].

A forma da seção transversal do reforço possui grande influência na resistência do compósito. Ensaio realizados na Universidade de Aachen [1] em concretos reforçados com tecidos com cordões de diferentes espessuras mostram que conforme a espessura do cordão aumenta, a resistência do reforço dentro do compósito diminui. Quanto maior a espessura do cordão, menor a quantidade de filamentos externos, em contato direto com a matriz, e conseqüentemente, menor a aderência entre o reforço e a matriz.

A orientação do tecido dentro do compósito é outro fator que afeta a resistência dos concretos têxteis. Estudos feitos tanto na Universidade de Aachen [1,38–40] quanto na Universidade de Dresden [1] mostram que uma inclinação de 45° do tecido com relação à direção de aplicação de carga pode causar uma redução de 50% ou mais na resistência do compósito, quando comparado com um compósito cujo reforço está alinhado com o carregamento. Os dois grupos de estudos divergem com relação ao motivo que causa a redução da resistência quando o tecido não está alinhado com o carregamento. Os estudos feitos na Universidade de Aachen apontam como principal fator danos causados aos filamentos devido a forças transversais e à flexão nas extremidades das fissuras. Alguns tipos de fibras, como a fibra de carbono, são bastante sensíveis em relação

a estes tipos de ação. Na Universidade de Dresden, a redução da resistência é atrelada à alteração da aderência tanto entre filamentos quanto entre o cordão e a matriz. Os filamentos internos deformam menos porque eles não se alinham na direção do carregamento da mesma forma que os filamentos externos. Isso leva a uma maior diferença entre as tensões dos filamentos internos e externos, diminuindo a eficácia do reforço. Ainda não foi provado o que de fato é responsável pela redução da resistência quando o reforço não está alinhado à direção de aplicação da carga [1].

A influência da fração volumétrica do reforço na resistência do compósito foi analisada através de ensaios de flexão [1,38,40]. O aumento da taxa de reforço leva a um aumento da resistência do compósito. Em geral, uma maior fração volumétrica de reforço gera um espaçamento menor entre fissuras e, conseqüentemente, uma maior quantidade de fissuras. Quanto mais fissuras, maior a deformação na região tracionada da amostra antes que a largura de ruptura da fissura seja atingida. Os filamentos internos, então, alcançam maiores deformações, aumentando a eficácia do reforço. Além disso, com o aumento da fração volumétrica de reforço, a amostra é capaz de atingir maiores deflexões e, conseqüentemente, há o aumento da curvatura antes da ruptura. Este último leva a maiores tensões transversais agindo no cordão, melhorando a aderência dos filamentos internos. No caso de tecidos de fibra de carbono, esse efeito pode se sobrepor aos danos causados pela ação transversal nas extremidades das fissuras.

Apesar de existirem muitos trabalhos voltados a estudar a aderência entre o tecido de fibra de carbono e a matriz [15–18,32,35], não existem tantos estudos caracterizando o comportamento mecânico de concretos reforçados com tecido de fibra de carbono [17,18,33,34,41]. Cabe ressaltar que os resultados disponíveis na literatura para as resistências destes compósitos são discrepantes entre si, uma vez que nem sempre os autores deixam explícito a área usada para o cálculo da tensão. Alguns autores [18,41] consideram a área do reforço para calcular a tensão, enquanto outros consideram a área do compósito [17].

Li e Xu [34] realizaram ensaios de flexão a quatro pontos em concretos reforçados com tecido de fibra de carbono impregnado com resina epóxi com e sem uma camada de areia. O cordão do tecido de carbono foi ensaiado e a resistência à tração calculada foi de 3518 MPa. Para uma matriz com resistência à compressão de 88 MPa aos 28 dias, a resistência equivalente na flexão calculada

foi de 47,4 MPa e 47,9 MPa para o compósito reforçado com tecido de carbono impregnado com resina epóxi sem areia e com areia, respectivamente. Ambos os compósitos apresentaram comportamento *deflection-hardening* na flexão.

Dvorkin et al. [17] realizaram ensaios de tração direta em concretos reforçados com uma camada de tecido de fibra de carbono com e sem impregnação de resina epóxi. Com relação ao compósito reforçado com tecido de carbono não impregnado, o compósito reforçado com tecido de carbono impregnado apresentou 43% de aumento na resistência à tração, 220% de aumento na deformação na resistência à tração e 140% de aumento na absorção de energia. A resistência à tração média calculada foi de 4,1 MPa e 5,9 MPa para o compósito reforçado com tecido de carbono não impregnado e impregnado, respectivamente. Os autores não explicitaram a área usada para o cálculo da tensão de tração. Ambos os compósitos apresentaram comportamento *strain-softening*.

Schuetze et al. [41] realizaram ensaios de tração direta em duas temperaturas distintas em concretos reforçados com tecido de fibra de carbono. O tecido usado era impregnado com um material polimérico não especificado e tinha resistência à tração de 4000 MPa. Aos 28 dias, o concreto apresentou resistência à compressão de 94,0 MPa. A média da resistência à tração calculada do compósito foi de 2035 MPa, para amostras ensaiadas a 20°C, e de 1784 MPa para amostras ensaiadas a 40°C. A tensão de tração foi calculada utilizando a área do reforço.

Donnini et al. [18] realizaram ensaios de tração direta em concretos reforçados com uma camada de tecido de carbono com e sem impregnação de resina epóxi e areia. Para uma matriz de resistência à compressão de 50,0 MPa e módulo de elasticidade de 34,5 GPa aos 28 dias, foram calculadas resistências à tração de 986 MPa e 1366 MPa para os compósitos reforçados com tecido de carbono não impregnado e impregnado, respectivamente. A tensão de tração foi calculada utilizando a área do reforço. O compósito reforçado com tecido de carbono não impregnado apresentou comportamento *strain-softening*, enquanto o compósito reforçado com tecido de carbono impregnado apresentou comportamento *strain-hardening*.

Halvaei et al. [33] realizaram ensaios de flexão a quatro pontos em concretos reforçados com tecido de fibra de carbono com e sem impregnação. O cordão do tecido de carbono tinha resistência à tração de 3000 MPa e módulo de

elasticidade de 230 GPa. Foram usados três materiais diferentes para a impregnação: látex estireno butadieno (SBR), óleo vegetal (Castor) e resina epóxi. Todos os compósitos apresentaram comportamento *deflection-hardening* na flexão. A resistência equivalente na flexão média calculada foi de aproximadamente 6 MPa para o compósito reforçado com tecido sem impregnação, 4 MPa para o compósito reforçado com tecido impregnado com SBR, 5 MPa para o compósito reforçado com tecido impregnado com óleo vegetal e 10 MPa para o compósito reforçado com tecido impregnado com resina epóxi.

2.6.

Aplicações do concreto têxtil

Um passo importante no desenvolvimento de estruturas têxteis é garantir a sua aplicabilidade. Os concretos têxteis podem ser usados para o reparo ou reforço de elementos estruturais já existentes de concreto armado ou outro material e para a construção de novos elementos, estruturais e não estruturais [19].

2.6.1.

Uso do concreto têxtil para reparo e reforço externo de elementos estruturais

Quando usado para o reparo e reforço externo de elementos estruturais, muitas vezes o concreto têxtil é chamado de *fabric reinforced cementitious matrix* (FRCM) [18]. Estudos [19,42–51] mostram que o FRCM é uma solução viável para o reparo e reforço de estruturas de concreto armado e alvenaria devido ao seu baixo peso próprio e a fácil fabricação e aplicação. Além disso, a resistência a temperaturas elevadas e a compatibilidade com o substrato no qual é aplicado, fazem com o FRCM seja uma alternativa melhor que outros materiais de reforço, como os polímeros reforçados com fibras (*fiber reinforced polymers* – FRP).

Brückner et al. [42] realizaram ensaios de flexão a três e quatro pontos em lajes e vigas de seção retangular e T de concreto armado para avaliar a eficácia de um reforço feito com fibra de vidro AR-FRCM. As lajes foram reforçadas à flexão enquanto as vigas foram reforçadas ao cisalhamento. Os resultados obtidos mostraram que o uso deste material como reforço aumenta a resistência à flexão e ao cisalhamento dos elementos analisados. Além do aumento da carga máxima,

Brückner et al. [42] também concluíram que houve uma melhora nas propriedades no estado limite de serviço do elemento.

Ambrisi e Focacci [43] realizaram um estudo para avaliar a eficácia do uso de materiais FRCM no reforço de vigas de concreto armado à flexão e ao cisalhamento. Além disso, também compararam o uso deste material com o reforço feito com FRP. Os resultados experimentais mostraram que de fato os materiais FRCM podem ser usados para reforçar vigas de concreto armado. Eles confirmaram que o estado limite último de vigas reforçadas com FRCM é alcançado devido à perda de ação do reforço, consequência do descolamento do tecido, que pode ocorrer de diversas maneiras. Na maioria dos casos, o descolamento do tecido envolve a interface reforço/matriz, não envolvendo o concreto do elemento reforçado, como ocorre quando o reforço é feito com FRP.

Ombres [44] realizou ensaios de flexão a quatro pontos em vigas de concreto armado reforçadas com PBO-FRCM para avaliar a eficácia do reforço. Os resultados mostraram que o uso do PBO-FRCM melhora a resistência à flexão de vigas de concreto armado. As vigas reforçadas apresentaram aumento de 10% a 44% em relação à resistência das vigas não reforçadas. A ductilidade das vigas reforçadas com PBO-FRCM que romperam por flexão aumentou quando comparadas com as vigas não reforçadas. Entretanto, quando houve ruptura por descolamento da camada de reforço, houve uma diminuição da ductilidade. Ombres [44] também concluiu que o modo de ruptura depende da fração volumétrica de reforço que é utilizada.

Al-Salloum et al. [45] analisaram, através de ensaios de flexão a quatro pontos, a eficácia do uso de basalto-FRCM como reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado. Os resultados experimentais mostraram que houve aumento de 36% a 52% da resistência ao cisalhamento. O aumento é proporcional ao número de camadas de tecido que formam o reforço usado. A orientação do tecido (90° e 45° em relação à superfície lateral da viga) não teve influência no aumento da resistência ao cisalhamento.

Schladitz et al. [46] demonstraram que mesmo para lajes de concreto armado de grandes vãos e com taxas de armação altas, o reforço à flexão com carbono-FRCM pode ser feito de modo seguro. Resultados obtidos através de ensaios de flexão a quatro pontos mostraram aumento da resistência à flexão quando este material é usado como reforço externo. Este aumento é proporcional à

quantidade de camadas de tecido de carbono que formam o reforço. Para lajes cujo reforço contava com quatro camadas de tecido de carbono, foram encontrados valores de carga máxima 3,5 vezes maiores que as lajes não reforçadas com FRCM. Além disso, Schladitz et al. [46] constataram, para mesmos níveis de carregamento, uma diminuição da deflexão conforme o aumento da fração volumétrica de reforço.

Loreto et al. [47] estudaram a viabilidade do uso de FRCM com tecido de PBO para o reforço de lajes. Os efeitos do FRCM foram evidentes, resultando em um aumento da resistência proporcional à fração volumétrica de reforço usada. Entretanto, o aumento na resistência causou uma diminuição da deformação máxima.

Babaeidarabad et al. [48] estudaram o comportamento mecânico de paredes de alvenaria não armadas reforçadas externamente com carbono-FRCM. As paredes foram submetidas à compressão diagonal, que, apesar de não necessariamente reproduzir o que ocorre na prática, é um método mais conservador para analisar o comportamento no plano de alvenarias. Os resultados experimentais obtidos comprovam que o carbono-FRCM pode ser usado para o reforço de paredes de alvenaria. Foram constatadas resistências no plano de 2,4 a 4,7 vezes maiores para paredes reforçadas com uma e quatro camadas de tecido de carbono, respectivamente, comparado com paredes não reforçadas. O reforço com carbono-FRCM também alterou o modo de ruptura destes elementos. Paredes não reforçadas apresentaram ruptura frágil, enquanto paredes reforçadas com uma camada de tecido de carbono romperam devido à ruptura do sistema FRCM, caracterizado pelo deslizamento do tecido na matriz. As paredes reforçadas com quatro camadas de tecido de carbono romperam por esmagamento da base, indicando que o nível do reforço foi excessivo.

Babaeidarabad et al. [49] analisaram a viabilidade técnica do uso de reforço com carbono-FRCM em paredes de alvenaria não armadas submetidas a esforços de flexão fora do plano. Os resultados experimentais obtidos mostraram que as paredes reforçadas com uma e quatro camadas de tecido de carbono formando o FRCM apresentaram, respectivamente, resistências à flexão 2,8 e 7,5 vezes maiores que as paredes não reforçadas. A partir das curvas momento versus deflexão obtidas, Os autores observaram que o reforço com carbono-FRCM

aumentou a rigidez e a pseudoductilidade das paredes. Entretanto, a pseudoductilidade foi maior para menores frações volumétricas de reforço.

Babaeidarabad et al. [50] estudaram o comportamento mecânico de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com uma e quatro camadas de FRCM de tecido de PBO submetidas a ensaios de flexão a três pontos. Os resultados experimentais mostraram que o reforço feito com FRCM aumenta a resistência equivalente na flexão de vigas de concreto armado. Esse aumento é proporcional ao número de camadas do reforço. Por outro lado, o reforço feito com FRCM diminui a pseudoductilidade. Essa diminuição também é proporcional ao número de camadas do reforço, ou seja, quanto maior o número de camadas, menor a pseudoductilidade. Babaeidarabad et al. [50] identificaram dois modos de ruptura, dependentes da quantidade de camadas do reforço: deslizamento do tecido contra a matriz e delaminação do FRCM.

Azam e Soudki [51] investigaram a eficácia do reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado feito com FRCM de fibra de vidro e de carbono. Os resultados obtidos a partir de ensaios de flexão a três pontos mostram que houve aumento da resistência ao cisalhamento das vigas reforçadas com estes materiais. O aumento da carga máxima variou de 19% a 105%, dependendo do tipo do material do tecido que formava o reforço (fibra de vidro ou carbono) e da posição com que o reforço foi aplicado na viga (apenas nas superfícies laterais ou em forma de U, indo de uma superfície lateral até a outra passando pela face inferior). Também foi constatado um ligeiro aumento da rigidez das vigas reforçadas com FRCM, em comparação com as vigas não reforçadas.

2.6.2.

Uso do concreto têxtil para a construção de novos elementos

O uso de materiais com a superfície em suas condições naturais vem crescendo bastante entre os arquitetos [1]. O desenvolvimento de concretos têxteis permite a produção de elementos de concreto delicados, com superfícies de alta qualidade expostas, dando a esse material de construção uma nova aparência arquitetônica [1,2]. Diferente dos concretos armados convencionais, com barra de aço, os concretos têxteis não necessitam de um cobrimento muito grande [1], uma vez que os tecidos usados como reforço são resistentes à corrosão [3]. As matrizes

constituídas apenas de agregados finos garantem superfícies de maior qualidade e melhor acabamento [1,2]. Estes dois fatores colaboram para o crescimento do uso dos concretos têxteis em aplicações arquitetônicas.

Uma das aplicações do concreto têxtil é na construção de elementos de fachada. A pequena espessura alcançada com o uso deste material reduz o peso próprio do elemento, eliminando a necessidade de ancoragens complexas e, conseqüentemente o custo de montagem [1,52]. A redução do peso próprio também diminui os custos de transportes [52]. O concreto têxtil é então uma alternativa de menor custo, levando em consideração os materiais nobres que geralmente são usados para o revestimento, como a pedra natural [1]. Na Alemanha, painéis de revestimento de fachadas aprovados pela inspeção de construção alemã já estão disponíveis comercialmente [1]. Na Universidade de Dresden (Alemanha) foram desenvolvidos elementos de parapeito utilizando concreto têxtil para serem usados em edifícios garagem [1].

Os concretos têxteis também podem ser usados para a fabricação de painéis do tipo sanduíche, usados tanto como fachadas como pisos e coberturas [52–56]. Painéis do tipo sanduíche (*sandwich panels*) são elementos estruturais constituídos por três camadas. As duas camadas externas são feitas de materiais com alto desempenho mecânico, que é o caso do concreto têxtil, enquanto a camada interna é geralmente feita com um material de isolamento, contribuindo para aumentar a rigidez do elemento sem aumentar o peso específico [1].

Devido à resistência à corrosão e a temperaturas elevadas e a alta durabilidade quando sujeito a ataques químicos, o concreto têxtil também pode ser usado para a fabricação de formas integradas (ou permanentes), que ficam no lugar durante toda a vida útil da estrutura [1,57–60]. Na fase da construção, é a forma de concreto têxtil que suporta os carregamentos atuantes [1]. Após a concretagem e o endurecimento, ela permanece integrada ao elemento estrutural, podendo contribuir para aspectos estruturais, de durabilidade e até arquitetônicos [58]. Pela pequena espessura, característica dos concretos têxteis, estas formas têm baixo peso próprio, sendo fáceis de serem transportadas e movidas em um canteiro de obras [1].

Uma pesquisa [61] feita na Universidade de Aachen, na Alemanha, demonstrou a viabilidade do uso de concretos têxteis em elementos estruturais de grande escala. Foi desenvolvido o projeto de uma ponte para pedestres de 100

metros de comprimento, em Albstadt, Alemanha, usando concreto reforçado com tecido de fibra de vidro álcali resistente. O uso deste material permitiu o dimensionamento de uma estrutura mais esbelta e leve do que se fosse usado o concreto armado convencional. Devido ao seu comprimento, a ponte foi dividida em seis partes pré-fabricadas com vãos de 15,05 metros. A seção transversal é constituída de sete vigas de seção T. Além do reforço com tecido de fibra de vidro, cada alma foi protendida com quatro cabos e reforçadas com três barras de fibra de vidro. Os esforços de cisalhamento eram suportados somente pelo reforço têxtil. Como o dimensionamento de concretos têxteis ainda não é normatizado foi feito um programa experimental para validar o projeto.

Uma pesquisa [62] feita também na Universidade de Aachen, na Alemanha, provou a aplicabilidade do uso de concreto têxtil em estruturas de grande porte. Foi elaborado o projeto de uma ponte para pedestres de 15,55 metros de comprimento. A ponte foi feita inteiramente com concreto reforçado com tecido de fibra de carbono. A seção transversal é constituída de uma viga U reforçada com uma e duas camadas de tecido de fibra de carbono. Os esforços de flexão e cisalhamento são suportados somente pelo reforço têxtil. Como não existem normas para o dimensionamento dos concretos reforçados com tecido, foi feito um programa experimental a fim de validar o projeto e garantir a sua aprovação. Em 2015, a ponte foi construída com sucesso em Albstadt.

3

Desenvolvimento e caracterização do compósito

3.1.

Introdução

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados na fabricação dos compósitos e suas propriedades. Além disso, também é apresentada a metodologia de fabricação dos compósitos e o seu comportamento mecânico. O comportamento mecânico foi avaliado através de ensaios de tração direta, flexão e arrancamento. Os resultados obtidos nos ensaios são analisados e discutidos.

3.2.

Materiais utilizados

3.2.1.

Matriz cimentícia

Em geral, as matrizes de compósitos reforçados com tecidos cuja abertura da malha não é tão grande têm uma limitação em relação ao diâmetro máximo dos agregados. Isso acontece para que haja uma total penetração da matriz entre as camadas de reforço [1]. Neste trabalho foi utilizada uma argamassa, também chamada de concreto devido ao alto desempenho de suas propriedades [1], cujo diâmetro máximo de agregado era de 1,18 mm.

Outro aspecto a ser considerado para garantir a penetração total da matriz no tecido, garantindo uma boa aderência, está relacionado à consistência da matriz. A consistência da matriz deve ser ajustada de acordo tanto com as geometrias do tecido e do corpo de prova quanto com o processo de fabricação do compósito [1].

3.2.1.1.

Dosagem e processamento

A matriz usada neste trabalho era constituída pelos materiais secos areia, cimento CP-II F 32, cinzas volantes e sílica ativa.

O traço 1:1:0,3 (areia:materiais cimentícios:água) foi utilizado para a matriz cimentícia (adaptado de Silva et al. [63]), estando suas quantidades, em massa, correspondente a 1 m³ de argamassa indicadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Traço correspondente a 1 m³ de matriz.

<i>Material</i>	<i>Quantidade (kg)</i>
<i>Areia (1,18 mm)</i>	<i>947,0</i>
<i>Cimento CP-II F</i>	<i>632,0</i>
<i>Água</i>	<i>279,7</i>
<i>Cinza Volante</i>	<i>265,0</i>
<i>Sílica ativa</i>	<i>50,5</i>
<i>Superplastificante (Glenium)</i>	<i>6,31</i>

Areia de rio lavada foi usada como agregado miúdo. Para a fabricação da matriz, a areia foi refinada em um conjunto de peneiras elétricas de forma a se obter granulometria passante na peneira 1,18 mm e retida na de abertura 0,15 mm.

Cimento Portland do tipo CP-II é aquele no qual, durante a moagem, é permitido adicionar ao clínquer materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto forno e/ou materiais carbonáticos (filler) [64]. Neste trabalho foi utilizado o cimento Mauá CP-II F 32, que possui adição de material carbonático.

Cinza volante POZOFLY[®] e sílica ativa SILMIX[®] foram usadas como adições minerais, substituindo parcialmente o cimento. A cinza volante é um subproduto proveniente da combustão do carvão e a sílica ativa é um subproduto das indústrias de silício. Ambos estes materiais são pozolânicos. Na presença de água e em temperatura ambiente eles reagem com o hidróxido de cálcio formando o C-S-H, composto responsável pela resistência do concreto [4].

O superplastificante usado, o Glenium 51 (MS), possui teor de sólidos igual a 30%. Ele foi utilizado na proporção de 0,20% em peso dos materiais cimentícios. Este superplastificante é comercializado como uma solução aquosa. Portanto, a quantidade de água contida nele foi descontada da quantidade total da mistura.

A argamassa foi produzida em um misturador do tipo planetário (Amadio, model 20LA), com capacidade máxima de 20 litros de acordo com os seguintes passos:

- i. os materiais secos (areia, cimento, cinza volante e sílica ativa) foram misturados em velocidade baixa (125 rpm) por um minuto;
- ii. foi adicionada 90% da quantidade total de água e os materiais foram misturados por mais quatro minutos, sendo os 15 primeiros segundos em velocidade baixa (125 rpm) e o restante do tempo em velocidade média (220 rpm);
- iii. por último foi adicionado o superplastificante, previamente misturado com os outros 10% da quantidade de água. A argamassa foi misturada por mais cinco minutos, sendo os 15 primeiros segundos em velocidade baixa (125 rpm), os 15 segundos seguintes em velocidade média (220 rpm) e o restante do tempo em velocidade alta (450 rpm).

3.2.1.2.

Propriedades da matriz no estado fresco

A trabalhabilidade é uma importante propriedade de argamassas e concretos no estado fresco. De acordo com a ASTM C125:2016 [65], trabalhabilidade é a propriedade do concreto recém-misturado que afeta a facilidade com que ele pode ser misturado, lançado, adensado e acabado. Fatores como a consistência, que é a propriedade intrínseca da mistura fresca relacionada com a sua mobilidade e capacidade de fluir, e a coesão, que é a estabilidade da massa, influenciam na trabalhabilidade do concreto.

Para a determinação de uma consistência adequada para a fabricação das amostras de caracterização dos compósitos foram realizados ensaios de espalhamento com diferentes proporções de superplastificante no traço da matriz: 0,12%, 0,20%, 0,60%, 0,80% e 1,00%.

O ensaio de espalhamento foi realizado segundo a ASTM C230/C230M:2014 [66], modificando as dimensões do molde. Foi utilizada uma placa de metal plana e lisa e um molde de formato tronco cônico, cujas dimensões podem ser vistas na Figura 3.1. A matriz foi produzida como descrito no item 3.2.1.1, variando-se as quantidades de água e de superplastificante. Logo após a mistura, a argamassa foi despejada no molde até a borda do tronco. Após o preenchimento do molde, ele foi retirado de forma rápida e o mais verticalmente

possível, deixando a mistura livre para se espalhar. O valor do espalhamento foi considerado como a média aritmética de dois diâmetros ortogonais medidos com auxílio de uma régua (escala 1:100) após a estabilização da argamassa. A Figura 3.2 apresenta as etapas do ensaio de espalhamento. Os resultados para cada proporção de superplastificante na matriz são apresentados na Figura 3.3.

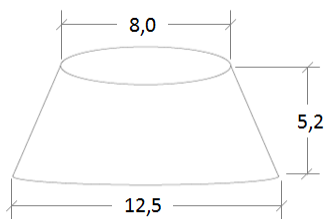


Figura 3.1 – Molde tronco cônico usado para ensaio de espalhamento.

Dimensões em cm.

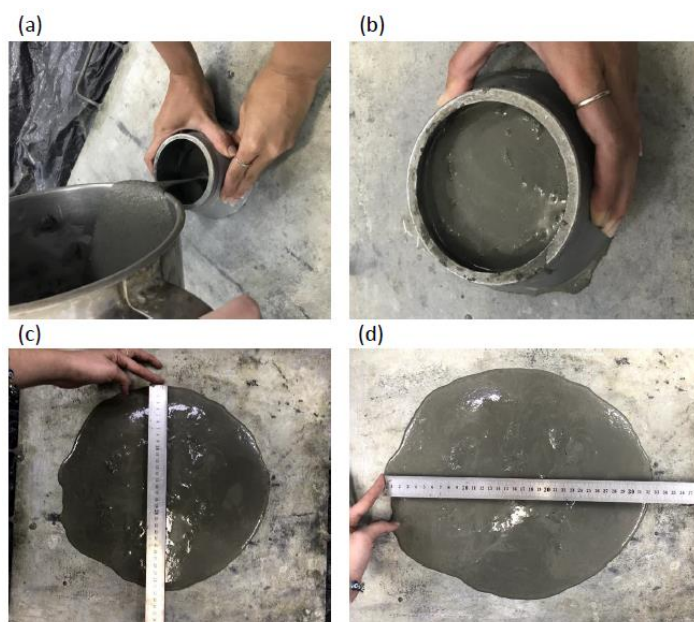


Figura 3.2 – Etapas do ensaio de espalhamento: (a) argamassa sendo colocada no molde; (b) molde preenchido; (c) medição do primeiro diâmetro; (d) medição do segundo.

Ao analisar a Figura 3.3, pode-se perceber que com a proporção de 0,12% de superplastificante, a matriz obteve um espalhamento de 125 mm, que corresponde a dimensão da base do molde. Isto indica, então, que com essa quantidade de superplastificante não houve espalhamento, e a matriz não apresentou nenhuma fluidez. Com 1% de superplastificante, a matriz se tornou

altamente fluida, criando um empecilho no ato da moldagem das amostras, que, como será visto mais adiante, correspondem a placas, para a caracterização do compósito. Uma matriz muito fluida poderia resultar em vazamentos durante a moldagem. A matriz que apresentou consistência ideal foi a com 0,20% de superplastificante. O espalhamento obtido para esta matriz foi de 365 mm.

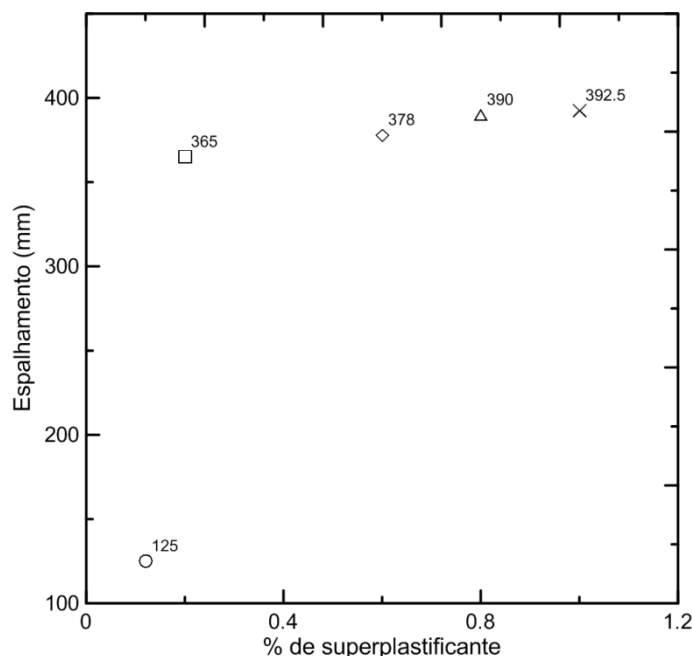


Figura 3.3 - Variação do espalhamento da matriz em função do teor de superplastificante adicionado.

3.2.1.3.

Propriedades da matriz no estado endurecido

A resistência à compressão é uma das propriedades mais importantes de materiais cimentícios no estado endurecido. Neste trabalho, foi avaliada a evolução da resistência à compressão da matriz até os 28 dias, idade na qual os compósitos foram caracterizados. A matriz foi testada em um, três, sete, 15 e 28 dias. Aos 28 dias, além da resistência à compressão, também foi obtida a curva tensão x deformação e o módulo de elasticidade da matriz. Para tal, foram realizados ensaios de compressão em uma máquina de ensaios mecânicos universal, a MTS modelo 810/500, com capacidade de 500 kN. Os ensaios foram controlados por deslocamento a uma taxa de 0,2 mm/min. Nos ensaios que tinham como objetivo a obtenção da curva tensão *versus* deformação e o módulo de elasticidade da matriz foram utilizados dois *linear variable differential*

transformers (LVDTs) com capacidade de leitura de 50 mm para correta aquisição dos deslocamentos. Foram ensaiadas de três a cinco amostras para cada idade.

O procedimento de ensaio se deu como descrito a seguir. Corpos de prova cilíndricos de 50 x 100 mm (diâmetro x altura) foram moldados com a matriz, misturada como descrito no item 3.2.1.1. Após aproximadamente 24 horas da moldagem, as amostras eram desenformadas e curadas em água até o dia do ensaio. No dia do ensaio, as amostras foram faceadas, a fim de regularizar as superfícies de apoio e de aplicação de carga, evitando concentração de tensões em um ponto. Finalmente, a amostra a ser ensaiada foi posicionada na máquina, centralizada com a aplicação de carga, conforme mostrado na Figura 3.4.a. No caso das amostras ensaiadas aos 28 dias, em que também foi obtido o módulo de elasticidade, foi utilizado um aparato que consistia de dois anéis de acrílico para posicionar os LVDTs. A amostra era centralizada nesse aparato e presa a ele por três parafusos, como pode ser visto na Figura 3.4.b. As amostras ensaiadas com um dia não passaram pelo processo de cura. Após serem desenformadas, elas já foram diretamente faceadas e ensaiadas.

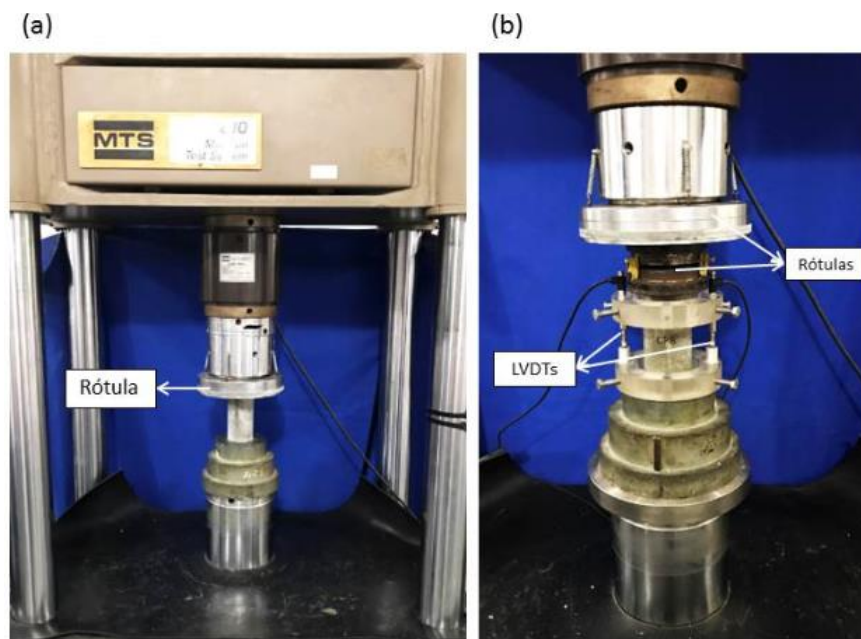


Figura 3.4 – Arranjo experimental do ensaio de compressão. (a) Apenas para obtenção da resistência; (b) para obtenção da curva tensão *versus* deformação.

Como também visto na Figura 3.4, o arranjo experimental do ensaio constava de uma rótula conectada ao pistão de carga da máquina. Esta rótula tinha

como objetivo distribuir a força de forma uniforme na superfície do corpo de prova. Nos ensaios que foram usados LVDTs, foi utilizada também outra rótula, não conectada à máquina, cujo objetivo era proteger a instrumentação.

A resistência à compressão das amostras foi obtida dividindo-se os valores de força medidos durante o ensaio pela área da seção transversal do corpo de prova (πr^2). Os valores de deformação foram calculados dividindo-se o deslocamento do corpo de prova, que foi considerado como a média aritmética dos dois LVDTs, pelo comprimento que os LVDTs cobriam.

Os resultados da resistência à compressão da matriz em diferentes idades encontram-se na Figura 3.5 e na Tabela 3.2.

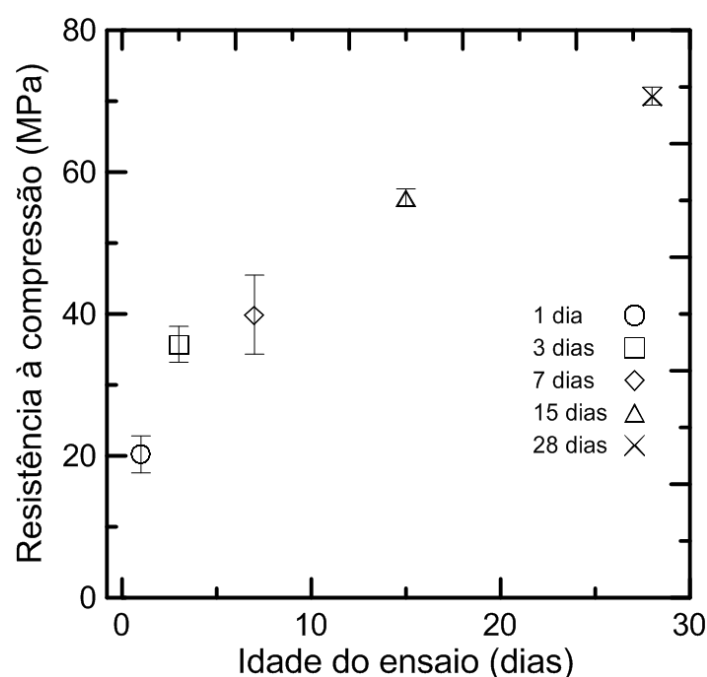


Figura 3.5 – Evolução da resistência à compressão da matriz ao longo do tempo.

Tabela 3.2 – Evolução da resistência à compressão da matriz.

<i>Dias</i>	<i>$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)</i>
1	20,2 ± 2,61
3	35,7 ± 2,52
7	39,9 ± 5,57
15	56,4 ± 1,25
28	70,7 ± 1,26

A partir dos resultados mostrados na Figura 3.5 e na Tabela 3.2, pode-se perceber que, mesmo em idades iniciais, a matriz já possui significativa

resistência à compressão. Com um dia, a matriz tem 28,6% da resistência à compressão da matriz aos 28 dias. Com três dias, a matriz tem 50,5% e com sete dias 56,4% da resistência à compressão da matriz aos 28 dias. Com 15 dias a matriz já atingiu 79,8% da resistência à compressão aos 28 dias.

Na Figura 3.6 e na Tabela 3.3 são apresentadas as curvas tensão de compressão *versus* deformação e os valores da resistência à compressão ($\sigma_{comp,m\acute{a}x}$), deformação correspondente à resistência à compressão ($\epsilon_{m\acute{a}x}$) e módulo de elasticidade (E) das amostras ensaiadas aos 28 dias.

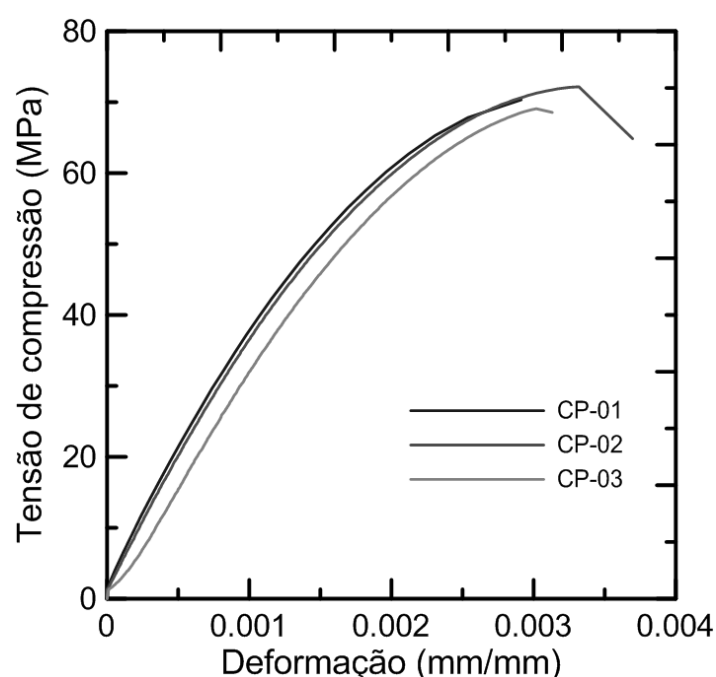


Figura 3.6 – Curvas tensão de compressão *versus* deformação.

Tabela 3.3 – Resumo dos resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade da matriz aos 28 dias.

<i>CP</i>	$\sigma_{comp,m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ (mm/mm)	<i>E</i> (GPa)
1	71,0	0,00309	30,0
2	72,2	0,00332	29,8
3	69,1	0,00302	23,0
Média	70,7	0,00314	27,6
Desvio Padrão	1,26	0,000129	3,27

$\sigma_{comp,m\acute{a}x}$ = resistência à compressão;

$\epsilon_{m\acute{a}x}$ = deformação correspondente à resistência à compressão; *E* = módulo de elasticidade

Como aos 28 dias a matriz apresentou resistência à compressão de 70,7 MPa, esse concreto pode ser considerado como um concreto de alto desempenho.

3.2.2. Tecido de fibra de carbono

Neste trabalho foram usados dois tipos de tecido de fibra de carbono, um flexível e outro rígido. O tecido de carbono flexível foi fornecido pela empresa V.Fraas, sob a forma de rolo, como visto na Figura 3.7.a. O tecido de carbono rígido foi fornecido pela empresa Solidian, sob a forma de folhas, como visto na Figura 3.7.b.

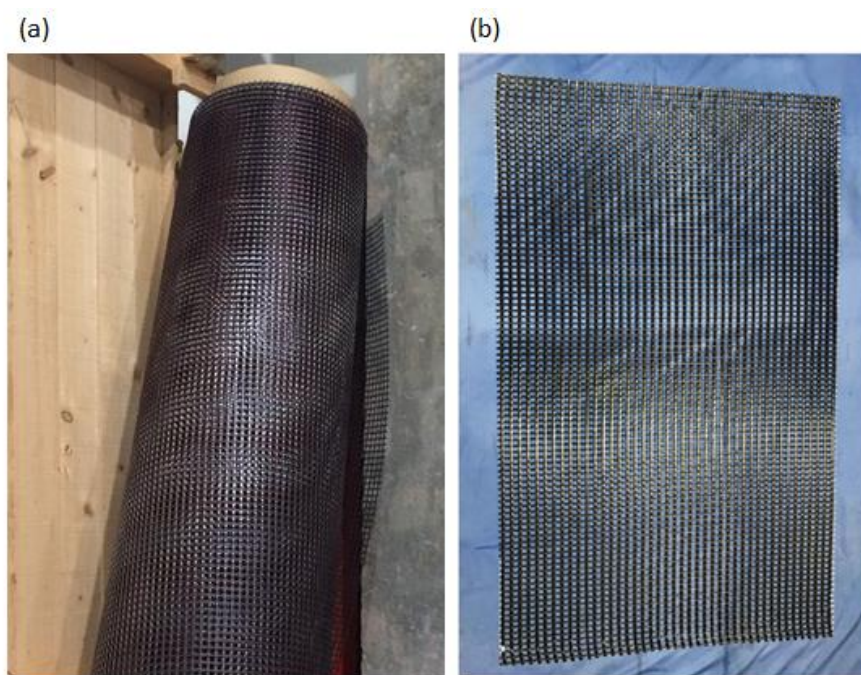


Figura 3.7 – Tecido de fibra de carbono (a) fornecido pela V.Fraas, em forma de rolo; (b) fornecido pela Solidian, em forma de folha.

A abertura de malha dos tecidos é diferente e suas dimensões podem ser vistas na Figura 3.8.

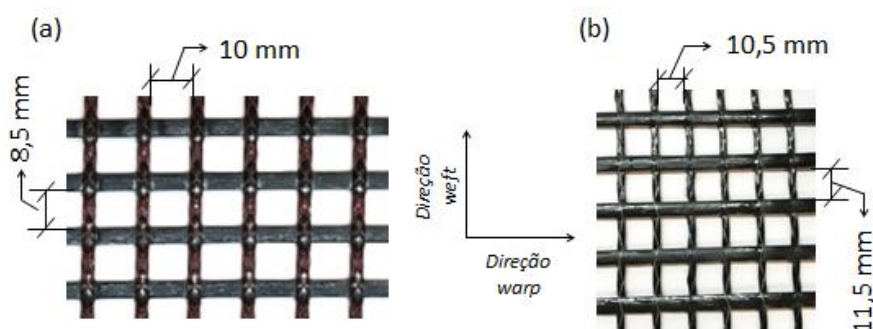


Figura 3.8 – Dimensões da abertura de malha. (a) Tecido de carbono flexível; (b) Tecido de carbono rígido.

Para obter a área da seção transversal do cordão do tecido foram tiradas amostras de cinco cordões diferentes. Essas amostras foram analisadas em um microscópio estereoscópio Nikon, modelo SMZ800N. A partir das imagens obtidas no microscópio, foi possível medir a seção transversal dos cordões com o software de análise digital de imagens, ImageJ. A Tabela 3.4 apresenta o valor da seção transversal obtido para cada amostra, assim como a média.

Tabela 3.4 – Área da seção transversal dos cordões do tecido de carbono.

<i>Tecido Flexível - trama</i>		<i>Tecido Flexível - urdume</i>	
<i>Amostra</i>	<i>Área (mm²)</i>	<i>Amostra</i>	<i>Área (mm²)</i>
1	3,39	1	3,13
2	3,21	2	3,05
3	3,19	3	3,62
4	3,47	4	3,77
5	3,45	5	2,96
<i>Média</i>	<i>3,34 ± 0,119</i>	<i>Média</i>	<i>3,30 ± 0,326</i>

<i>Tecido Rígido - trama</i>		<i>Tecido Rígido - urdume</i>	
<i>Amostra</i>	<i>Área (mm²)</i>	<i>Amostra</i>	<i>Área (mm²)</i>
1	5,45	1	3,827
2	4,36	2	3,864
3	7,29	3	3,426
4	5,498	4	4,071
5	4,589	5	4,085
<i>Média</i>	<i>5,44 ± 1,03</i>	<i>Média</i>	<i>3,85 ± 0,239</i>

As propriedades mecânicas e o tipo de *coating* usado nos tecidos foram obtidos dos fabricantes e podem ser vistas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Propriedades físicas e mecânicas dos tecidos de fibra de carbono. (Fonte: V.Fraas e Solidian).

	Tecido Flexível	Tecido Rígido
Empresa	V.Fraas	Solidian
Modelo	SITgrid017KB	GRID Q 140/110 - CEP -13/17
Coating	SBR - styrene butadiene	Resina epóxi
Propriedades mecânicas		
Resistência à tração (MPa)	4000	1700
Módulo de elasticidade (GPa)	250	não fornecido

Para observar detalhes dos cordões que formam os tecidos e também como é feita a ligação entre cordões da trama com os cordões do urdume, uma amostra de cada tipo de tecido também foi analisada em um microscópio estereoscópio Nikon, modelo SMZ800N.

A Figura 3.9 mostra o tecido de carbono flexível visto no microscópio. Na Figura 3.9.a, é possível ver a abertura da malha do tecido e identificar os filamentos de fibra de carbono que formam os cordões do urdume. O cordão vermelho é que faz a costura entre os cordões da trama e do urdume. Porém não é possível determinar de que material ele é constituído. As Figuras 3.9.b e 3.9.c mostram a região de ligação entre os cordões das duas direções. Como o tecido possui certo relevo nessa região, isto é, um cordão está sobreposto ao outro, é difícil ajustar o foco com o microscópio estereoscópio. Entretanto, ainda assim é possível identificar os filamentos de fibra de carbono. Observam-se também uns pontinhos brancos, principalmente no cordão da trama, que parecem ser acúmulo do material que foi usado para fazer o *coating* do tecido. A Figura 3.9.d mostra a seção transversal de um cordão da trama.

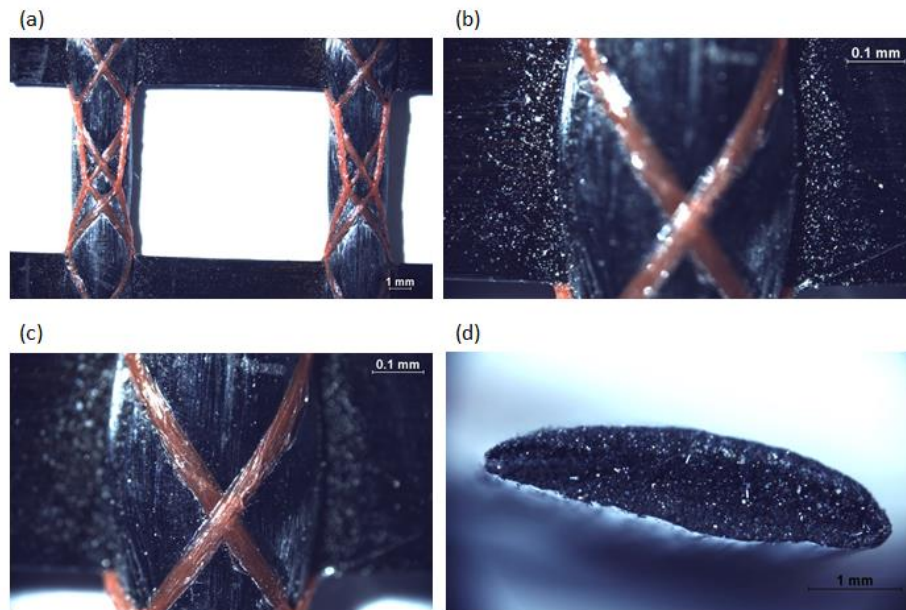


Figura 3.9 – Tecido de carbono flexível visto no microscópio estereoscópio. (a) Abertura de malha do tecido; (b) e (c) região de ligação entre os cordões das duas direções; (d) seção transversal de um cordão da trama.

A Figura 3.10 mostra o tecido de carbono rígido visto no microscópio. Na Figura 3.10.a, é possível observar o filamento que é responsável por fazer a ligação entre os cordões da trama e do urdume. Diferente do tecido de carbono flexível, no tecido de carbono rígido este filamento apresenta coloração cinza. A Figura 3.10.b mostra a região de interseção entre um cordão da trama e um cordão do urdume. Assim como no tecido de carbono flexível, também é difícil ajustar o foco dessa região no tecido de carbono rígido com o microscópio estereoscópio, pois um cordão está sobreposto ao outro, criando planos diferentes. Porém, mesmo com a dificuldade de focalizar os dois cordões simultaneamente, é possível identificar os filamentos de fibra de carbono. Também nesta imagem, podem-se observar pontinhos brancos no cordão da trama, próximo à interseção com o cordão do urdume. Da mesma forma que no tecido de carbono flexível, acredita-se que eles sejam acúmulo do material usado no *coating* do tecido. Na Figura 3.10.c já é possível identificar com mais facilidade os filamentos de fibra de carbono. A Figura 3.10.d apresenta a seção transversal de um cordão da trama.

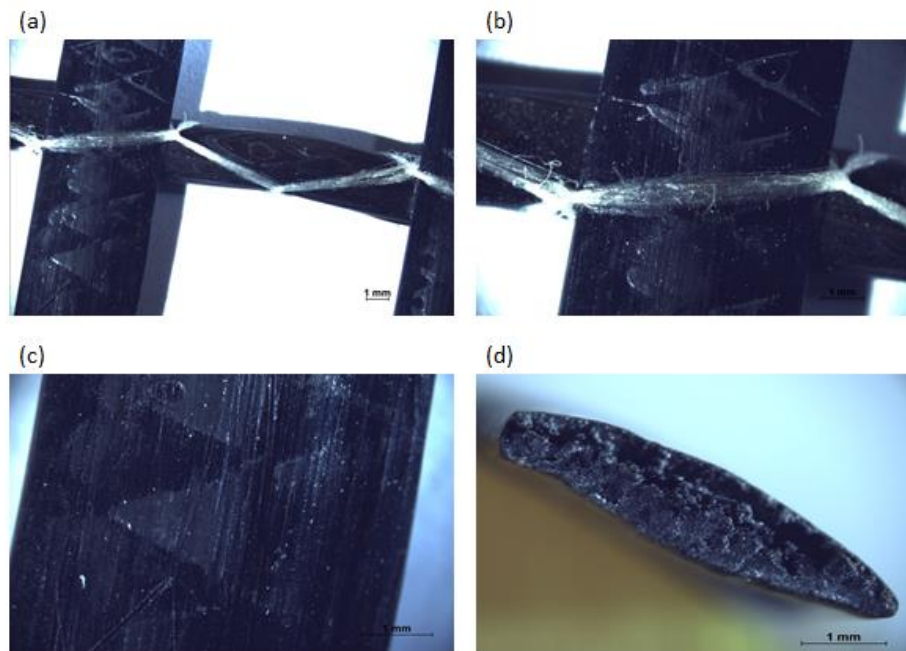


Figura 3.10 – Tecido de carbono rígido visto no microscópio estereoscópio.

(a) Abertura da malha do tecido; (b) região de ligação entre os cordões das duas direções; (c) filamentos de fibra de carbono que formam o cordão da trama; (d) seção transversal de um cordão da trama.

3.3. Fabricação dos compósitos

Para a caracterização do comportamento mecânico do concreto reforçado com tecido de carbono foram realizados ensaios de flexão a quatro pontos, ensaios de tração direta e ensaios de arrancamento. A fabricação dos compósitos variou de acordo com o ensaio ao qual a amostra seria submetida. Para os ensaios de flexão e tração foram fabricadas placas variando-se o número de camadas de reforço (uma ou duas camadas), o tipo de reforço (tecido de carbono flexível ou tecido de carbono rígido) e o uso ou não de um *coating* de resina epóxi e areia. Para os ensaios de arrancamento foram fabricados cilindros variando-se o tipo de reforço e o uso ou não de um *coating* de resina epóxi e areia.

A Figura 3.11 mostra um esquema de como foi feita a identificação das amostras neste trabalho. A nomenclatura adotada indicava o número de camadas de reforço, o tipo de reforço e a presença ou não do *coating*. Por exemplo, uma

amostra identificada como C2R-02 representa o segundo corpo de prova fabricado com duas camadas de tecido de carbono rígido sem a presença do *coating*.

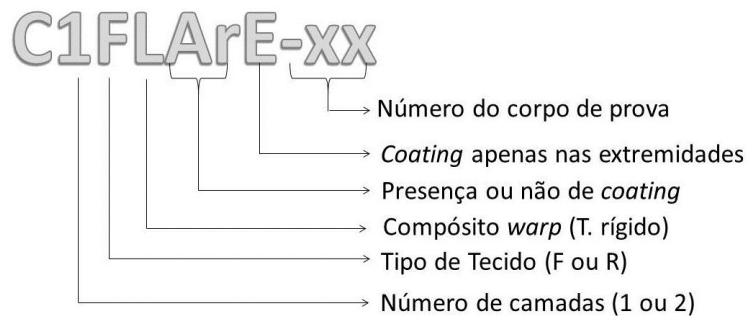


Figura 3.11 - Esquema da identificação dos corpos de prova.

Para a moldagem das placas usadas nos ensaios de flexão e tração foram usados moldes metálicos de 1000 x 120 x 18 mm (comprimento x largura x altura). Os compósitos foram fabricados intercalando-se camadas de matriz e de reforço, até atingir o número de camadas de reforço desejadas, como mostrado na Figura 3.12. A matriz foi misturada de acordo com o item 3.2.1.1. Para que o tecido não sofresse flexão e nem escorregasse durante a moldagem, ele era encaixado nos parafusos existentes nas extremidades do molde.



Figura 3.12 - Fabricação das placas.

As amostras que foram ensaiadas à tração direta apresentaram uma particularidade na hora da moldagem. De forma a reduzir a seção transversal no meio do corpo de prova, foram usadas duas placas de alumínio de 500 x 120 x 1,5 mm (comprimento x largura x espessura), uma embaixo e uma em cima. A Figura

3.13 mostra o processo de fabricação dos compósitos para o ensaio de tração e a Figura 3.14 mostra o detalhe da seção reduzida após a placa ser desenformada.

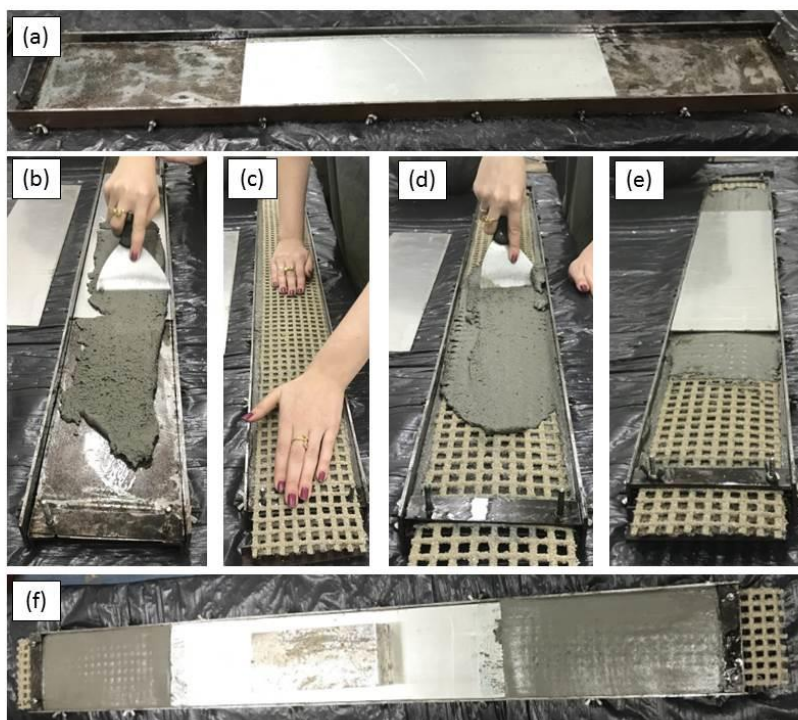


Figura 3.13 – Fabricação das placas para ensaio de tração direta.



Figura 3.14 – Detalhe da seção transversal reduzida nos compósitos ensaiados à tração direta.

A espessura do compósito variou de acordo com o tipo de reforço empregado. Como a espessura dos compósitos em nenhum caso correspondia a

altura total do molde, houve alguma variação de um corpo de prova para o outro e também em um mesmo corpo de prova. A média da espessura obtida para cada tipo de compósito é apresentada nas Tabelas 3.6 e 3.7. Foram feitas seis medidas de espessura e calculada a média aritmética para determinar a espessura de cada corpo de prova.

Tabela 3.6 – Espessura média para cada tipo de compósito ensaiado à flexão.

<i>Amostras para ensaio de flexão</i>	
<i>Compósito</i>	<i>Espessura média (mm)</i>
<i>C1F</i>	$11,2 \pm 0,569$
<i>C1FAr</i>	$9,80 \pm 0,321$
<i>C2F</i>	$12,2 \pm 1,53$
<i>C2FAr</i>	$12,9 \pm 0,603$
<i>C1R</i>	$8,00 \pm 0,340$
<i>C1RAr</i>	$8,30 \pm 0,867$
<i>C2R</i>	$10,4 \pm 0,814$
<i>C2RAr</i>	$12,0 \pm 0,289$
<i>C1RL</i>	$6,90 \pm 0,416$

Tabela 3.7 – Espessura média para cada tipo de compósito ensaiado à tração.

<i>Amostras para ensaio de tração</i>		
<i>Compósito</i>	<i>Espessura média (mm)</i>	
	<i>Extremidades</i>	<i>Área central</i>
<i>C1F</i>	$10,2 \pm 0,879$	
<i>C1FAr</i>	$11,8 \pm 0,687$	$9,23 \pm 0,400$
<i>C1FArE</i>	$11,0 \pm 1,03$	$7,80 \pm 0,778$
<i>C2F</i>	$12,3 \pm 0,898$	
<i>C2FAr</i>	$13,9 \pm 1,29$	$11,4 \pm 0,742$
<i>C2FArE</i>	$13,2 \pm 0,635$	$8,73 \pm 0,661$
<i>C1R</i>	$9,82 \pm 0,526$	$6,39 \pm 0,334$
<i>C1RAr</i>	$11,0 \pm 0,365$	$7,98 \pm 0,251$
<i>C1RArE</i>	$11,2 \pm 0,436$	$6,24 \pm 0,547$
<i>C2R</i>	$12,0 \pm 0,621$	$9,09 \pm 0,309$
<i>C2RAr</i>	$14,1 \pm 0,450$	$11,4 \pm 0,541$
<i>C2RArE</i>	$14,1 \pm 0,717$	$8,89 \pm 0,533$
<i>C1RL</i>	$8,30 \pm 0,693$	$5,77 \pm 0,385$

Após aproximadamente 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram desenformados. Para a cura, eles foram molhados e embalados em plástico filme e armazenados em sala com temperatura e umidade controladas com valores de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $55\% \pm 5\%$, respectivamente, até a data do ensaio. A Figura 3.15 apresenta o processo de cura das amostras.



Figura 3.15 – Amostras embaladas em plástico filme curando em sala com temperatura controlada.

Para a moldagem dos cilindros usados no ensaio de arrancamento foram utilizados moldes de PVC de 25 x 20 mm (diâmetro x altura) apoiados em uma base acrílica. A matriz foi misturada de acordo com o item 3.2.1.1 e colocada nos moldes. Em seguida, um cordão do tecido de carbono foi posicionado no centro dos cilindros, com comprimento de embebiamento de 20 mm. Foi usada uma base superior de acrílico com um rasgo central na qual os cordões foram presos, para impedir sua movimentação durante o endurecimento da matriz. O processo de fabricação desses corpos de prova pode ser visto na Figura 3.16. As amostras foram desenformadas após aproximadamente 24 horas da moldagem e foram mantidas em câmara úmida com umidade de 100% e temperatura de $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ até o momento do ensaio.

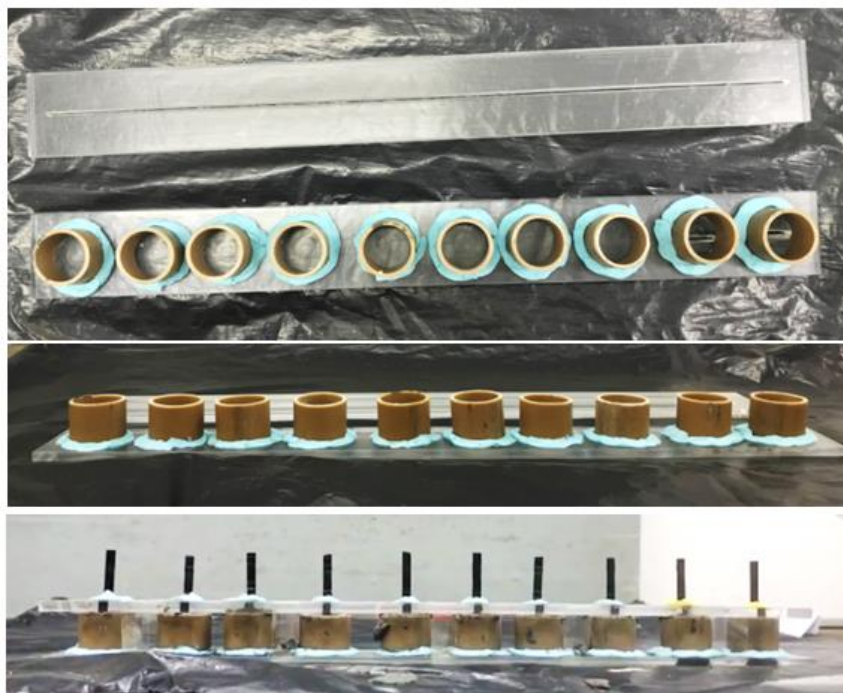


Figura 3.16 – Moldes de PVC e corpos de prova para ensaio de arrancamento moldados.

O *coating* usado neste trabalho, como já dito anteriormente, consiste em uma resina epóxi e areia. A resina epóxi utilizada foi o Sikadur®-32 e a areia possuía granulometria igual a da areia usada como agregado miúdo na matriz. A aplicação do *coating* nos tecidos se deu como mostrado na Figura 3.17.a. A resina era espalhada sobre os dois lados do tecido com o auxílio de uma esponja. Em seguida, era polvilhada a areia, aproximadamente 100g para cada tecido. Esse processo era sempre realizado pelo menos 24 horas antes da fabricação de um compósito, para que durante a moldagem a resina já estivesse seca.

Para as amostras ensaiadas à tração, a influência do *coating* foi analisada tanto quando aplicado no tecido inteiro quanto apenas nas extremidades (150 mm), como mostrado na Figura 3.17.b, onde durante o ensaio ocorreu a transferência das cargas.

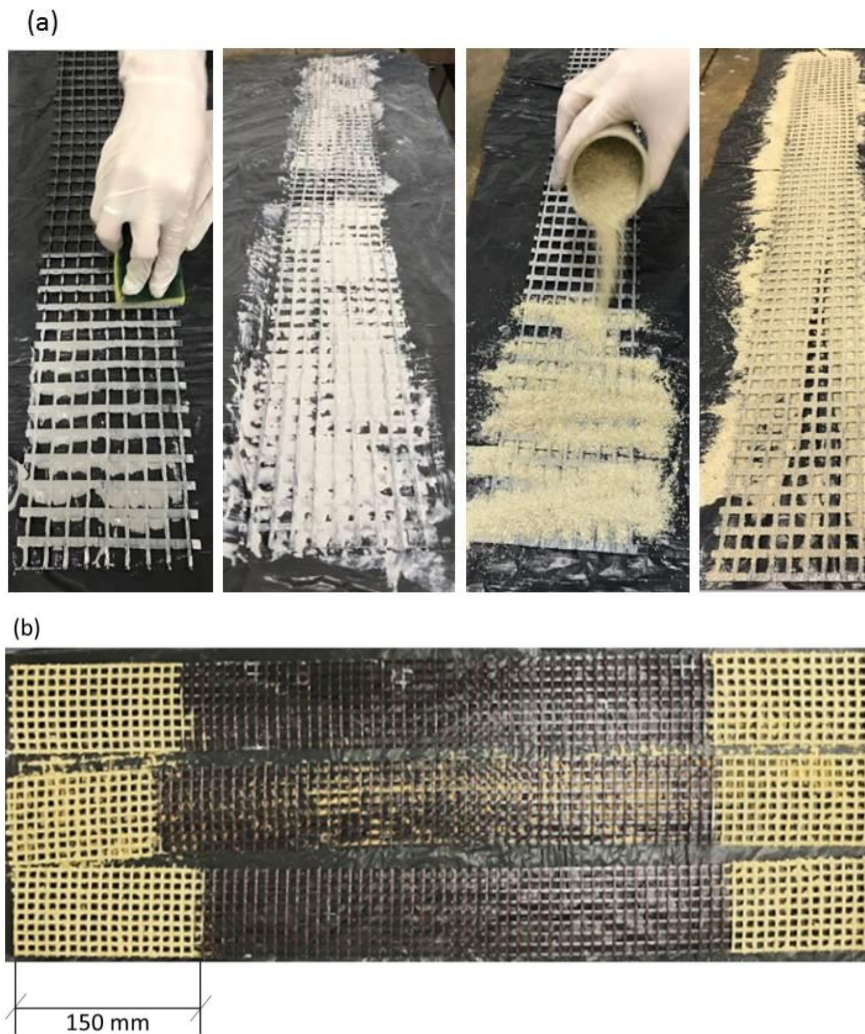


Figura 3.17 – (a) Processo de aplicação do *coating* nos tecidos; (b) *coating* aplicado apenas nas extremidades.

3.4. Comportamento mecânico

Para a caracterização do comportamento mecânico do concreto têxtil com fibra de carbono foram realizados ensaios de tração direta, ensaios de flexão a quatro pontos e ensaios de arrancamento.

3.4.1. Ensaio de tração direta

Ensaio de tração direta foram realizados em um sistema universal de testes MTS com capacidade de 1000 kN. O controle do ensaio foi feito por deslocamento, a uma taxa de 0,5 mm/min e as amostras foram ensaiadas aos 28 dias.

A Figura 3.18 mostra o arranjo experimental do ensaio de tração direta. As amostras foram fixadas em placas de aço com parafusos e o conjunto foi preso à máquina. Para garantir que não houvesse deslizamento da amostra dentro da placa de aço durante o ensaio, os parafusos foram apertados com o auxílio de um torquímetro. Para torques de até 25 Nm foi utilizado um torquímetro de estalo (Figura 3.19.a) e para torques acima de 25 Nm, um torquímetro de relógio com ponteiro de arraste (Figura 3.19.b). Além disso, também com o objetivo de evitar o deslizamento da amostra durante o ensaio, lixas foram coladas na parte da amostra que estava em contato com a placa de aço. O número de parafusos, o torque e a área de contato entre a placa de aço e a amostra variaram de acordo com o tipo de compósito, como será explicado mais adiante. Para cada tipo de compósito foram ensaiadas pelo menos quatro amostras.

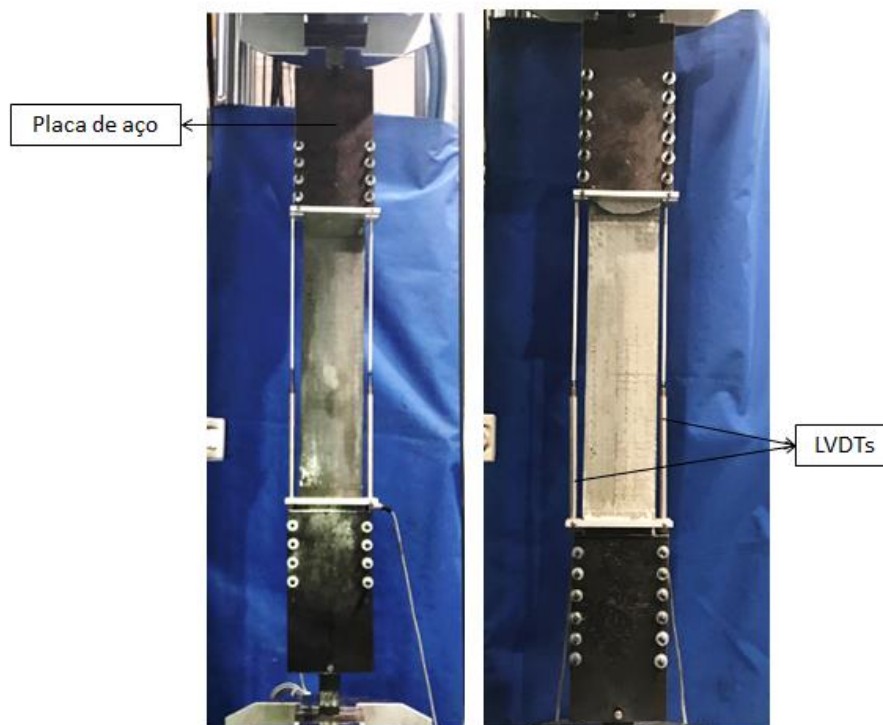


Figura 3.18 – Arranjo experimental do ensaio de tração direta

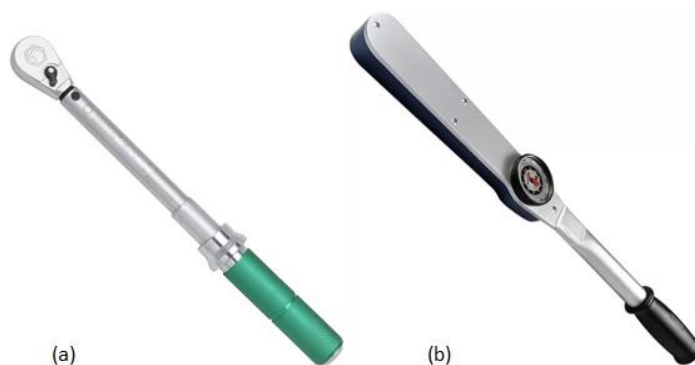


Figura 3.19 – Torquímetros usados para montagem do arranjo experimental do ensaio de tração. (a) Torquímetro de estalo; (b) torquímetro de relógio com ponteiro de arraste.

Os deslocamentos das amostras foram obtidos com o auxílio de dois LVDTs, cada um com 250 mm de comprimento útil para medição. Como o comprimento livre entre placas de aço (l_0) no qual se desejava obter o deslocamento era maior que o comprimento útil de medição de LVDT foi necessário usar um extensor, que consistia em uma haste de alumínio enroscada na ponta do LVDT.

Em um ensaio de tração direta, as condições de contorno são imprescindíveis para que ocorra a ruptura da amostra no trecho central e, não o seu deslizamento na máquina. Neste trabalho, as condições de contorno do ensaio correspondem ao número de parafusos da placa de aço, o torque dado nesses parafusos e a área de contato entre a placa de aço e a amostra.

A Figura 3.20 apresenta os resultados de uma amostra submetida a ensaio de tração direta na qual as condições de contorno não estavam adequadas ao tipo de compósito. É possível observar que a curva é crescente até certo valor de tensão, seguida de uma queda brusca. Porém, logo em seguida a curva volta a subir, com a mesma inclinação do trecho anterior. Cada queda do gráfico representa o momento no qual a amostra escorregou dentro da placa de aço.

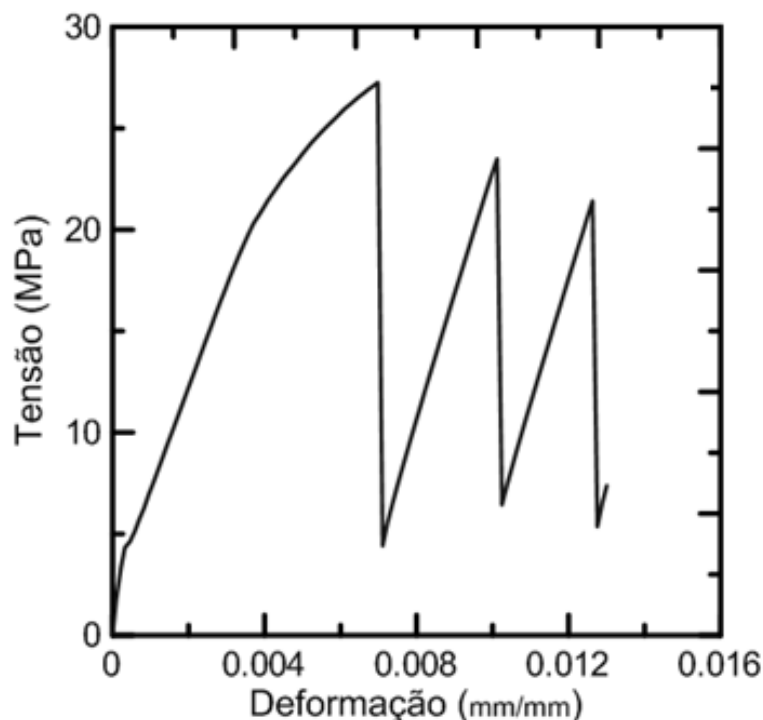


Figura 3.20 – Curva tensão *versus* deformação de uma amostra submetida a ensaio de tração direta cujas condições de contorno não estavam adequadas.

Para determinar as condições de contorno que foram usadas foi tomado como base o trabalho de Bahr [67]. O primeiro tipo de compósito a ser ensaiado foi o reforçado com uma camada do tecido de carbono flexível (C1F). Em seguida, foram ensaiados os compósitos reforçados com duas camadas do tecido de carbono flexível (C2F). As amostras destes dois tipos de compósitos romperam dentro das placas de aço, onde a concentração de tensões é maior. A fim de tentar com que a ruptura ocorresse entre as placas de aço, os compósitos fabricados a partir de então foram feitos com o auxílio da placa de alumínio, reduzindo-se assim a seção transversal no meio da amostra, como explicado no item 3.3. Além disso, a área de contato entre a placa de aço e a amostra também foi aumentada, para que a tensão fosse melhor distribuída. Quanto mais resistente o compósito, mais difícil de evitar o seu deslizamento e garantir a sua ruptura. Por esse motivo, além de aumentar o torque e a área de contato entre a placa de aço e a amostra, a partir de certo ponto, também foi necessário aumentar o número de parafusos.

A Tabela 3.8 mostra as condições de contorno (número de parafusos, torque e área de contato entre a placa de aço e o corpo de prova) para cada amostra ensaiada à tração direta.

Tabela 3.8 – Resumo das condições de contorno de cada amostra ensaiada na tração direta.

<i>Amostra</i>	<i>Nº de parafusos por placa de aço</i>	<i>Torque (Nm)</i>	<i>Área de contato (mm²)</i>	<i>Amostra</i>	<i>Nº de parafusos por placa de aço</i>	<i>Torque (Nm)</i>	<i>Área de contato (mm²)</i>
C1F-04	8	18	18000	C1R-04	10	18	24000
C1F-05	8	18	18000	C1R-05	10	18	24000
C1F-06	8	18	18000	C1R-06	10	18	24000
C1F-07	8	18	18000	C1R-07	10	18	24000
C1F-08	8	18	18000	C2R-04	10	18	24000
C2F-04	8	18	18000	C2R-05	10	20	24000
C2F-05	8	18	18000	C2R-06	10	20	24000
C2F-06	8	18	18000	C2R-07	10	22	24000
C2F-07	8	18	18000	C2R-08	10	25	24000
C2F-08	8	18	18000	C2R-09	12	29	24000
C1FAr-04	8	18	24000	C2R-10	12	32	24000
C1FAr-05	8	19	24000	C2R-11	12	34	24000
C1FAr-06	8	19	24000	C1RAr-04	10	29	24000
C1FAr-07	8	19	24000	C1RAr-05	10	29	24000
C1FAr-08	8	19	24000	C1RAr-06	10	29	24000
C1FArE-01	8	19	24000	C1RAr-07	10	29	24000
C1FArE-02	8	19	24000	C1RAr-08	10	29	24000
C1FArE-03	8	19	24000	C1RArE-01	10	29	24000
C1FArE-04	8	19	24000	C1RArE-02	10	29	24000
C1FArE-05	8	19	24000	C1RArE-03	10	29	24000
C2FAr-04	8	19	24000	C1RArE-04	10	29	24000
C2FAr-05	8	20	24000	C1RArE-05	10	29	24000
C2FAr-06	10	22	24000	C2RAr-04	10	29	24000
C2FAr-07	10	25	24000	C2RAr-05	10	34	24000
C2FAr-08	10	25	24000	C2RAr-06	10	39	24000
C2FAr-09	10	25	24000	C2RAr-07	10	44	24000
C2FAr-10	10	25	24000	C2RArE-01	10	44	24000
C2FAr-11	10	25	24000	C2RArE-02	10	44	24000
C2FArE-01	10	25	24000	C2RArE-03	10	44	24000
C2FArE-02	10	25	24000	C2RArE-04	10	44	24000
C2FArE-03	10	25	24000	C1RL-04	12	29	26400
C2FArE-04	10	25	24000	C1RL-05	12	29	26400
C2FArE-05	10	25	24000	C1RL-06	12	29	26400
				C1RL-07	12	29	26400

3.4.2. Ensaio de flexão

Ensaio de flexão a quatro pontos foram realizados em um sistema universal de testes MTS com capacidade de 100 kN. O controle do ensaio foi feito por

deslocamento, a uma taxa de 1,5 mm/min e as amostras foram ensaiadas aos 28 dias.

A Figura 3.21 mostra o arranjo experimental usado no ensaio de flexão. O vão entre os apoios era de 500 mm e as cargas foram aplicadas a 1/3 do vão. A fim de obter as deformações de compressão e de tração, dois extensômetros foram colados no corpo de prova, um na superfície superior e o outro na inferior. Para a obtenção do deslocamento no meio do vão foi usado um transdutor de deslocamento, com capacidade de leitura máxima de 100 mm, apoiado em uma haste metálica colada no centro do corpo de prova. Como a superfície superior do corpo de prova não era homogênea, embaixo dos roletes de aplicação de carga foi colocada areia úmida, a fim de distribuir uniformemente a carga aplicada.

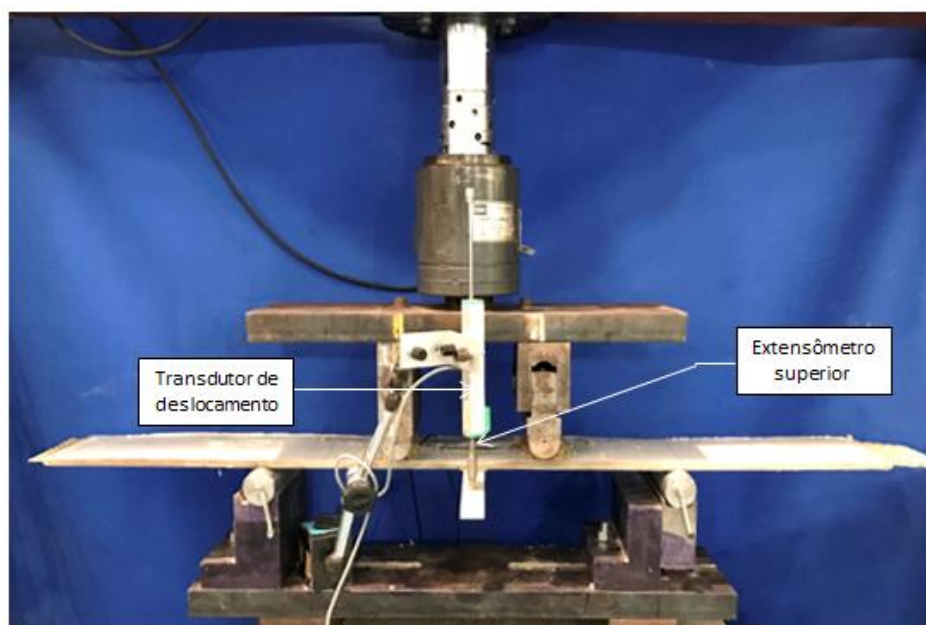


Figura 3.21 – Arranjo experimental do ensaio de flexão a quatro pontos.

3.4.3. Ensaio de arrancamento

Ensaio de arrancamento foram realizados para avaliar a interface reforço-matriz dos compósitos. Os ensaios foram realizados em um equipamento do tipo MTS, modelo 810 com capacidade de carga de 250 kN. Foi utilizada uma célula de carga de 2,5 kN para aquisição mais precisa dos carregamentos. O controle dos ensaios foi feito por deslocamento, a uma taxa de 1,5 mm/min. As amostras foram

ensaiadas aos sete dias, pois o objetivo do ensaio era comparar a interface reforço-matriz dos dois tipos de tecido e avaliar a influência do *coating*. Além disso, a resistência à compressão da matriz aos sete dias é de aproximadamente 50% da resistência aos 28 dias.

A Figura 3.22 mostra o arranjo experimental do ensaio de arrancamento. As amostras foram fixadas em garras com um sistema de condições de contorno fixas.

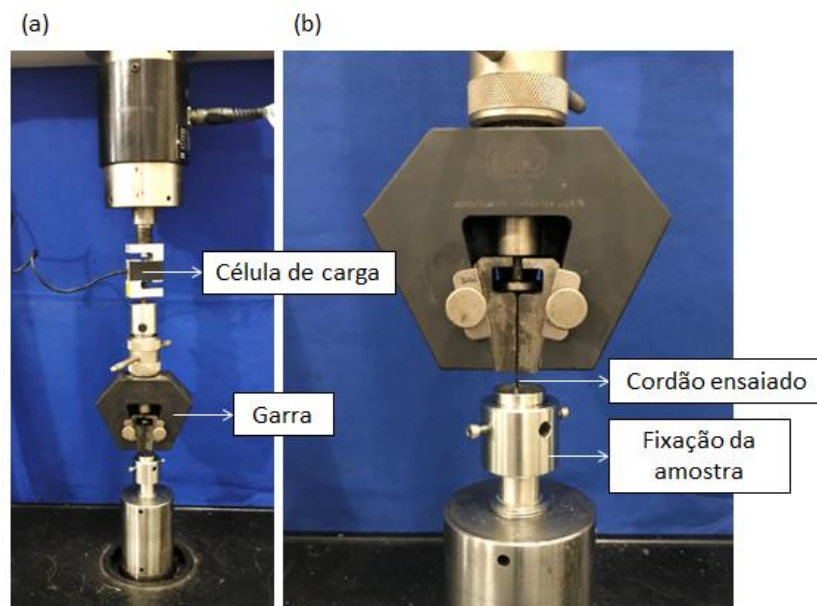


Figura 3.22 – (a) Arranjo experimental do ensaio de arrancamento. (b) Arranjo experimental do ensaio de arrancamento em detalhe.

Os deslizamentos dos cordões foram obtidos diretamente do deslocamento da máquina. Trindade [68] realizou testes de arrancamento em diferentes fibras com o auxílio de um LVDT para aquisição dos deslizamentos e constatou que eles eram similares aos deslocamentos obtidos pela máquina.

3.5. Resultados e discussão

3.5.1. Ensaios de tração direta

A tensão de tração foi obtida através da relação da carga aplicada e a área do compósito (largura x espessura).

Os compósitos estudados neste trabalho apresentaram comportamento *strain-hardening* na tração direta. A curva tensão de tração *versus* deformação obtida dos ensaios pode ser dividida em quatro zonas, identificadas por algarismos romanos na Figura 3.23. A Zona I corresponde à região linear elástica, na qual a matriz e o reforço se comportam linearmente [11]. O limite da Zona I é o ponto onde ocorre a primeira fissura da matriz, chamada de *bend over point* (BOP) [69].

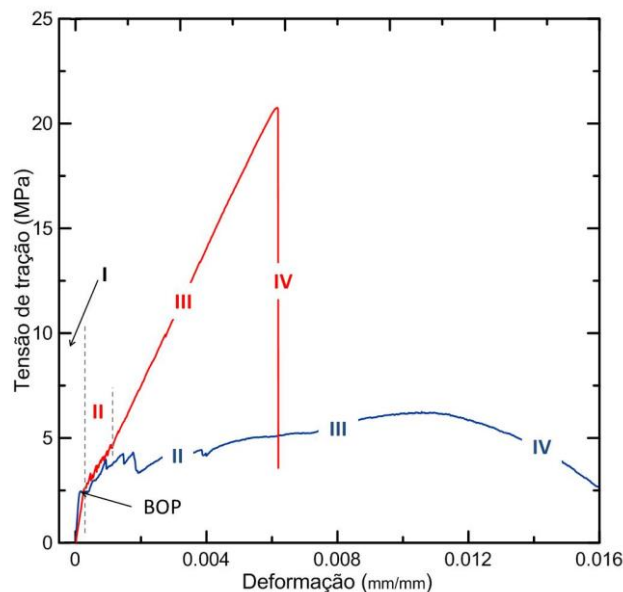


Figura 3.23 – Curvas tensão de tração *versus* deformação características dos comportamentos mecânicos obtidos para os concretos têxteis reforçados com tecido de carbono.

Após a abertura da primeira fissura ocorre o processo de múltipla fissuração, que corresponde à Zona II [3]. A abertura de novas fissuras na matriz ocorre em intervalos aproximadamente regulares, o que pode estar relacionado à geometria do tecido e à interface tecido-matriz [70].

Quando há o esgotamento da abertura de novas fissuras, as fissuras existentes começam a abrir. Na Zona III, então, não há o aparecimento de novas fissuras, existindo apenas o aumento daquelas já existentes até que ocorre a localização de uma fissura [3]. A Zona III é governada principalmente pelas características do tecido [70].

A partir da localização de uma fissura dois comportamentos podem ser identificados. Quando a aderência entre o tecido e a matriz é fraca há o deslizamento do tecido até a ruptura do material. A Zona IV deste compósito é caracterizada por um comportamento *strain-softening*. No caso dos compósitos

cuja aderência entre o reforço e a matriz é maior, após a localização de uma fissura, ocorre a ruptura frágil do tecido de fibra de carbono e consequente ruptura do compósito.

As Figuras 3.24 a 3.26 e a Tabela 3.9 apresentam os resultados obtidos no ensaio de tração direta para os compósitos reforçados com tecido de carbono flexível. Foram feitos de quatro a cinco ensaios para cada tipo de compósito e as curvas tensão de tração *versus* deformação e os resultados representam a média. As curvas para cada amostra estão no Apêndice A. Os valores do desvio padrão estão entre parênteses na Tabela 3.9. É importante ressaltar que nesta etapa do trabalho, cada gráfico possui uma escala. Isto foi feito para que fosse possível observar todos os detalhes das curvas, uma vez que as tensões máximas são bastante diferentes entre si.

A partir da Figura 3.24, é possível notar que os compósitos reforçados com duas camadas são mais resistentes que os reforçados com uma camada, o que já era esperado uma vez que se aumentou a fração volumétrica do reforço. A tensão máxima dos compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono flexível é 1,3 vezes maior do que a dos compósitos com uma camada. A rigidez após a múltipla fissuração e o nível de deformação no qual o compósito atingiu a tensão máxima são maiores para as amostras reforçadas com duas camadas de tecido de carbono flexível.

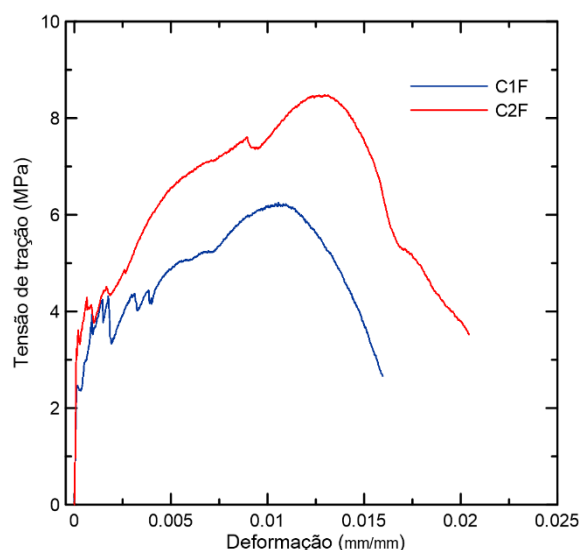


Figura 3.24 – Curvas tensão de tração *versus* deformação dos compósitos reforçados com uma (C1F) e duas (C2F) camadas de tecido de carbono flexível.

A partir das Figuras 3.25 e 3.26, é possível perceber que os compósitos reforçados com uma e duas camadas de tecido de carbono flexível sem *coating* atingem tensões de tração inferiores àqueles reforçados com tecido de carbono com *coating*, seja no tecido todo ou apenas nas extremidades. Além disso, os compósitos reforçados com tecido de carbono sem *coating* apresentam comportamento *strain-softening* na Zona IV. Isto pode ser explicado pela aderência entre o tecido de carbono e a matriz. Quando é aplicada uma camada de resina epóxi com areia no tecido, a aderência entre o reforço e a matriz se torna mais eficiente, melhorando o comportamento mecânico do compósito [18].

Para compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível, a tensão de tração máxima das amostras com *coating* é 2,9 vezes maior que a das sem *coating*. Para as amostras nas quais o *coating* foi aplicado apenas nas extremidades do tecido, a tensão de tração máxima é 4 vezes maior que a das amostras sem *coating*.

Para compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono flexível, as amostras impregnadas com *coating* apresentam tensões de tração máxima 3,9 vezes maior que a das amostras não impregnadas. Para as amostras nos quais o *coating* foi aplicado apenas nas extremidades, a tensão de tração máxima é até 5 vezes maior que a das amostras não impregnadas.

A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que a adição do *coating* de resina epóxi e areia é mais eficaz em aumentar a tensão de tração máxima dos compósitos reforçados com tecido de carbono flexível do que o aumento do número de camadas de tecido.

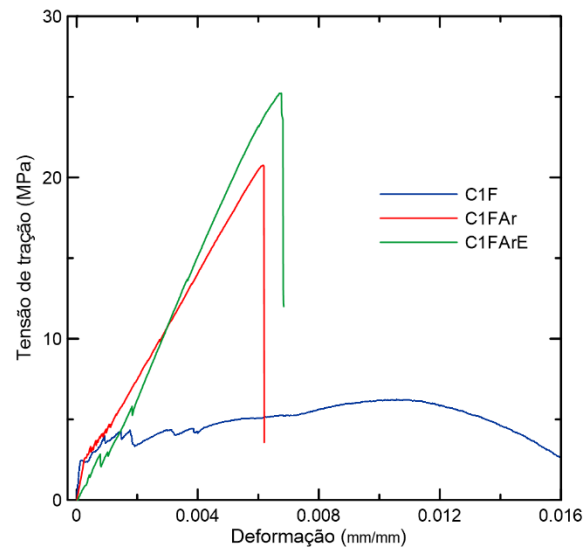


Figura 3.25 – Curvas tensão de tração *versus* deformação dos compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível (C1F), com *coating* (C1FAr) e com *coating* apenas nas extremidades (C1FArE).

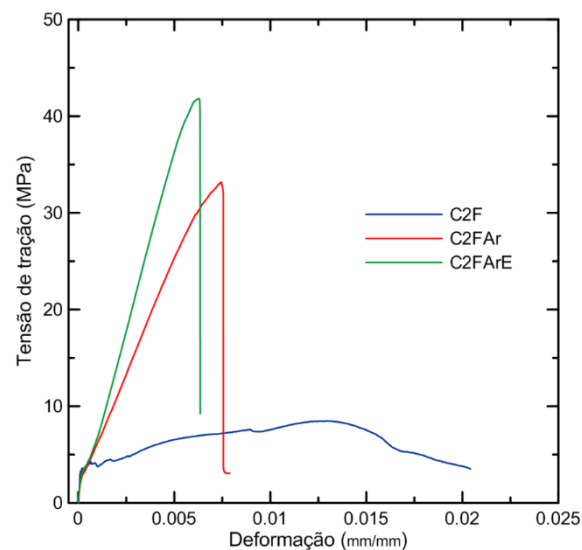


Figura 3.26 – Curvas tensão de tração *versus* deformação dos compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono flexível (C2F), com *coating* (C2FAr) e com *coating* apenas nas extremidades (C2FArE).

Tabela 3.9 – Resultados obtidos nos ensaios de tração direta para os compósitos reforçados com tecido de carbono flexível.

<i>CP</i>	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\varepsilon_{\sigma,m\acute{a}x}$ (mm/mm)	σ_{BOP} (MPa)	ε_{BOP} (mm/mm)
<i>C1F</i>	6,49 (0,664)	0,0120 (0,00169)	2,59 (0,562)	0,000151 (0,0000854)
<i>C1F_{Ar}</i>	19,1 (2,59)	0,00554 (0,00100)	2,53 (0,463)	0,000265 (0,0000547)
<i>C1F_{ArE}</i>	25,8 (2,85)	0,00655 (0,000425)	1,82 (0,548)	0,000273 (0,0000758)
<i>C2F</i>	8,34 (0,619)	0,0130 (0,0114)	3,66 (0,611)	0,000179 (0,0000628)
<i>C2F_{Ar}</i>	32,8 (4,82)	0,00773 (0,00216)	2,54 (0,340)	0,000115 (0,0000448)
<i>C2F_{ArE}</i>	41,9 (1,96)	0,00704 (0,000878)	2,68 (0,360)	0,000180 (0,0000253)

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = tensão de tração máxima;

$\varepsilon_{\sigma,m\acute{a}x}$ = deformação na tensão de tração máxima;

σ_{BOP} = tensão de primeira fissura; ε_{BOP} = deformação de primeira fissura.

Valores do desvio padrão entre parênteses.

As Figuras 3.27 a 3.30 e a Tabela 3.10 apresentam os resultados obtidos no ensaio de tração direta para os compósitos reforçados com tecido de carbono rígido. Foram feitos de quatro a cinco ensaios para cada tipo de compósito e as curvas tensão de tração *versus* deformação e os valores apresentados representam a média. Os valores do desvio padrão estão entre parênteses na Tabela 3.10. Assim como nas curvas dos compósitos reforçados com tecido de fibra de carbono flexível, cada gráfico dos compósitos reforçados com tecido de fibra de carbono rígido possui uma escala. Isto foi feito para que fosse possível observar todos os detalhes das curvas, uma vez que as tensões máximas são bastante diferentes entre si.

Era esperado que os compósitos reforçados com duas camadas de tecido apresentassem comportamento mecânico superior aos compósitos reforçados com uma camada. Entretanto, o compósito reforçado com duas camadas de tecido de carbono rígido apresenta tensão de tração máxima inferior ao compósito reforçado com uma camada de tecido de carbono rígido (Figura 3.27). É provável que as condições de contorno para o compósito reforçado com duas camadas de tecido de carbono rígido não estivessem apropriadas a este tipo de material, de forma que a

sua resistência à tração não foi alcançada. A rigidez após a múltipla fissuração dos compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono rígido é maior que para os reforçados com apenas uma camada.

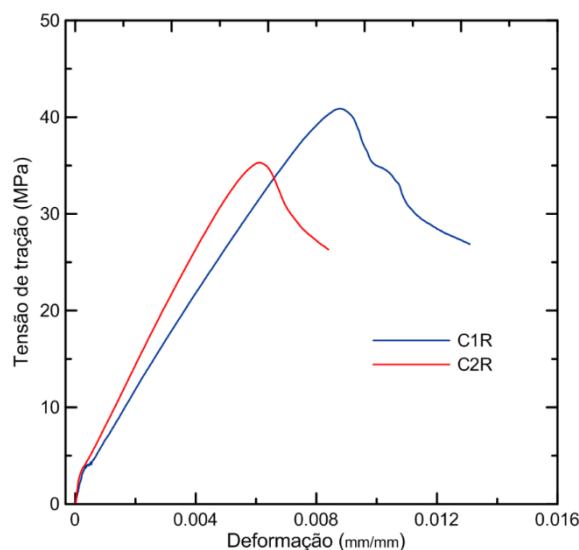


Figura 3.27 – Curvas tensão de tração *versus* deformação dos compósitos reforçados com uma (C1R) e duas (C2R) camadas de tecido de carbono rígido.

Devido à forma com que o tecido de carbono rígido estava disponível, a fim de evitar desperdício do material, para a avaliação da influência de uma camada de *coating* feita com resina epóxi e areia, os compósitos reforçados com tecido de carbono rígido foram fabricados com os cordões urdume do tecido na direção de aplicação da carga durante os ensaios (compósitos *weft*). Como a trama é a direção principal do tecido de carbono rígido, foram feitos compósitos com a trama na direção de aplicação da carga durante os ensaios (compósito *warp*) para analisar a diferença do comportamento mecânico entre as duas direções. Era esperado que o compósito *warp* apresentasse comportamento mecânico superior ao compósito *weft*.

Como pode ser observado na Figura 3.28, a tensão de tração máxima e a rigidez após a múltipla fissuração dos dois compósitos são aproximadamente iguais. Entretanto, pode-se dizer que o compósito *warp* é mais eficiente que do compósito *weft*, pois ele não apresenta perda de rigidez, isto é, a inclinação da curva tensão *versus* deformação não diminui após a primeira fissura. O compósito *warp* apresenta comportamento mecânico mais linear e homogêneo do que o compósito *weft*. Por outro lado, a ruptura do compósito *weft* é mais dúctil.

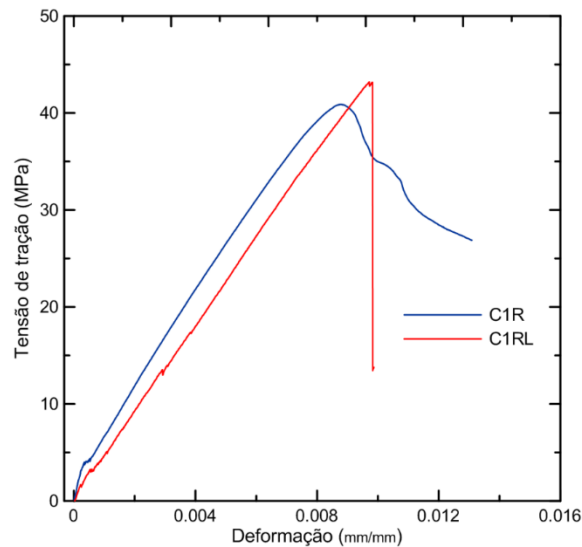


Figura 3.28 – Curvas tensão de tração *versus* deformação dos compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono rígido com urdume (C1R) e trama (C1RL) na direção do carregamento.

Assim como observado nos compósitos reforçados com tecido de carbono flexível, os compósitos reforçados com uma e duas camadas de tecido de carbono rígido sem *coating* apresentam valores de tensão de tração inferiores àqueles com tecido de carbono rígido com *coating* (Figuras 3.29 e 3.30).

Para compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono rígido (Figura 3.29), a tensão de tração máxima das amostras com *coating*, tanto no tecido todo quanto apenas nas extremidades, é até 1,3 vezes maior que a das amostras sem *coating*.

Para compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono rígido (Figura 3.30), a tensão de tração máxima das amostras com *coating* é até 1,5 vezes maior que a das amostras sem *coating*. Para compósitos nos quais o *coating* foi aplicado apenas nas extremidades dos tecidos, a tensão máxima das amostras com *coating* é até 2 vezes maior que a das amostras sem *coating*.

As amostras com tecido de carbono rígido apresentam diferença entre os valores de tensão de tração máxima entre os compósitos com e sem *coating* menor que as amostras com tecido de carbono flexível. O *coating* polimérico usado na fabricação dos tecidos pode estar relacionado a este fato. O *coating* polimérico usado no tecido de carbono rígido se mostrou mais eficiente que o *coating* polimérico do tecido de carbono flexível. Dessa forma, a adição de uma camada

de resina epóxi e areia não influencia de forma tão significativa na aderência entre o reforço e a matriz.

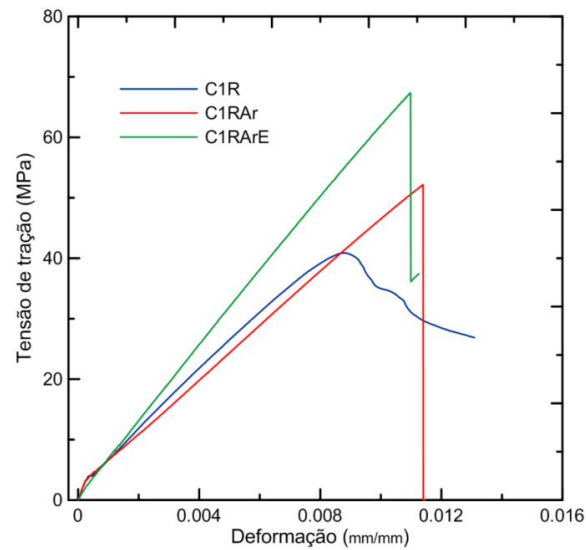


Figura 3.29 – Curvas tensão de tração *versus* deformação dos compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono rígido (C1R), com *coating* (C1RAr) e com *coating* apenas nas extremidades (C1RArE).

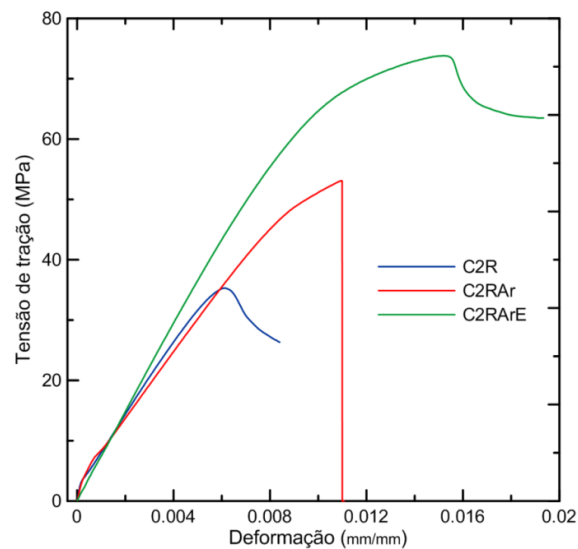


Figura 3.30 – Curvas tensão de tração *versus* deformação dos compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono rígido (C2R), com *coating* (C2RAr) e com *coating* apenas nas extremidades (C2RArE).

Tabela 3.10 – Resultados obtidos nos ensaios de tração direta para os compósitos reforçados com tecido de carbono rígido.

<i>CP</i>	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\varepsilon_{\sigma,m\acute{a}x}$ (mm/mm)	σ_{BOP} (MPa)	ε_{BOP} (mm/mm)
<i>C1R</i>	41,3 (8,00)	0,00810 (0,00101)	2,59 (0,142)	0,000185 (0,0000226)
<i>C1RL</i>	46,3 (6,01)	0,0100 (0,000697)	1,39 (0,615)	0,000181 (0,0000920)
<i>C1RAr</i>	52,4 (3,73)	0,0122 (0,00145)	2,60 (0,548)	0,000243 (0,0000665)
<i>C1RArE</i>	54,2 (10,1)	0,0106 (0,00646)	2,42 (0,873)	0,000268 (0,000115)
<i>C2R</i>	33,8 (5,33)	0,00511 (0,000751)	3,15 (0,460)	0,000176 (0,0000472)
<i>C2RAr</i>	51,6 (5,17)	0,0118 (0,00135)	2,98 (0,491)	0,000185 (0,0000993)
<i>C2RArE</i>	67,0 (10,20)	0,0162 (0,00317)	1,78 (0,200)	0,000110 (0,0000325)

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = tensão de tração máxima;

$\varepsilon_{\sigma,m\acute{a}x}$ = deformação na tensão de tração máxima;

σ_{BOP} = tensão de primeira fissura; ε_{BOP} = deformação de primeira fissura.

Valores do desvio padrão entre parênteses.

Em alguns casos, não é possível identificar na curva tensão de tração *versus* deformação o ponto onde ocorre a primeira fissura da matriz (BOP). Além de a abertura das fissuras ser muito pequena, e por isso a queda no gráfico é imperceptível, o compósito possui um comportamento quase linear até níveis de tensão próximo à tensão máxima (Figura 3.31), indicando a boa aderência entre o reforço e a matriz. Ou seja, o compósito funciona como um material homogêneo.

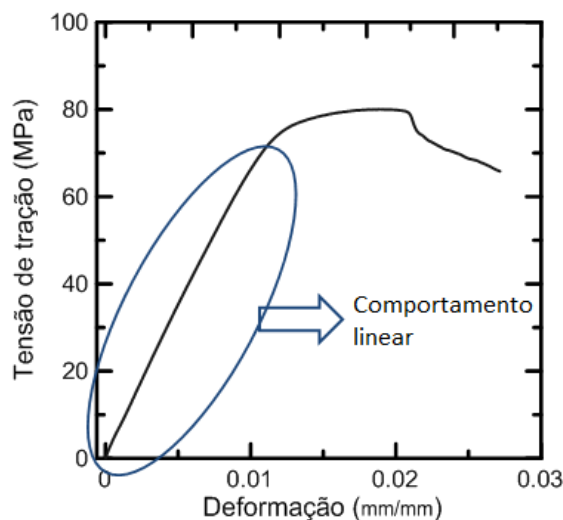


Figura 3.31 – Curva tensão de tração *versus* deformação do compósito reforçado com duas camadas de tecido de carbono rígido com areia apenas nas extremidades (C2RArE) exemplificando o comportamento linear do material até níveis de tensão próximos à tensão máxima.

A Figura 3.32 apresenta as curvas tensão de tração versus deformação dos concretos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível e rígido sem adição do *coating*. A tensão de tração máxima das amostras reforçadas com tecido de carbono rígido é até 6,4 vezes maior que a das amostras reforçadas com tecido de carbono flexível. Além disso, a rigidez após a múltipla fissuração dos compósitos com tecido de carbono rígido é maior que a dos compósitos com tecido de carbono flexível.

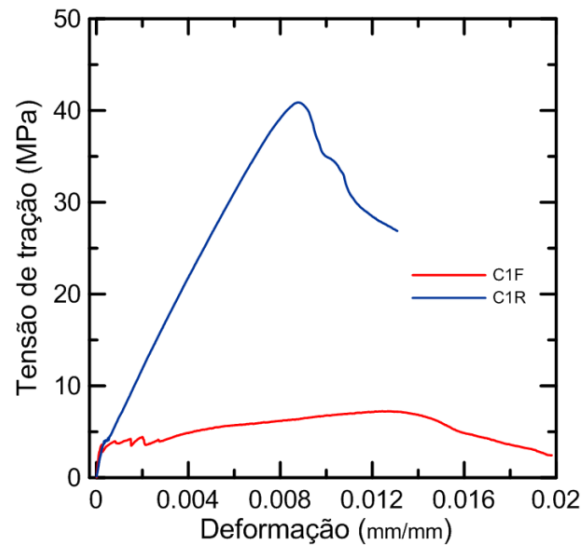


Figura 3.32 – Curvas tensão de tração *versus* deformação dos compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível (C1F) e rígido (C1R).

A Figura 3.33 apresenta uma comparação dos valores de tensão de tração máxima disponíveis na literatura e encontradas neste trabalho. Alguns autores utilizam apenas a área do reforço têxtil e não a área do compósito para o cálculo da tensão de tração. Então, para que fosse possível realizar a comparação, foi realizado o cálculo da tensão de tração máxima obtida utilizando esta metodologia. É possível observar que os valores encontrados neste trabalho estão de acordo com os resultados disponíveis na literatura.

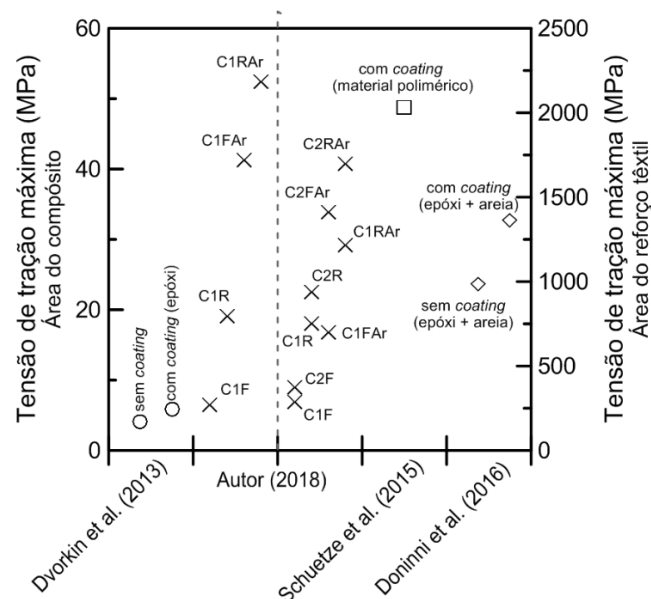


Figura 3.33 – Comparação dos valores de tensão de tração máxima encontradas neste trabalho com resultados disponíveis na literatura.

A Figura 3.34 apresenta curvas tensão de tração *versus* deformação de concretos reforçados com tecido de sisal [69], AR-glass [63], basalto [70] e curauá [71]. É possível perceber que os concretos têxteis reforçados com tecido de carbono rígido apresentam desempenho mecânico na tração muito superior aos demais compósitos. Por outro lado, os concretos têxteis reforçados com tecido de carbono flexível apresentam desempenho mecânico na tração similar ou inferior ao de concretos reforçados com tecido de fibras naturais, que possuem resistência à tração muito inferior à do tecido de carbono. Isto indica que o tecido de carbono flexível não está sendo utilizado em todo o seu potencial.

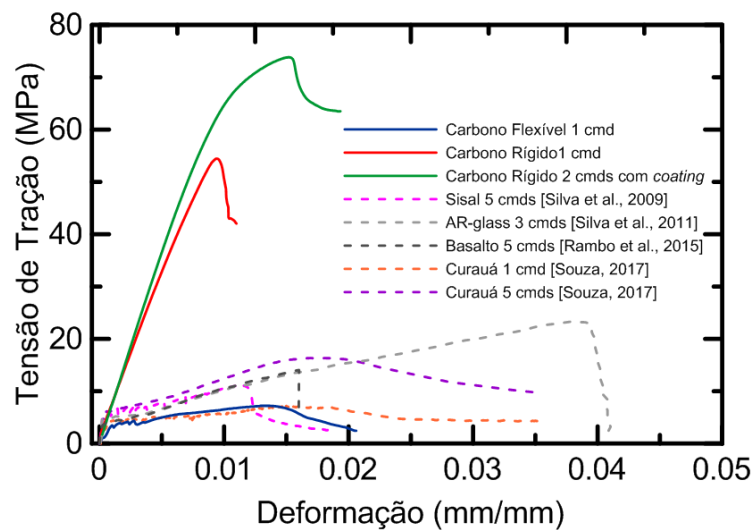


Figura 3.34 – Curvas tensão de tração versus deformação de concretos reforçados com diferentes tipos de tecidos.

3.5.2. Ensaio de flexão

A tensão equivalente na flexão foi obtida através da relação da carga aplicada e a geometria da amostra, de acordo com a expressão a seguir:

$$\sigma_{flexão} = \frac{3Pl/3}{be^2} \quad (3.1)$$

Onde,

$\sigma_{flexão}$ = tensão equivalente na flexão;

P = carga obtida experimentalmente;

l = vão entre os apoios;

b = largura da amostra;

e = espessura da amostra.

Assim como acontece na tração direta, o comportamento do concreto reforçado com tecido de carbono na flexão pode ser dividido em quatro zonas. A Figura 3.35 mostra a curva tensão equivalente na flexão *versus* deflexão do compósito reforçado com uma camada de tecido de carbono flexível impregnado com *coating* (C1FAr) e do compósito reforçado com duas camadas de tecido de carbono flexível impregnado com *coating* (C2FAr), onde cada zona é identificada por algarismos romanos.

A Zona I corresponde à região elástico-linear, na qual a matriz e o reforço atuam simultaneamente [3]. A Zona I se estende até o ponto onde ocorre a primeira fissura da matriz, que na flexão é denominado limite de proporcionalidade (do inglês *limit of proportionality* – LOP) [69]. A partir da primeira fissura, ocorre a múltipla fissuração da matriz, que caracteriza a Zona II. Após o esgotamento da abertura de novas fissuras, há o aumento das fissuras já existentes (Zona III). A Zona IV é caracterizada pela localização e abertura de uma única fissura até a ruptura do compósito. A ruptura do compósito pode se dar pela ruptura (curva azul da Figura 3.35) ou pelo deslizamento do reforço, caracterizando um comportamento *deflection-softening* na ruptura (curva vermelha da Figura 3.35).

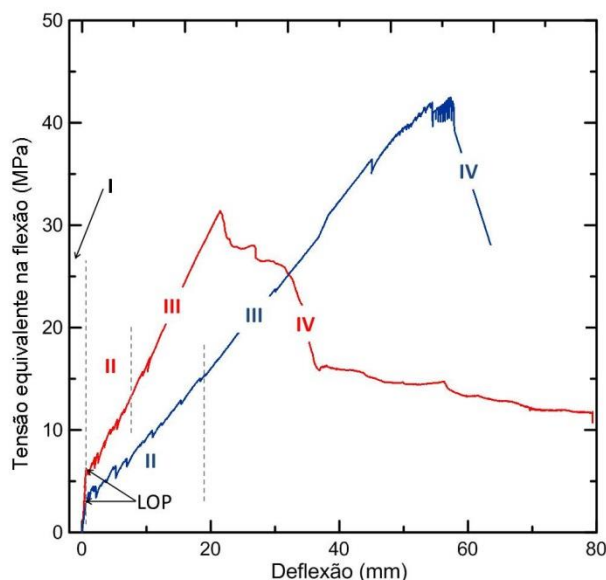


Figura 3.35 – Curvas tensão equivalente na flexão *versus* deflexão características dos comportamentos mecânicos obtidos para os concretos têxteis reforçados com tecido de carbono.

As Figuras 3.36 a 3.42 apresentam as curvas tensão equivalente na flexão *versus* deflexão dos compósitos obtidas do ensaio de flexão a quatro pontos. Todos os tipos de compósitos apresentam comportamento *deflection-hardening* até a ruptura. Para cada tipo de compósito foram feitos no mínimo três ensaios e a curva plotada representa a média. As curvas para cada amostra estão no Apêndice B. É importante ressaltar que cada gráfico possui uma escala diferente, de forma a permitir a observação de todos os detalhes das curvas.

Nas Tabelas 3.11 e 3.12 são apresentados os valores médios para a tensão equivalente na flexão máxima ($\sigma_{\text{máx}}$), a deflexão na tensão equivalente na flexão máxima ($\Delta_{\sigma, \text{máx}}$), a tensão equivalente de flexão de primeira fissura (σ_{LOP}) e a deflexão na tensão equivalente na flexão de primeira fissura ($\Delta_{\sigma, \text{LOP}}$). Os valores dos desvios padrões se encontram entre parênteses.

A partir da Figura 3.36, observa-se que quanto maior o número de camadas de tecido de carbono flexível, maior a tensão equivalente na flexão máxima. Isto já era esperado devido ao aumento da fração volumétrica de reforço. Os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono flexível apresentam tensão equivalente na flexão máxima até 2,3 vezes maior que os compósitos com uma camada.

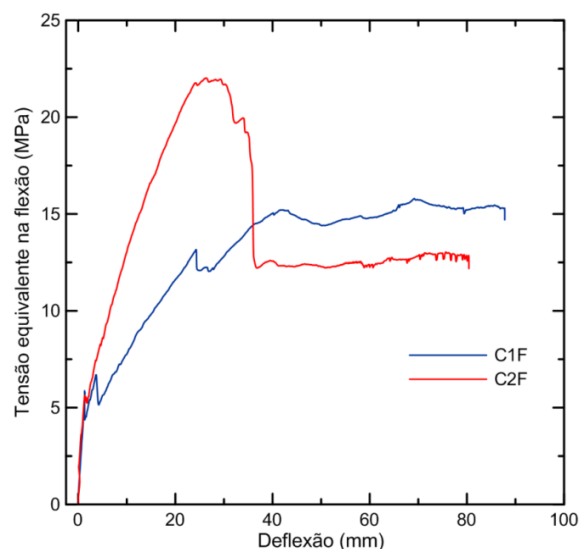


Figura 3.36 – Curvas tensão equivalente na flexão *versus* deflexão dos compósitos reforçados com uma (C1F) e duas (C2F) camadas de tecido de carbono flexível.

A partir das Figuras 3.37 e 3.38, observa-se que os compósitos reforçados com tecido de carbono flexível com *coating* atingem maiores valores de tensão

equivalente na flexão máxima do que aqueles sem *coating*. Além disso, a adição do *coating* também aumenta a rigidez, isto é, a inclinação da curva tensão *versus* deflexão do compósito após a múltipla fissuração. Como já visto anteriormente, isto ocorre devido à eficácia do *coating* feito com resina epóxi e areia de melhorar a aderência entre o tecido e a matriz.

Os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível com *coating* apresentam tensão equivalente na flexão máxima até 2,4 vezes maior que os compósitos sem *coating*. Para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono flexível, a diferença da tensão equivalente na flexão máxima causada pela adição do *coating* é de 1,6. Logo, os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível são mais influenciados pelo efeito benéfico da adição do *coating* de resina epóxi e areia que os compósitos com duas camadas.

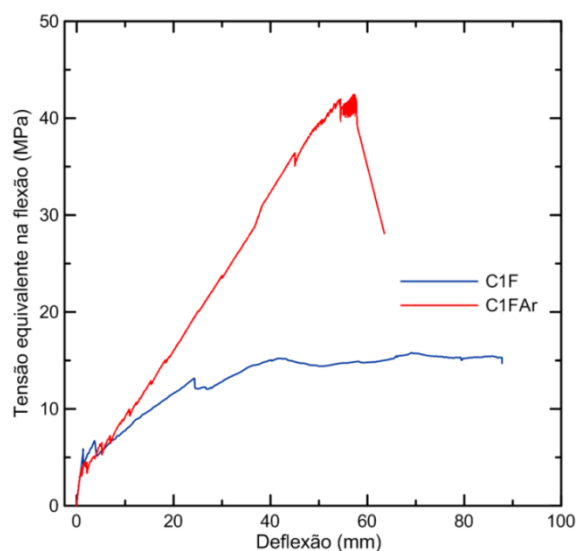


Figura 3.37 – Curvas tensão equivalente na flexão *versus* deflexão dos compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível (C1F) e uma camada de tecido de carbono flexível impregnado com *coating* (C1FAr).

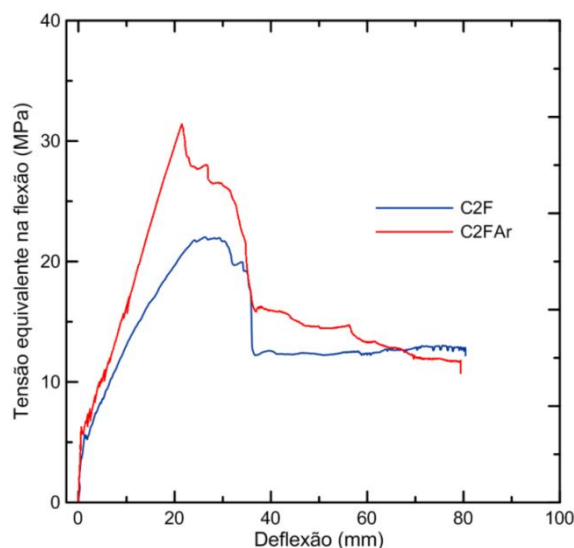


Figura 3.38 – Curvas tensão equivalente na flexão *versus* deflexão dos compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono flexível (C1F) e duas camadas de tecido de carbono flexível impregnado com *coating* (C1FAr).

Tabela 3.11 – Resultados obtidos nos ensaios de flexão a quatro pontos para os compósitos reforçados com tecido de carbono flexível.

CP	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\Delta_{\sigma,m\acute{a}x}$ (mm)	σ_{LOP} (MPa)	Δ_{LOP} (mm)
C1F	15,6 (2,56)	55,5 (18,4)	7,03 (1,13)	1,32 (0,169)
C1FAr	37,5 (4,45)	51,6 (8,73)	4,49 (0,519)	0,9142 (0,243)
C2F	21,9 (1,01)	34,9 (10,2)	4,62 (0,712)	1,08 (0,196)
C2FAr	36,0 (3,29)	22,8 (1,24)	5,65 (1,43)	0,625 (0,202)

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = tensão equivalente de flexão máxima;

$\Delta_{\sigma,m\acute{a}x}$ = deflexão na tensão equivalente de flexão máxima;

σ_{LOP} = tensão equivalente de flexão de primeira fissura;

Δ_{LOP} = deflexão na tensão equivalente de flexão de primeira fissura.

Valores do desvio padrão entre parênteses.

É interessante observar que, no caso dos compósitos reforçados com tecido de carbono flexível, a utilização do *coating* de resina epóxi e areia é mais eficaz em aumentar a tensão equivalente na flexão máxima dos compósitos do que o aumento do número de camadas de tecido.

A Figura 3.39 apresenta as curvas tensão equivalente na flexão *versus* deflexão para compósitos reforçados com uma camada (C1R) e duas camadas (C2R) de tecido de carbono rígido. De maneira análoga ao que ocorre nos compósitos reforçados com tecido de carbono flexível, quanto maior o número de camadas de tecido de carbono rígido, maior a tensão equivalente na flexão máxima. O aumento do número de camadas de tecido de carbono rígido também aumenta a rigidez após a múltipla fissuração dos compósitos. Novamente isto já era esperado devido ao aumento da fração volumétrica de reforço. Os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono rígido apresentam tensão equivalente na flexão máxima até 1,7 vezes maior que os compósitos com uma camada.

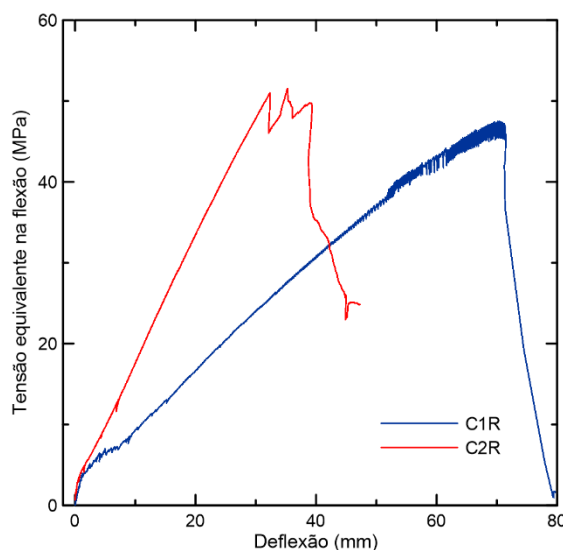


Figura 3.39 – Curvas tensão equivalente na flexão *versus* deflexão dos compósitos reforçados com uma (C1R) e duas (C2R) camadas de tecido de carbono rígido.

As Figuras 3.40 e 3.41 apresentam as curvas tensão equivalente na flexão *versus* deflexão para compósitos reforçados com uma e duas camadas de tecido de carbono rígido impregnado e não impregnado com *coating*. De modo análogo ao que ocorre nos ensaios de tração, nos compósitos reforçados com tecido de carbono rígido, a adição do *coating* não influencia de forma significativa na tensão equivalente na flexão máxima quanto nos compósitos reforçados com tecido de carbono flexível. A rigidez, isto é, a inclinação da curva tensão *versus* deflexão após a múltipla fissuração do compósito também não é influenciada devido à adição do *coating*.

O fato de a adição do *coating* de resina epóxi e areia não influenciar de forma significativa no comportamento mecânico do compósito reforçado com tecido de carbono rígido pode indicar que o *coating* polimérico utilizado durante a fabricação do tecido é eficaz em aumentar a aderência entre o reforço e a matriz.

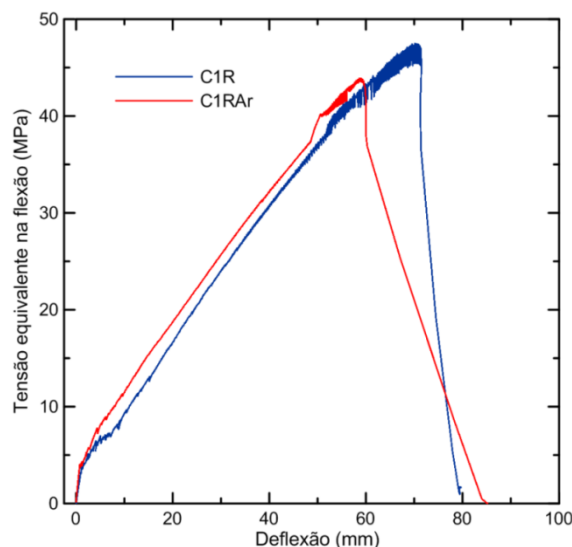


Figura 3.40 – Curvas tensão equivalente na flexão *versus* deflexão dos compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono rígido (C1R) e uma camada de tecido de carbono rígido impregnado com *coating* (C1RAr).

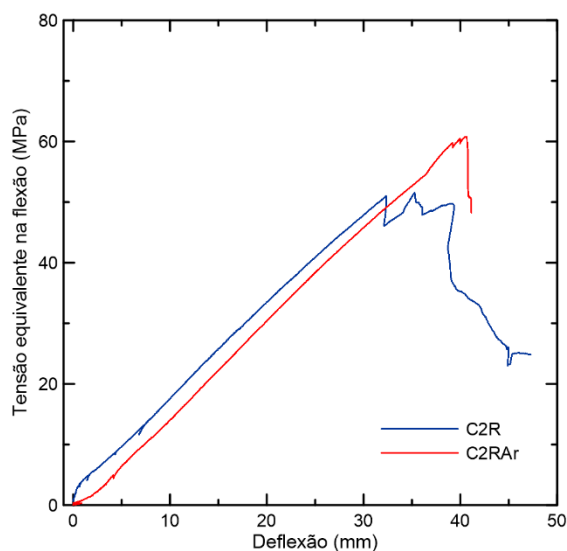


Figura 3.41 – Curvas tensão equivalente na flexão *versus* deflexão dos compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono rígido (C2R) e duas camadas de tecido de carbono rígido impregnado com *coating* (C2RAr).

Tabela 3.12 – Resultados obtidos nos ensaios de flexão a quatro pontos para os compósitos reforçados com tecido de carbono rígido.

<i>CP</i>	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\Delta_{\sigma,m\acute{a}x}$ (mm)	σ_{LOP} (MPa)	Δ_{LOP} (mm)
<i>C1R</i>	30,8 (13,2)	62,8 (10,7)	2,79 (1,26)	1,04 (0,639)
<i>C1RAr</i>	36,6 (5,36)	61,9 (5,67)	3,64 (1,18)	0,885 (0,603)
<i>C2R</i>	52,2 (8,23)	42,8 (8,9)	2,82 (0,332)	0,657 (0,251)
<i>C2RAr</i>	57,1 (8,82)	52,1 (8,36)	3,17 (0,797)	1,43 (0,660)

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = tensão equivalente de flexão máxima;

$\Delta_{\sigma,m\acute{a}x}$ = deflexão na tensão equivalente de flexão máxima;

σ_{LOP} = tensão equivalente de flexão de primeira fissura;

Δ_{LOP} = deflexão na tensão equivalente de flexão de primeira fissura.

Valores do desvio padrão entre parênteses.

A Figura 3.42 apresenta as curvas tensão equivalente na flexão *versus* deflexão obtidas para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível (C1F) e rígido (C1R) sem adição do *coating*. Os compósitos reforçados com tecido de carbono rígido apresentam tensão equivalente na flexão máxima até 2 vezes maior que os compósitos reforçados com tecido de carbono flexível. A rigidez, isto é, a inclinação da curva tensão *versus* deflexão após a múltipla fissuração também é maior para os compósitos reforçados com tecido de carbono rígido.

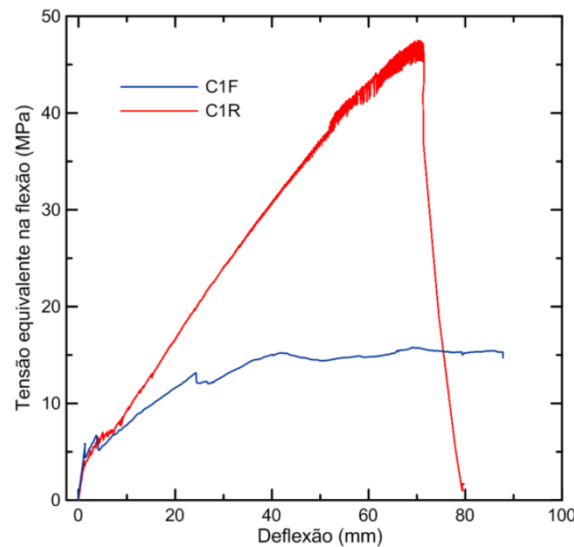


Figura 3.42 – Curvas tensão equivalente na flexão *versus* deflexão dos compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível (C1F) e rígido (C1R).

A partir dos resultados apresentados, nota-se que todos os compósitos apresentaram grandes níveis de deflexão, chegando a valores da ordem de 80 mm, que representa 16% do vão. Alguns inclusive não romperam, e o ensaio foi finalizado devido ao limite de deslocamento da máquina ter sido atingido. Logo, o concreto reforçado com tecido de fibra de carbono é uma solução viável para elementos estruturais sujeitos a grandes deformações em algum momento durante a sua vida útil. A Figura 3.43 apresenta uma amostra reforçada com uma camada de tecido de carbono rígido impregnado com *coating* (C1RAr) submetida à flexão durante o ensaio.

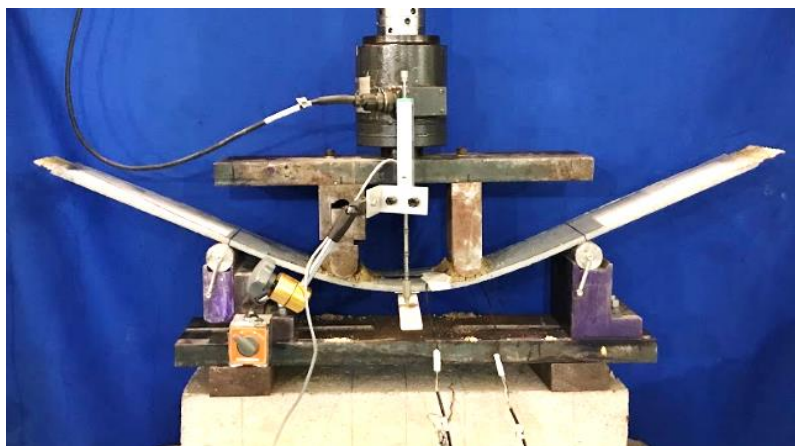


Figura 3.43 - Amostra C1RAr submetida à flexão durante o ensaio.

A Figura 3.44 apresenta as curvas típicas tensão equivalente na flexão *versus* deformação para os compósitos reforçados com tecido de carbono flexível. As deformações de compressão e de tração foram obtidas a partir da leitura dos extensômetros. Não foi possível obter a curva do compósito reforçado com uma camada de tecido de carbono flexível, pois em todas as amostras os extensômetros romperam antes do fim do ensaio.

A partir da Figura 3.44.a, observa-se que, na região comprimida, após a múltipla fissuração, a rigidez, isto é, a inclinação da curva tensão equivalente na flexão *versus* deformação de compressão do compósito reforçado com duas camadas de tecido de carbono flexível (C2F) é igual à do compósito reforçado com duas camadas de tecido de carbono flexível impregnado com *coating* (C2FAr).

Na região tracionada, como observado na Figura 3.44.b, a rigidez do compósito reforçado com duas camadas de tecido de carbono flexível (C2F) foi menor do que a do compósito reforçado com duas camadas de tecido de carbono flexível impregnado com *coating* (C2FAr). A rigidez após a múltipla fissuração do compósito reforçado com uma camada de tecido de carbono flexível impregnado com *coating* (C1FAr) foi similar a do compósito reforçado com duas camadas de tecido de carbono flexível (C2F). Isto indica que a adição do *coating* possui a mesma influência na rigidez do compósito do que o aumento do número de camadas de tecido.

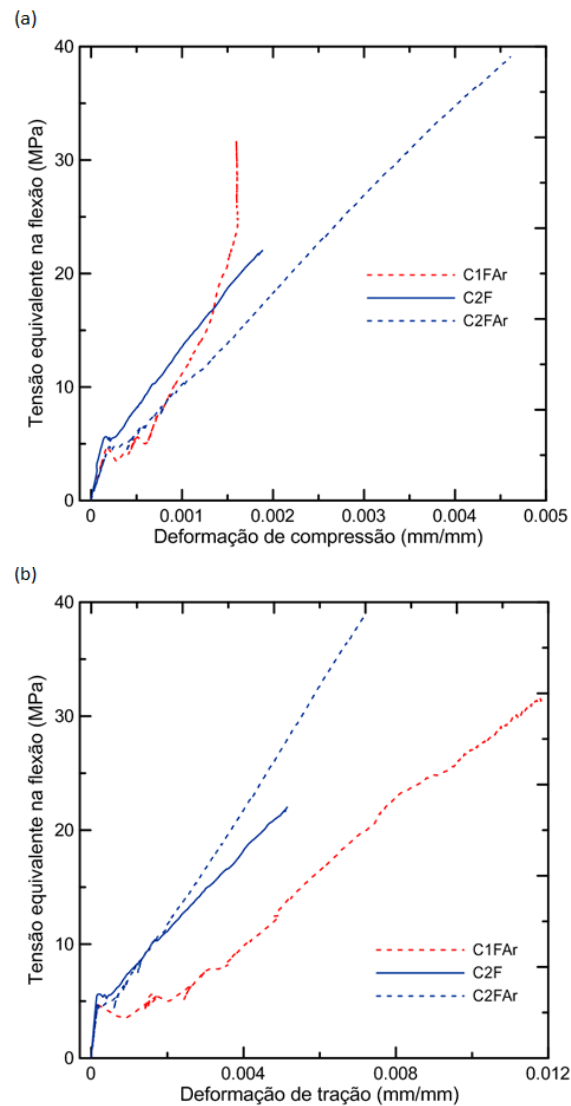


Figura 3.44 – Curvas tensão equivalente na flexão *versus* deformação. (a) de compressão; (b) de tração.

A Figura 3.45 apresenta as curvas típicas tensão equivalente na flexão *versus* deformação para os compósitos reforçados com tecido de carbono rígido. As deformações de compressão e de tração foram obtidas a partir da leitura dos extensômetros.

A partir da Figura 3.45.a, é possível observar que, na região comprimida, a rigidez após a múltipla fissuração dos compósitos reforçados com tecido de carbono rígido com *coating* (C1RAr) é maior que a dos compósitos reforçados com tecido de carbono rígido (C1R), independente do número de camadas. Entretanto, a variação da rigidez devido à adição do *coating* foi maior para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono rígido.

Na região tracionada, como pode ser visto na Figura 3.45.b, a rigidez após a múltipla fissuração dos compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono rígido (C2R) foi maior que a dos compósitos reforçados com uma camada do tecido de carbono rígido (C1R), independente da adição ou não do *coating*. A adição do *coating* não influenciou de maneira significativa a rigidez dos compósitos reforçados com tecido de carbono rígido, independente do número de camadas.

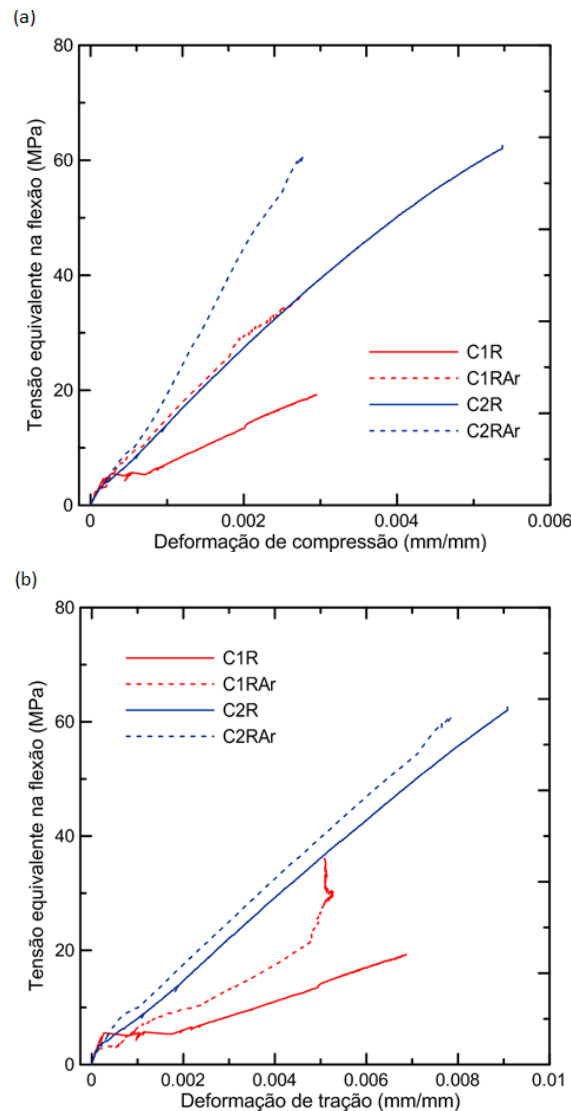


Figura 3.45 – Curvas tensão equivalente na flexão *versus* deformação. (a) de compressão; (b) de tração.

Na Figura 3.46 são apresentadas as curvas típicas que representam a variação da altura da linha neutra ao longo das deformações de tração. A equação para o cálculo da altura da linha neutra (equação 3.2) foi obtida a partir de expressões da resistência dos materiais.

$$y = \frac{\varepsilon_c \cdot e}{\varepsilon_c + |\varepsilon_T|} \quad (3.2)$$

Onde,

y = distância da linha neutra até a face superior da placa;

ε_c = deformação de compressão obtida experimentalmente;

ε_T = deformação de tração obtida experimentalmente;

e = espessura da placa.

A altura da linha neutra normalizada foi obtida dividindo-se a equação 3.2 pela espessura da placa.

A linha neutra sai de valores próximos a 0,5, o que quer dizer que antes do ensaio ela se encontra aproximadamente no meio da seção transversal da amostra. Conforme a carga vai sendo aplicada, a tendência da linha neutra é subir. A seção transversal da amostra vai se tornando mais tracionada ao longo do ensaio. Altura da linha neutra normalizada igual à zero indica que a seção transversal do elemento está toda tracionada.

Na Figura 3.46.a é feita uma comparação entre as linhas neutras do compósito reforçado com duas camadas de tecido de carbono flexível impregnado e não com *coating*. Nos compósitos reforçados com tecido de carbono flexível a variação da altura da linha neutra foi maior que naqueles reforçados com tecido de carbono flexível impregnado com *coating*. Isto indica que os compósitos reforçados com tecido de carbono flexível possuem maior região tracionada no momento da ruptura.

Na Figura 3.46.b é apresentada uma comparação entre a variação da altura da linha neutra de compósitos reforçados com tecido de carbono flexível e rígido. A variação da altura da linha neutra foi maior para os compósitos reforçados com tecido de carbono flexível, indicando a região tracionada destes compósitos é maior no momento da ruptura. Isso ocorre porque a área de reforço é maior nos compósitos reforçados com tecido de carbono rígido, o que faz com que a altura da linha neutra seja maior.

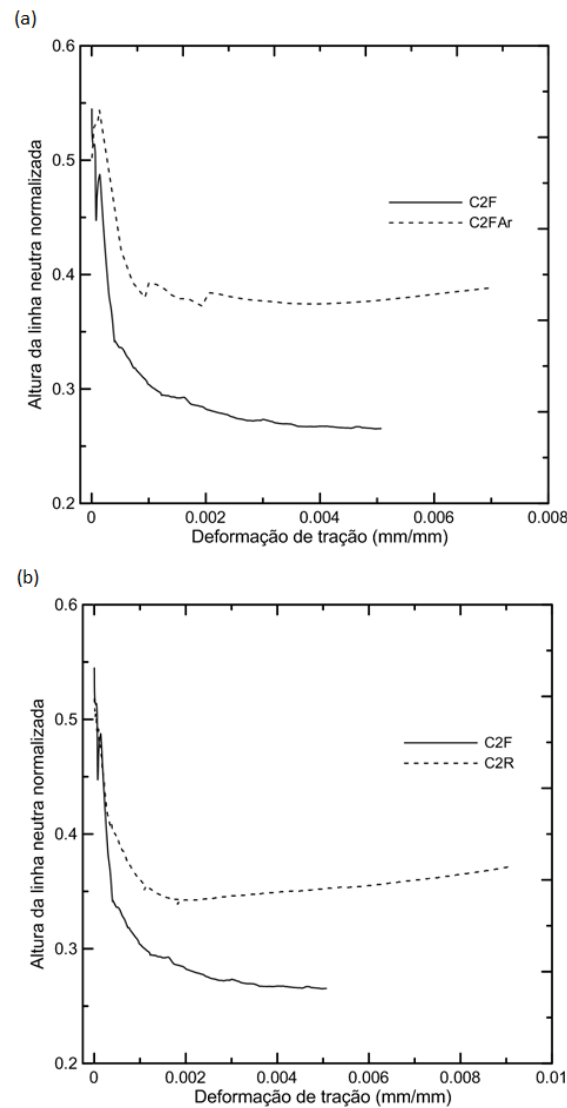


Figura 3.46 – Variação da altura da linha neutra ao longo da deformação de tração. (a) Comparação entre compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono flexível impregnado (C2F_{Ar}) e não (C2F) com *coating*. (b) Comparação entre compósitos reforçados com tecido de carbono flexível (C2F) e rígido (C2R).

3.5.3. Ensaio de arrancamento

A relação de aderência entre o tecido e a matriz é determinante para o comportamento de um compósito reforçado com tecido. Neste trabalho, a interface reforço-matriz foi avaliada a partir de ensaios de arrancamento do filamento dos tecidos utilizados na fabricação dos compósitos.

A Figura 3.47 apresenta as curvas típicas de força *versus* deslizamento para os cordões do tecido de carbono, com comprimento de embebimento de 20 mm. Na Figura 3.47.a é feita uma comparação entre o filamento de tecido de carbono flexível e de tecido de carbono rígido. Na Figura 3.47.b é apresentada uma comparação entre o filamento de tecido de carbono flexível com e sem adição do *coating* e na Figura 3.54.c, uma comparação entre o filamento de tecido de carbono rígido com e sem adição do *coating*. Os valores médios de carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$), tensão cisalhante máxima ($\tau_{m\acute{a}x}$) e deslizamento referente à carga máxima ($\delta_{m\acute{a}x}$) são apresentados na Tabela 3.13. Os valores de desvio padrão estão entre parênteses.

A tensão cisalhante máxima foi calculada a partir da equação 3.3 [3].

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{2\pi r L} \quad (3.3)$$

Onde,

$\tau_{m\acute{a}x}$ = tensão cisalhante máxima;

$P_{m\acute{a}x}$ = carga máxima de arrancamento, obtida experimentalmente;

r = raio aproximado da fibra;

L = comprimento de embebimento (20 mm).

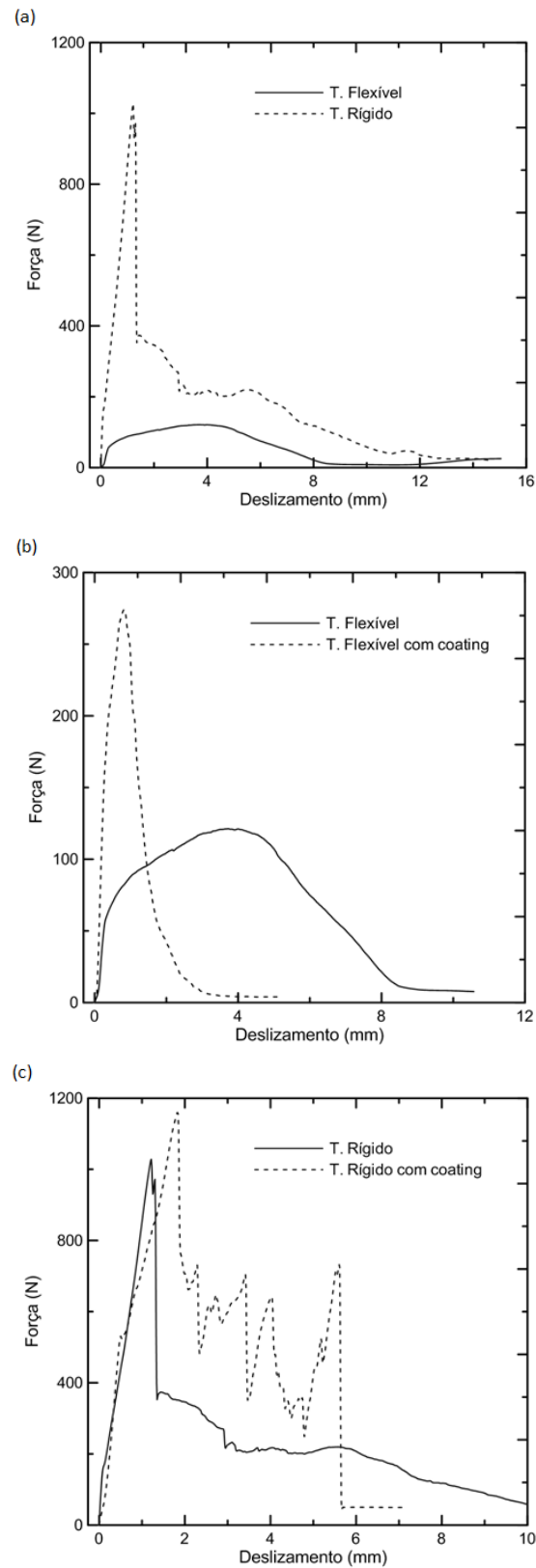


Figura 3.47 – Curvas típicas de força *versus* deslocamento. (a) Comparação entre tecido de carbono flexível e tecido de carbono rígido. (b) Comparação entre tecido de carbono flexível com e sem adição de *coating*. (c) Comparação entre tecido de carbono rígido com e sem adição de *coating*.

Tabela 3.13 – Resultados dos ensaios de arrancamento para os diferentes tipos de tecido de carbono.

<i>Tipo de amostra</i>	<i>P_{máx} (N)</i>	<i>τ_{máx} (MPa)</i>	<i>δ_{máx} (mm)</i>
<i>T. Flexível</i>	91,2 (22,6)	0,705 (0,105)	2,63 (2,36)
<i>T. Flexível com coating</i>	266 (120)	1,57 (0,860)	1,01 (0,384)
<i>T. Rígido</i>	987 (120)	4,17 (2,80)	1,57 (0,22)
<i>T. Rígido com coating</i>	894 (135)	5,39 (0,817)	1,91 (0,443)

P_{máx} = Carga máxima de arrancamento; τ_{máx} = Tensão cisalhante máxima; δ_{máx} = Deslizamento referente à carga máxima de arrancamento.

Shilang e He [16] realizaram ensaios de arrancamento em tecidos de carbono com resistência à tração de 4900 MPa e módulo de elasticidade de 230 GPa, compatíveis com as propriedades do tecido de carbono flexível, utilizando uma matriz de resistência à compressão de 57 MPa. Para o comprimento de embebimento de 20 mm, a força máxima foi de 150 N, similar à obtida para o tecido de carbono flexível deste trabalho.

A partir da análise dos resultados obtidos, percebe-se que a tensão cisalhante máxima na interface tecido-matriz obtida do ensaio de arrancamento de um filamento do tecido de carbono rígido é até 5,91 vezes maior do que a obtida do ensaio de arrancamento de um filamento do tecido de carbono flexível. Isto indica que a aderência entre o tecido de carbono rígido e a matriz é melhor que a do tecido de carbono flexível, justificando o melhor desempenho dos compósitos reforçados com o tecido de carbono rígido na tração direta e na flexão.

A carga necessária para arrancar um filamento do tecido de carbono flexível impregnado com *coating* é até 2,9 vezes maior que a necessária para arrancar um filamento do tecido de carbono flexível não impregnado. A influência da utilização de um coating de resina epóxi e areia na força de arrancamento de tecidos de carbono também foi reportada por Shilang e He [16]. Silva et al. [72], por outro lado, constataram que a adição de um coating polimérico, sem areia, reduz a força máxima de arrancamento do tecido de carbono.

As cargas necessárias para arrancar um filamento do tecido de carbono rígido com e sem *coating* são do mesmo nível, considerando o desvio padrão. Estes resultados indicam que a adição do *coating* de resina epóxi com areia no tecido de carbono flexível tem maior influência na aderência entre o reforço e a matriz do que no tecido de carbono rígido. Como ambos os tecidos são fornecidos pelas fábricas já impregnados com um *coating* polimérico, os resultados indicam que o tipo do polímero utilizado no tecido de carbono rígido é mais eficaz do que aquele utilizado no tecido de carbono flexível.

3.6. Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos de ensaios de tração direta, flexão a quatro pontos e arrancamento de concretos reforçado com tecido de fibra de carbono. Foram tidas como variáveis de estudo o tipo de tecido (flexível ou rígido), a adição ou não de um *coating* de resina epóxi e areia e, para ensaios de tração direta e flexão, o número de camadas de tecido (uma ou duas camadas).

Todos os compósitos apresentaram comportamento *strain-hardening*, na tração direta, e *deflection-hardening*, na flexão, com formação de múltiplas fissuras.

Os compósitos reforçados com tecido de carbono rígido apresentaram valores de resistência mecânica superiores em relação aos compósitos reforçados com tecido de carbono flexível. Isto se deve ao fato de a aderência entre o tecido de carbono rígido e a matriz ser melhor que a do tecido de carbono flexível. Os maiores valores da carga necessária para o arrancamento de um filamento de tecido de carbono rígido da matriz, obtidos no ensaio de arrancamento, comprovam este fato.

A adição do *coating* de resina epóxi e areia influenciou de forma mais significativa no comportamento mecânico dos compósitos reforçados com tecido de carbono flexível. Os resultados obtidos dos ensaios de arrancamento justificam esta tendência, uma vez que a diferença entre a carga necessária para arrancar um cordão do tecido de carbono flexível sem e com a adição do *coating* da matriz foi muito superior que a do cordão do tecido de carbono rígido.

No caso dos compósitos reforçados com tecido de carbono flexível, a adição do *coating* foi mais eficaz em aumentar a resistência mecânica do elemento do que o aumento do número de camadas de tecido.

4

Aplicação estrutural do concreto reforçado com tecido de fibra de carbono

4.1.

Introdução

Este capítulo apresenta o comportamento do concreto têxtil quando utilizado em uma aplicação estrutural. Para tal, foram realizados ensaios de flexão a quatro pontos em uma viga curta de 1,2 metros de comprimento fabricada com concreto reforçado com tecido de carbono. Serão apresentados a seguir os materiais utilizados, suas propriedades e a metodologia de fabricação dos elementos e dos ensaios. Os resultados obtidos serão analisados e comparados com os resultados de uma viga de concreto armado com diferentes taxas de armadura longitudinal.

4.2.

Materiais utilizados

4.2.1.

Matriz cimentícia

Nesta parte do trabalho, como o objetivo era a fabricação de elementos estruturas de concreto têxtil, a matriz utilizada foi um concreto autoadensável (CAA), e não mais uma argamassa, como no capítulo 3. Foram utilizadas duas matrizes de concreto autoadensável, uma com a adição de 2% de fibras de aço e a outra sem adição de fibras. O traço utilizado foi o mesmo adotado por Pereira [73] e a Tabela 4.1 apresenta a quantidade, em massa, dos materiais correspondentes a 1 m³ de concreto.

O agregado graúdo utilizado (brita 0) era composto por gnaiss. Possuía diâmetro máximo igual a 9,5 mm e módulo de finura de 5,41 [73]. Areia natural quartzosa foi usada em duas frações como agregado miúdo. A primeira fração possuía granulometria passante na peneira 4,75 mm e retida na peneira 0,850 mm; e a segunda possuía granulometria passante na peneira 0,850 mm e retida na peneira 0,150 mm.

Cimento Portland do tipo CP-V ARI foi utilizado. De acordo com a NBR 5733:1991 [74], na sua composição pode haver, no máximo, apenas 5% de material carbonático (*filler*).

Tabela 4.1 – Traço do concreto autoadensável [73].

Material	Quantidade (kg/m³)	
	Sem fibra	Com fibra
<i>Brita 0</i>	492	438
<i>Areia 0,850 mm</i>	100	
<i>Areia 0,150 mm</i>	827	
<i>Cimento CP-V ARI</i>	360	
<i>Cinza Volante</i>	168	
<i>Sílica 325</i>	70	
<i>Sílica Ativa</i>	45	
<i>Água</i>	166	
<i>Superplastificante (Glenium)</i>	19,8	
<i>Fibra de aço</i>	-	157

Cinza volante, sílica ativa e sílica 325 foram utilizadas como aditivos minerais, substituindo parcialmente o cimento. A sílica 325 é um *filler* de pó de quartzo proveniente da indústria cerâmica.

O superplastificante usado, o Glenium 51 (MS), possuía teor de sólidos de 30%. Ele foi usado na proporção de 5,5% em relação à massa do cimento. Esse superplastificante é comercializado como uma solução aquosa. Portanto, a quantidade de água contida nele foi descontada da quantidade total da mistura.

A fibra de aço utilizada é caracterizada como uma fibra curta, com 30 mm de comprimento, e ganchos nas extremidades (Figura 4.1). As suas propriedades físicas e mecânicas fornecidas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 4.2.



Figura 4.1 – Fibra de aço HE 45/30 utilizada.

Tabela 4.2 – Propriedades da fibra de aço utilizada, segundo o fabricante.

Fibra de aço HE 45/30	
Propriedades físicas	
Comprimento (mm)	30
Diâmetro (mm)	0,67
Razão de aspecto	45
Massa específica (g/cm ³)	7,85
Propriedades mecânicas	
Resistência à tração (MPa)	1270
Módulo de elasticidade (GPa)	210

A Tabela 4.3 apresenta as propriedades mecânicas das matrizes no estado endurecido. Pereira [73] realizou ensaios de compressão simples aos 28 dias para a obtenção da resistência à compressão e do módulo de elasticidade. Para a determinação da resistência à tração, Pereira [73] realizou ensaios de tração direta em corpos de provas com formato comumente chamado de *dog bone*.

Tabela 4.3 – Propriedades mecânicas das matrizes [73].

Características Mecânicas		
	Matriz sem fibra de aço	Matriz com fibra de aço
$\sigma_{comp,m\acute{a}x}$ (MPa)	73,0 ± 5,00	82,1 ± 3,00
E_{comp} (Gpa)	33,8 ± 2,30	31,8 ± 1,00
$\sigma_{tra\c{c}\tilde{o}ao,m\acute{a}x}$ (MPa)	6,04 ± 1,09	4,54 ± 0,36

$\sigma_{comp,m\acute{a}x}$ = resistência à compressão; E_{comp} = módulo de elasticidade na compressão; $\sigma_{tra\c{c}\tilde{o}ao,m\acute{a}x}$ = resistência à tração

4.2.2. Tecido de fibra de carbono

Os tecidos de fibra de carbono utilizados foram os mesmos descritos no capítulo 3, item 3.2.2.

4.3. Fabricação do elemento estrutural

Foram analisadas cinco vigas: i) duas vigas com concreto sem fibra de aço, uma reforçada com duas camadas de tecido de carbono flexível (V1) e outra com

duas camadas de tecido de carbono rígido (V2) apenas na direção longitudinal; ii) duas vigas com concreto com fibra de aço, uma reforçada com duas camadas de tecido de carbono flexível (V3) e outra com duas camadas de tecido de carbono rígido (V4) apenas na direção longitudinal; e iii) uma viga com concreto com fibra de aço reforçada com tecido de carbono flexível nas direções longitudinal e transversal (V5). A Tabela 18 apresenta um resumo das vigas analisadas. Os reforços têxteis incorporados a estas vigas foram impregnados com uma camada de resina epóxi e polvilhados com areia (ver capítulo 3, item 3.3). Todas as vigas possuíam dimensões de 1200 x 150 x 150 mm (comprimento x largura x altura) e um entalhe de 25 mm na seção central. Este entalhe foi feito com a fixação de uma cantoneira de alumínio na base das formas. As dimensões da viga assim com a existência do entalhe foram determinadas de modo a que as vigas de concreto têxtil pudessem ser comparadas com vigas de concreto armado estudadas por Pereira [73].

Tabela 4.4 – Resumo das vigas de concreto têxtil analisadas.

<i>Viga</i>	<i>V_f de fibra de aço na matriz</i>	<i>Direção do reforço têxtil</i>	<i>Tipo do reforço têxtil</i>
V1	0%	Longitudinal	Tecido de carbono flexível
V2	0%	Longitudinal	Tecido de carbono rígido
V3	2%	Longitudinal	Tecido de carbono flexível
V4	2%	Longitudinal	Tecido de carbono rígido
V5	2%	Longitudinal + Transversal	Tecido de carbono flexível

$V_f = \text{fração volumétrica}$

As formas das vigas foram fabricadas a partir de compensados navais com 30 mm de espessura. Antes da concretagem, as formas eram posicionadas sobre uma base nivelada e era aplicado desmoldante para madeira. O lançamento do concreto era feito diretamente na forma. Durante a concretagem foram realizados golpes nas laterais da forma com um martelo de borracha para o adensamento do concreto.

O concreto foi produzido em uma betoneira com capacidade de 400 litros. O processo de mistura foi realizado da seguinte forma:

- os agregados grão e miúdo foram misturados com 70% da quantidade de água por 1 minuto;

- ii. foram acrescentadas as adições minerais e os materiais foram misturados por 1 minuto;
- iii. o cimento foi adicionado e misturado por 1 minuto;
- iv. foi acrescentado o superplastificante com os 30% restantes da água e o concreto foi misturado por 10 minutos;
- v. as fibras de aço foram adicionadas gradualmente com a betoneira em movimento e o concreto foi misturado por mais cinco minutos. Esta etapa só aconteceu para as matrizes que possuíam adição de fibras de aço.

A Figura 4.2 mostra o processo de moldagem das vigas V1 a V4. Utilizou-se o método de intercalar camadas de matriz com camadas de reforço. Primeiro foi colocada uma camada de concreto, de aproximadamente 3 cm. Em seguida foi posicionada a primeira camada de tecido e uma nova camada de concreto de aproximadamente 3 cm por cima. Foi colocada a segunda e última camada de tecido e a forma foi completada até o topo com concreto. O acabamento superficial foi feito com uma desempenadeira de madeira.



Figura 4.2 – Processo de moldagem das vigas V1 a V4.

A viga V5 apresentava reforço longitudinal, para combater esforços de flexão, e transversal, para combater esforços de cisalhamento. Dessa forma,

primeiro foi montado um sistema equivalente a uma armadura de tecido de fibra de carbono (Figura 4.3).

Diferente das vigas anteriores, para a moldagem da viga V5, primeiro a armadura foi colocada na forma e em seguida o concreto foi lançado. O processo de moldagem foi similar ao de uma viga de concreto armado convencional.

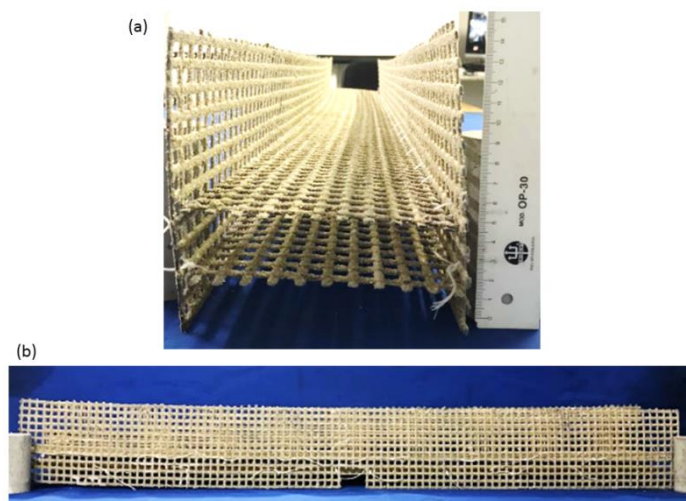


Figura 4.3 – Armadura de tecido de fibra de carbono flexível. (a) Vista lateral. (b) Vista frontal.

As vigas foram desenformadas após 48 horas da moldagem e a cura foi feita ao ar.

Após a viga V5 ser desenformada, foram encontradas falhas devido a problemas na concretagem, como mostrado na Figura 4.4. É possível perceber um vazio, isto é, o concreto não preencheu todos os espaços entre as duas camadas de tecido. Isto provavelmente ocorreu porque, depois de certo ponto, as britas e as fibras de aço usadas bloquearam a passagem de concreto pela abertura da malha do tecido. Para preencher esse espaço, foi produzida uma argamassa com o mesmo traço do concreto, retirando-se a brita e a fibra de aço. A viga foi posicionada em pé e a argamassa foi despejada por cima.



Figura 4.4 – Falhas devido à concretagem da viga V5.

4.4. Comportamento mecânico

Para avaliar o comportamento mecânico das vigas de concreto reforçado com tecido de fibra de carbono foram realizados ensaios de flexão a quatro pontos.

4.4.1. Descrição do ensaio

Ensaio de flexão a quatro pontos foram realizados em um atuador hidráulico com capacidade de 500 kN, controlado por uma estação central da MTS. O controle do ensaio foi feito por deslocamento, a uma taxa de 1,0 mm/min e as vigas foram ensaiadas aos 28 dias.

A Figura 4.5 apresenta o arranjo experimental utilizado. Para cada um dos ensaios a viga foi posicionada sobre os roletes de apoios, que distavam 110 cm entre si. Os roletes de aplicação da carga distavam 37 cm entre si e 18,5 cm do meio da viga cada um. Tanto os roletes de apoio quanto os de aplicação de carga possuíam liberdade de movimento horizontal. A correta aquisição dos deslocamentos foi feita por dois transdutores de deslocamento, com capacidade de leitura máxima de 100 mm, posicionados na seção central da viga com o auxílio de uma haste de metal. Além disso, para as vigas reforçadas com tecido de carbono flexível (V3) e rígido (V4) com a incorporação de 2% de fibras curtas de aço na matriz e a viga reforçada com tecido de carbono flexível nas direções longitudinal e transversal (V5) com a incorporação de 2% de fibras curtas de aço na matriz foram colados dois extensômetros na face superior e dois na face inferior do elemento.

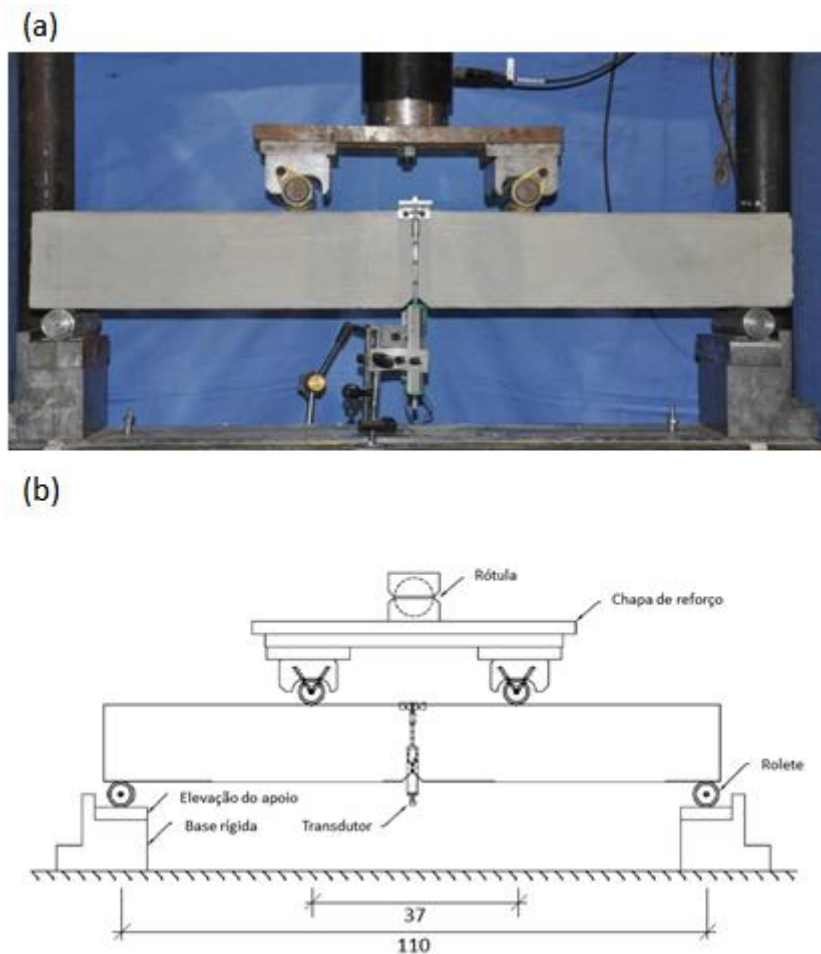


Figura 4.5 – (a) Arranjo experimental do ensaio de flexão. (b) Esquema do arranjo experimental do ensaio de flexão, medidas em cm (Adaptada de [73]).

4.4.2. Resultados e discussão

Os resultados obtidos dos ensaios de flexão serão analisados e discutidos para cada viga individualmente. Em seguida, serão comparados com os resultados obtidos em ensaios de flexão de vigas de concreto armado.

As curvas força *versus* deflexão obtidas dos ensaios de flexão para as vigas: i) reforçadas com tecido de carbono flexível (V1) e rígido (V2) sem a incorporação de fibra de aço discreta na matriz; ii) reforçadas com tecido de carbono flexível (V3) e rígido (V4) com a incorporação de 2% de fibra de aço discreta na matriz; e iii) reforçada com tecido de carbono flexível nas direções longitudinal e transversal (V5) com a incorporação de 2% de fibra de aço discreta

na matriz são apresentadas nas Figuras 4.6 a 4.10. Todas as vigas apresentaram comportamento *deflection-hardening*.

A Tabela 4.5 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de flexão das vigas V1 a V5.

Tabela 4.5 – Resultados obtidos nos ensaios de flexão para as vigas reforçadas com tecido de carbono flexível (V1) e rígido (V2) sem a incorporação de fibra de aço discreta na matriz; reforçadas com tecido de carbono flexível (V3) e rígido (V4) com a incorporação de 2% de fibra de aço discreta na matriz e reforçada com tecido de carbono flexível nas direções longitudinal e transversal (V5) com a incorporação de 2% de fibra de aço discreta na matriz.

Viga	F_{LOP} (kN)	Δ_{LOP} (mm)	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$\Delta_{F,m\acute{a}x}$ (mm)	Modo de ruptura
V1	12,0	0,676	34,2	11,6	Cisalhamento
V2	16,8	0,768	38,7	12,9	Cisalhamento
V3	26,5	0,910	79,4	12,2	Flexão + Cisalhamento
V4	30,7	1,05	72,2	17,7	Cisalhamento
V5	21,2	0,596	94,0	15,5	Flexão

F_{LOP} = força de primeira fissura; Δ_{LOP} = deflexão de primeira fissura;

$F_{m\acute{a}x}$ = força máxima; $\Delta_{F,m\acute{a}x}$ = deflexão na força máxima.

Nas curvas obtidas do ensaio de flexão das vigas reforçadas com tecido de carbono flexível (V1) e rígido (V2) sem a adição de fibras curtas de aço na matriz (Figura 4.6) não é possível identificar as quatro zonas características do comportamento mecânico de concretos têxteis. A viga reforçada com tecido de carbono rígido (V2) apresenta maior múltipla fissuração que a viga reforçada com tecido de carbono flexível (V1).

A partir das Figuras 4.6 e 4.7 é possível perceber que, em pequenas deflexões, as vigas reforçadas com tecido de carbono rígido, tanto sem e com adição de fibras curtas de aço na matriz, apresentam rigidez maior do que as vigas reforçadas com tecido de carbono flexível.

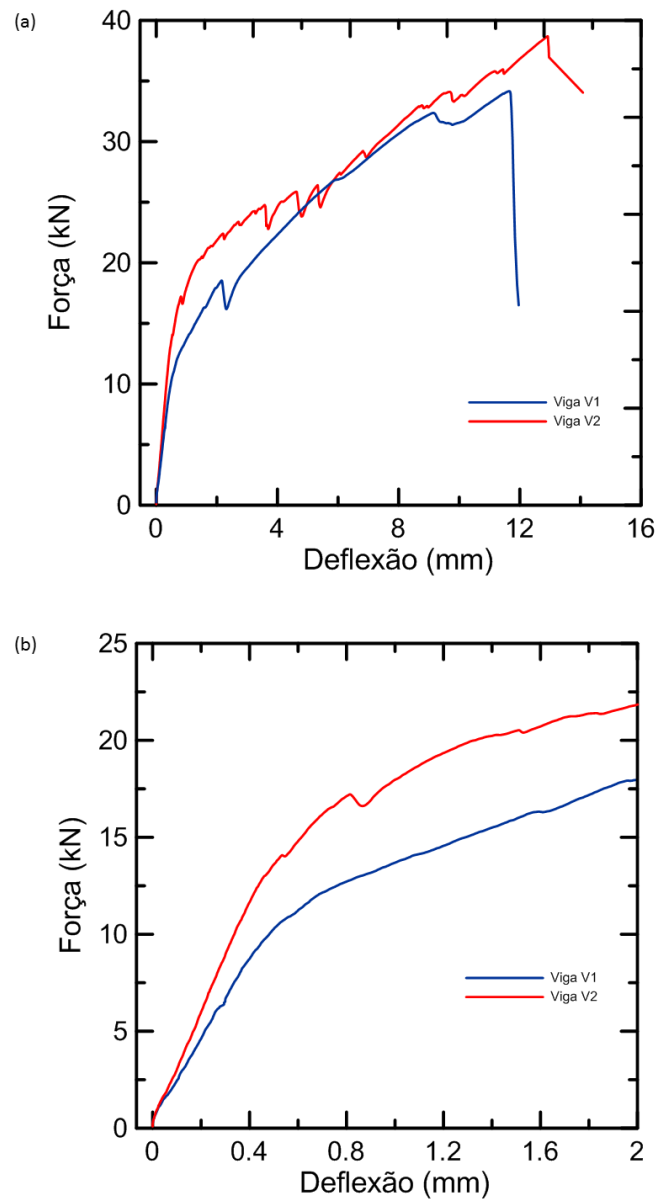


Figura 4.6 – (a)-(b) Curvas força *versus* deflexão das vigas reforçada com tecido de carbono flexível (V1) e rígido (V2).

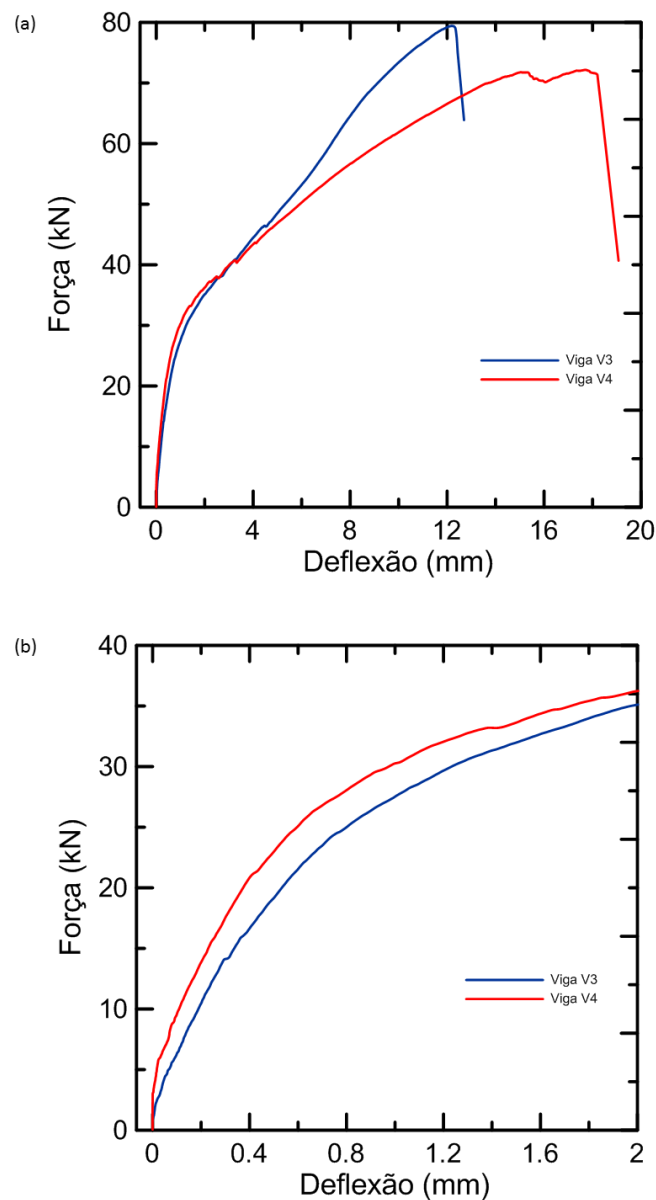


Figura 4.7 – (a)-(b) Curvas força *versus* deflexão das vigas reforçadas com tecido de carbono flexível (V3) e rígido (V4) com 2% de fibras curtas de aço incorporadas na matriz.

Como pode ser observado a partir da Tabela 4.4 e das Figuras 4.8 e 4.9, a adição das fibras curtas de aço no concreto aumentou a carga de primeira fissura das vigas, independente do tipo de tecido de carbono utilizado. Hinzen e Brameshuber [75] confirmaram a ocorrência deste efeito através de ensaios de tração. De acordo com Barhum e Mechtcherine [76], três mecanismos podem ser descritos para explicar o aumento da força de primeira fissura devido à adição de fibras curtas na matriz. O primeiro mecanismo tem relação com a retração da matriz. As fibras curtas reduzem a retração da matriz [3] e, conseqüentemente, os

danos internos no concreto. O segundo mecanismo está relacionado com a capacidade das fibras curtas dispersas na matriz de impedirem o aumento da abertura, e consequente união das micro-fissuras causadas tanto pela retração quanto pela aplicação de um carregamento. Dessa forma, é necessário que haja uma carga superior para fazer que ocorra a formação da primeira macro-fissura. O terceiro e último mecanismo está relacionado com a fração volumétrica de reforço. A adição das fibras curtas aumenta a fração volumétrica de reforço do elemento. De acordo com a teoria de materiais compósitos [3], quando a aderência entre o reforço e a matriz é elevada, a tensão de primeira fissura aumenta com o aumento da fração volumétrica de reforço, cuja resistência e rigidez são consideravelmente maiores que as da matriz.

A adição de fibras curtas de aço também aumentou a carga máxima da viga. Isto pode ser explicado pela capacidade destas fibras de auxiliarem na absorção das forças de tração através da fissura diagonal. Além disso, contribuem com a flexão. Estudos [77–80] mostram que a adição de fibras curtas no concreto aumenta consideravelmente a resistência ao cisalhamento de elementos submetidos à flexão. Em elementos sem armadura transversal, as fibras curtas, quando incorporadas em quantidade suficiente, levam à múltipla fissuração diagonal, o que melhora a ductilidade do elemento.

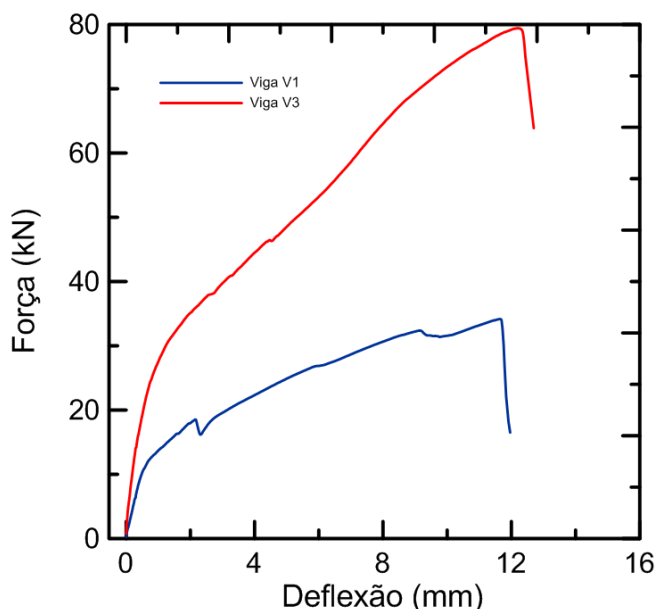


Figura 4.8 – Curvas força *versus* deflexão das vigas reforçadas com tecido de carbono flexível sem (V1) e com 2% de fibras curtas de aço incorporadas na matriz (V3).

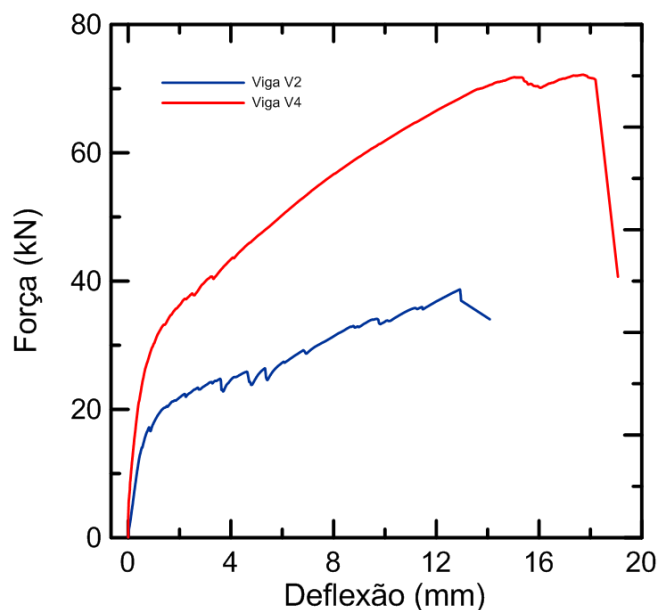


Figura 4.9 – Curvas força *versus* deflexão das vigas reforçadas com tecido de carbono rígido sem (V2) e com 2% de fibras curtas de aço incorporadas na matriz (V4).

A viga reforçada com tecido de carbono flexível apenas na direção longitudinal (V3) e nas direções longitudinal e transversal (V5) com 2% de fibras curtas de aço incorporadas na matriz apresentam rigidez após a múltipla fissuração similar. Entretanto, devido à inclusão do tecido de carbono na direção transversal, a força máxima da viga V5 é maior que a da viga V4.

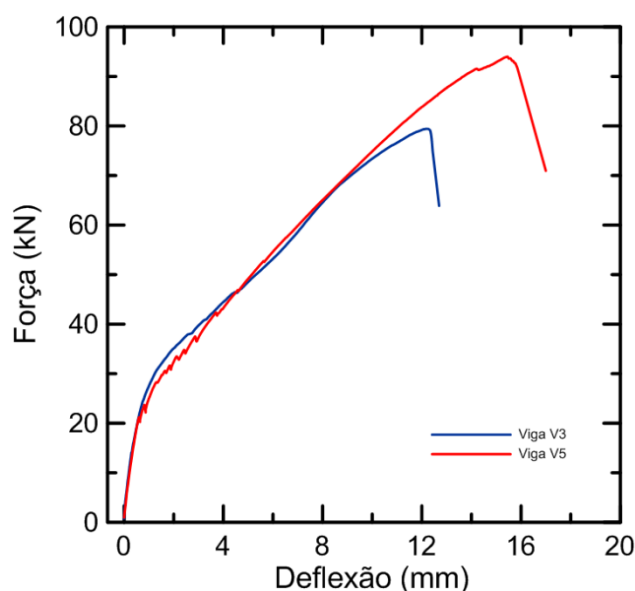


Figura 4.10 – Curvas força *versus* deflexão das vigas reforçadas com tecido de carbono flexível nas direções longitudinal (V3) e longitudinal e transversal (V5) com 2% de fibras curtas de aço incorporadas na matriz.

As Figuras 4.11 a 4.15 apresentam o modo de ruptura das vigas estudadas.

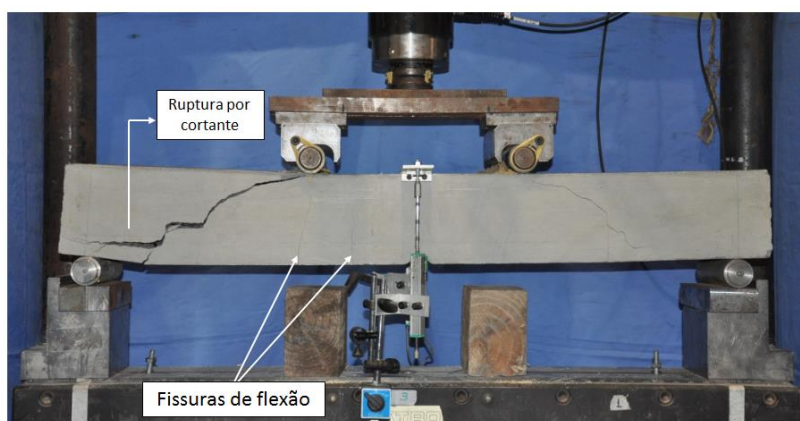


Figura 4.11 – Modo de ruptura da viga reforçada com tecido flexível (V1).

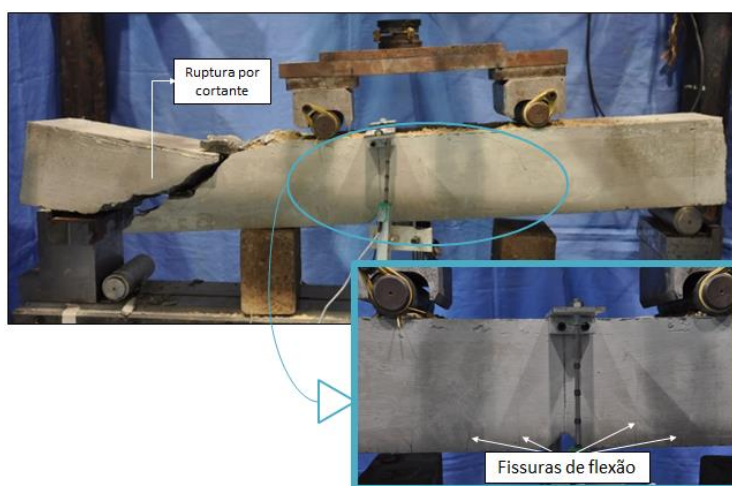


Figura 4.12 – Modo de ruptura da viga reforçada com tecido rígido (V2).

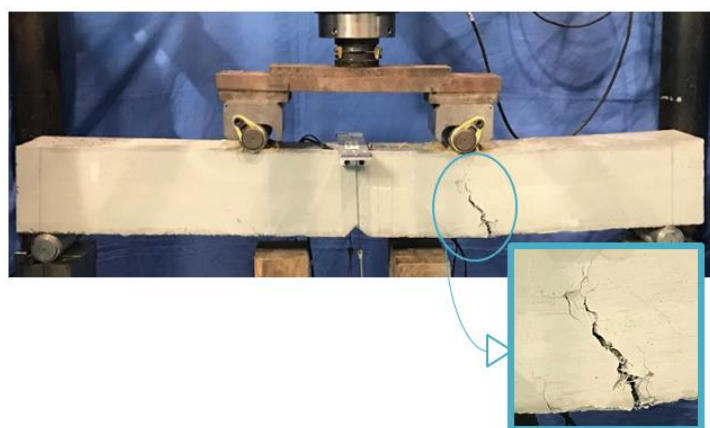


Figura 4.13 – Modo de ruptura da viga reforçada com tecido flexível e 2% de fibra de aço discreta incorporada na matriz (V3).

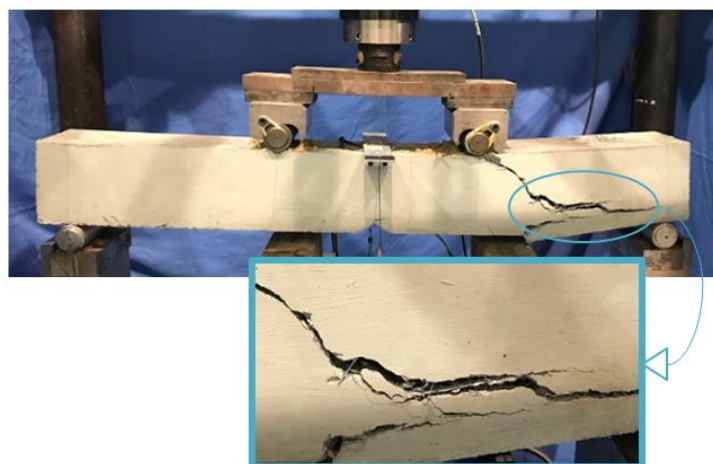


Figura 4.14 – Modo de ruptura da viga reforçada com tecido rígido e 2% de fibra de aço discreta incorporada na matriz (V4).

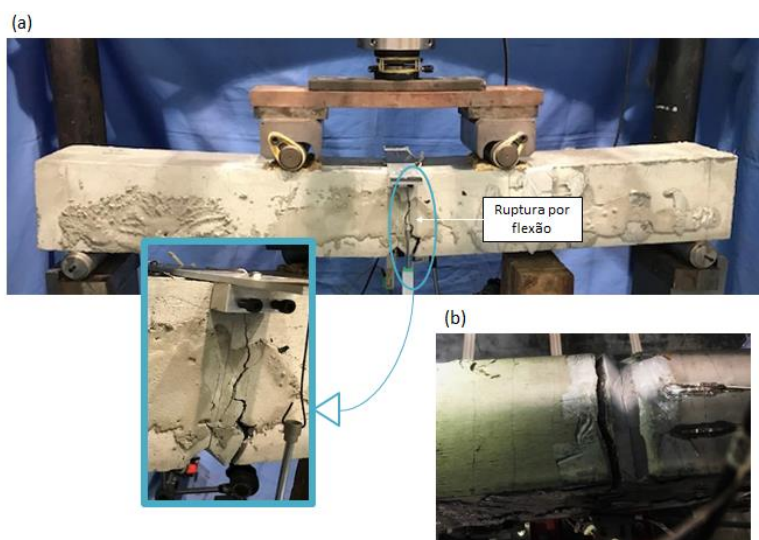


Figura 4.15 – (a) Modo de ruptura; (b) detalhe da vista da face inferior da viga reforçada com tecido flexível nas direções longitudinal e transversal (V5) e 2% de fibra de aço discreta incorporada na matriz.

As vigas V1, V2 e V4 romperam por cisalhamento. Este modo de ruptura já era esperado para as vigas V1 e V2, pois elas não possuíam nenhuma armadura para combater os esforços de cisalhamento. A viga V3 rompeu por um efeito combinado de flexão e cisalhamento, como observado na Figura 4.13. A fissura que levou à ruptura do elemento abriu na direção de um dos pontos de aplicação de carga, onde tanto o momento fletor quanto o cortante são máximos. Entretanto, na fração volumétrica com que foram adicionadas, as fibras de aço não foram capazes de impedir por completo a ruptura por cisalhamento da viga, como visto

nas Figuras 4.13 e 4.14. É possível observar nos detalhes das Figuras 4.13 e 4.14 as fibras curtas de aço que tentaram costurar a fissura.

Estas quatro vigas (V1, V2, V3 e V4) apresentaram fissuras de flexão, que seguiam um padrão de espaçamento entre si, como é característico de concretos têxteis. Nas vigas V3 e V4 a abertura destas fissuras foi tão pequena que não é possível identificá-las nas fotos.

Nas vigas que apresentaram ruptura por cisalhamento, a fissura que levou ao colapso do elemento apareceu na diagonal indo do ponto de aplicação de carga em direção ao apoio. Ao encontrar as camadas de tecido, a fissura se propagou na horizontal. Hegger et al. [81] encontrou este mesmo modo de ruptura para uma viga reforçada com tecido de fibra de vidro. Estas fissuras horizontais ao longo da armadura longitudinal do elemento estrutural são características do efeito de pino [82]. A resistência ao cisalhamento de uma seção fissurada de concreto armado convencional depende de quatro mecanismos: a transmissão das forças pela zona não fissurada, a capacidade da armadura transversal, o engrenamento dos agregados e o efeito de pino [83]. Em elementos sem armadura transversal, a força cortante é transferida apenas pelos dois últimos mecanismos. O efeito de pino pode ser definido como a capacidade da armadura longitudinal de transferir esforços perpendiculares ao seu eixo [82,84]. De acordo com El-Ariss [85], quanto menor a armadura transversal de um elemento, maior a importância do efeito de pino para a resistência ao cisalhamento. Logo, para elementos sem estribos, como é o caso das vigas deste trabalho, o efeito de pino representa um efeito importante na capacidade à força cortante.

A viga V5 rompeu por flexão. Isto indica que as fibras curtas de aço incorporadas à matriz e o tecido de carbono posicionado na direção transversal funcionaram de maneira eficaz como reforço para os esforços de cisalhamento.

Os bons resultados obtidos na viga V5 mostram que a posterior aplicação de argamassa para ocupar os vazios resultantes da concretagem inicial foi eficaz. A argamassa ficou suficientemente aderida ao concreto mais antigo, garantindo o comportamento estrutural do elemento como um todo.

A seguir é feita uma análise comparativa entre as vigas de concreto reforçado com tecido de fibra de carbono e vigas de concreto armado com diferentes taxas de armação longitudinal. As vigas de concreto armado foram fabricadas, ensaiadas e analisadas por Pereira [73]. A ruptura dessas vigas se deu

por flexão. É importante ressaltar que a comparação foi feita mesmo que o modo de ruptura das vigas não tenha sido mesmo. A Figura 4.16 mostra as curvas força *versus* deflexão para as vigas sem adição de fibras curtas de aço e a Figura 4.17 para vigas com adição de fibras curtas de aço.

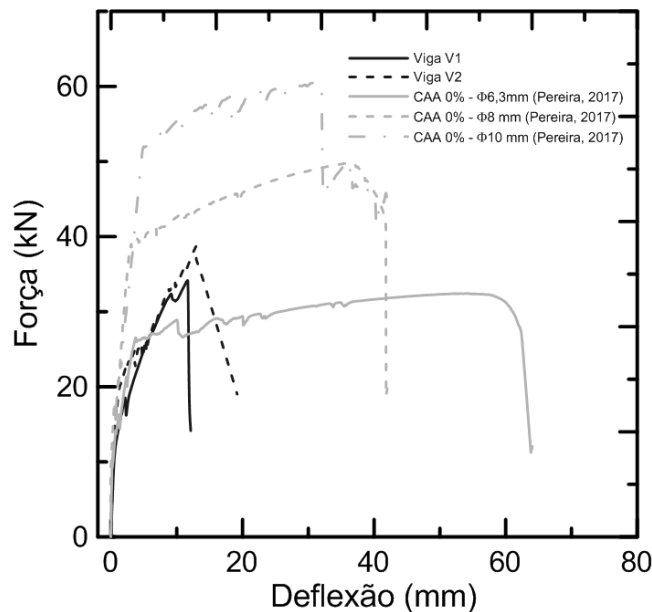


Figura 4.16 – Curvas força *versus* deflexão das vigas de concreto reforçado com tecido de fibra de carbono e vigas de concreto armado, sem adição de fibras curtas de aço na matriz.

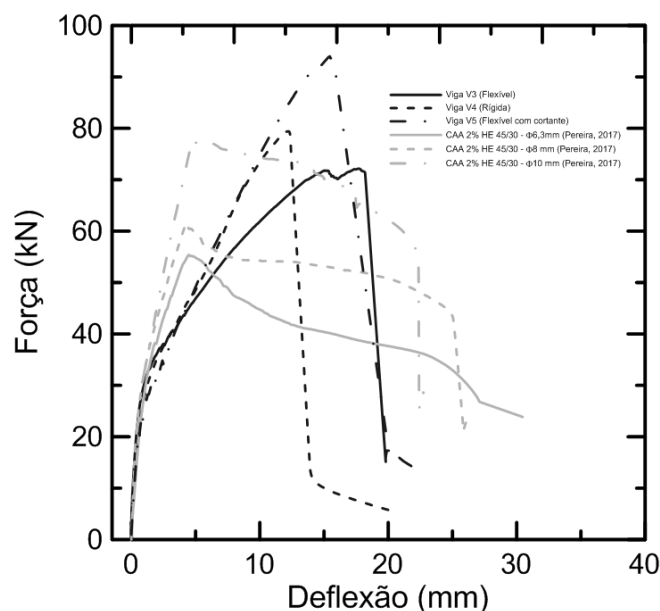


Figura 4.17 – Curvas força *versus* deflexão das vigas de concreto reforçado com tecido de fibra de carbono e vigas de concreto armado, com adição de fibras curtas de aço na matriz.

As vigas de concreto reforçadas com tecido de fibra de carbono sem a adição de fibras curtas de aço apresentaram valores de carga máxima entre os valores obtidos para vigas de concreto armado com barras de aço de diâmetros de 6,3 mm e 8,0 mm. Já as vigas de concreto reforçadas com tecido de fibra de carbono com a adição de fibras curtas de aço apresentaram carga máxima similar, no caso das vigas V3 e V4, e superior, no caso da viga V5, à de uma viga de concreto armado com barra de aço de diâmetro de 10 mm.

A principal diferença entre as vigas de concreto têxtil e as vigas de concreto armado ocorre com relação à ductilidade. O tecido de fibra de carbono não apresenta patamar de escoamento, como as barras de aço, e a sua ruptura leva ao colapso do elemento. As vigas de concreto reforçado com tecido de fibra de carbono apresentaram, então, uma ruptura menos dúctil. Isto poderia representar um problema quanto à utilização destas vigas em aplicações práticas. Porém, a NBR 6118:2014 [86] estabelece valores limite para o deslocamento de elementos estruturais, visando proporcionar um adequado comportamento da estrutura em serviço. Em geral, aplica-se o deslocamento máximo de $l/250$, onde l é o vão do elemento estrutural. No caso das vigas de 1100 mm de vão, o deslocamento máximo permitido pela norma é de 4,4 mm. Para esse nível de deflexão, a curva força *versus* deflexão das vigas de concreto têxtil é coincidente com a curva das vigas de concreto armado convencional, estando a força bem distante da carga máxima. A Tabela 4.6 apresenta os valores das cargas das vigas V1 a V4 para a deflexão de 4,4 mm, assim como o coeficiente de segurança (em relação à carga máxima de cada viga).

Tabela 4.6 – Força equivalente à deflexão de 4,4 mm e coeficiente de segurança das vigas de concreto têxtil

Viga	$F_{4,4}$ (kN)	C.S.
V1	23,4	1,46
V2	25,5	1,52
V3	46,2	1,72
V4	44,8	1,61
V5	45,8	2,05

$F_{4,4}$ = força na deflexão de 4,4 mm; C.S. = coeficiente de segurança ($F_{máx}/F_{4,4}$)

Outra diferença entre as vigas de concreto reforçadas com tecido de fibra de carbono e as vigas armadas com barra de aço é que as primeiras apresentam perda de rigidez, isto é, a inclinação da curva força *versus* deflexão diminui em níveis de carga inferiores à carga máxima. Devido a esta perda de rigidez, as vigas de concreto têxtil atingem os valores de carga máxima em níveis de deflexão maiores que os das vigas de concreto armado.

4.5. Conclusão

Neste capítulo foi estudado o comportamento mecânico do concreto reforçado com tecido de fibra de carbono quando em uma aplicação estrutural. Foram realizados ensaios de flexão a quatro pontos em vigas curtas de concreto têxtil. O processo de fabricação das vigas foi apresentado e os resultados obtidos dos ensaios foram analisados e discutidos. Os resultados das vigas de concreto reforçado com tecido também foram comparados com os de vigas de concreto armado com diferentes taxas de armação longitudinal. Todas as vigas de concreto têxtil apresentaram comportamento do tipo *deflection-hardening* na flexão.

As vigas reforçadas com tecido de carbono flexível (V1) e rígido (V2) sem a adição de fibras curtas de aço na matriz e a viga reforçada com tecido de carbono rígido com a adição de fibras curtas de aço na matriz (V4) apresentaram ruptura por cisalhamento. A viga reforçada com tecido de carbono flexível com a adição de fibras curtas de aço na matriz (V3) apresentou ruptura por um efeito combinado de flexão e cisalhamento. A viga reforçada com tecido de carbono flexível nas direções longitudinal e transversal com adição de fibras curtas de aço (V5) rompeu por flexão. O tipo de ruptura das vigas V1 e V2 já era esperado, uma vez que elas não possuíam nenhum tipo de reforço para combater este tipo de esforço.

A carga máxima das vigas V3 e V4 foi consideravelmente superior à das vigas V1 e V2. Isto mostra que a adição de fibras curtas de aço na matriz é eficaz como reforço a esforços de cisalhamento. Além disso, foi constatado que a adição de fibras curtas de aço no concreto aumenta a carga de primeira fissura. Entretanto, na quantidade com que foram incorporadas à matriz, as fibras curtas

de aço não foram capazes de impedir a falha da viga por cisalhamento ou por uma combinação de esforços de flexão e cisalhamento.

A ruptura por flexão da viga reforçada com tecido de carbono flexível nas direções longitudinal e transversal com a adição de fibras curtas de aço na matriz (V5) indicou que o uso de tecido de fibra de carbono na direção transversal em conjunto com a dispersão de fibras curtas de aço na matriz foi suficiente para absorver os esforços de cisalhamento, impedindo este modo de ruptura.

Quando comparadas com vigas de concreto armado, a carga máxima das vigas de concreto têxtil sem adição de fibras curtas de aço ficou próxima à carga máxima de uma viga de concreto armado com barra de aço de diâmetro de 6,3 mm e 8,0 mm. As vigas de concreto têxtil com fibras curtas de aço incorporadas à matriz apresentaram valores de carga máxima similar aos de uma viga de concreto armado com barra de aço de diâmetro de 10 mm.

A principal diferença entre as vigas de concreto reforçado com tecido de fibra de carbono e vigas de concreto armado ocorre com relação à ductilidade. As primeiras apresentaram ruptura menos dúctil, uma vez que o seu reforço, diferentemente das barras de aço, não possui patamar de escoamento. Além disso, as vigas de concreto têxtil apresentaram queda da rigidez em níveis de carga inferiores à carga máxima, o que contribuiu para que a carga máxima fosse atingida em níveis de deflexão maiores aos das vigas de concreto armado.

5

Conclusões e trabalhos futuros

5.1.

Conclusões

No presente trabalho foi estudado o comportamento mecânico de concretos têxteis reforçados com tecido de carbono. O compósito foi avaliado no nível do material e quando utilizado em uma aplicação estrutural.

Ensaio de tração direta, flexão a quatro pontos e de arrancamento foram realizados para obtenção do comportamento mecânico do material compósito. Foram consideradas como variáveis o tipo de tecido de carbono (flexível e rígido), o número de camadas de reforço (uma ou duas) e a adição ou não de um *coating* de resina epóxi e areia ao tecido. Todos os compósitos apresentaram comportamento *strain-hardening* na tração e *deflection-hardening* na flexão.

Tanto na tração quanto na flexão os compósitos reforçados com tecido de carbono rígido apresentaram desempenho mecânico superior aos reforçados com tecido de carbono flexível. A tensão cisalhante máxima na interface tecido-matriz obtida do ensaio de arrancamento de um filamento do tecido de carbono rígido foi 5,91 vezes maior que a obtida para o arrancamento de um filamento de tecido de carbono flexível. Este resultado indica que a aderência entre o tecido de carbono rígido e a matriz é melhor que a do tecido de carbono flexível, justificando o melhor desempenho mecânico dos compósitos reforçados com tecido de carbono rígido.

A adição do *coating* de resina epóxi e areia aos tecidos de carbono rígido e flexível melhora o comportamento mecânico dos compósitos tanto na tração quanto na flexão. Este efeito foi maior nos compósitos reforçados com tecido de carbono flexível. Os resultados obtidos dos ensaios de arrancamento justificam esta tendência, uma vez que a diferença entre a carga necessária para arrancar um cordão de tecido de carbono flexível com e sem *coating* da matriz foi consideravelmente superior que a diferença entre as cargas de arrancamento do cordão de tecido de carbono rígido com e sem *coating*. Como no processo de

fabricação dos tecidos de carbono é aplicado um *coating* polimérico para proteger e manter a forma dos cordões, os resultados obtidos indicam que o *coating* polimérico utilizado no tecido de carbono rígido é eficaz em melhorar a sua aderência com a matriz, não sendo necessário o uso do *coating* de resina epóxi e areia para alcançar elevado comportamento mecânico.

O aumento do número de camadas de tecidos melhorou o comportamento mecânico dos concretos têxteis reforçados com tecido de carbono flexível e rígido. Este resultado já era esperado uma vez que ao aumentar o número de camadas, também ocorre um aumento da fração volumétrica de reforço no compósito. Entretanto, para os compósitos reforçados com tecido de carbono flexível a adição do *coating* foi mais eficaz na melhora do comportamento mecânico do que o aumento do número de camadas.

Para a avaliação do comportamento mecânico do concreto têxtil reforçado com tecido de carbono quando utilizado em uma aplicação estrutural foram realizados ensaios de flexão a quatro pontos em vigas curtas. Vigas de concreto reforçadas com tecido de carbono flexível e rígido apresentaram ruptura por cisalhamento. A adição de fibras curtas de aço à matriz aumentou a carga de primeira fissura e a carga máxima das vigas. Entretanto, elas não foram capazes de impedir totalmente a ruptura por cisalhamento. A viga de concreto reforçada com tecido de carbono flexível e fibras curtas de aço incorporadas à matriz rompeu por efeito combinado de esforços de flexão e cisalhamento, e a viga reforçada com tecido de carbono rígido com fibras curtas de aço incorporadas à matriz rompeu por cisalhamento. A viga de concreto reforçada com tecido de carbono nas direções longitudinal e transversal com fibras curtas de aço incorporadas à matriz obteve ruptura por flexão. Isto indica que o reforço na direção transversal em conjunto com as fibras curtas de aço foi capaz de absorver os esforços de cisalhamento.

Quando comparadas com vigas de concreto armado com diferentes taxas de armação longitudinal, as vigas de concreto têxtil sem adição de fibras curtas de aço apresentaram cargas últimas semelhantes a vigas de concreto armado com barra de aço de diâmetro de 6,3 mm e 8,0 mm. As vigas de concreto têxtil com fibras curtas de aço incorporadas à matriz apresentaram valores de carga máxima similar aos de uma viga de concreto armado com barra de aço de diâmetro de 10 mm.

As vigas de concreto têxtil apresentaram ruptura menos dúctil que as vigas de concreto armado convencional, uma vez que o seu reforço, diferentemente das barras de aço, não possui patamar de escoamento. Além disso, as vigas de concreto têxtil apresentaram queda de rigidez em níveis de carga inferiores à carga máxima, o que contribuiu para que a carga máxima fosse atingida em níveis de deflexão maiores aos das vigas de concreto armado.

5.2.

Sugestões para trabalhos futuros

Algumas sugestões são dadas a seguir a fim de melhor justificar alguns dos resultados obtidos e dar continuidade ao trabalho iniciado, como:

- análise química do tecido para caracterizar o *coating* polimérico;
- ensaio de tração do cordão e do tecido;
- ensaios dinâmicos do compósito;
- ensaio de arrancamento do cordão levando-se em consideração a sua ancoragem no tecido;
- avaliação do comportamento mecânico dos compósitos expostos a temperaturas elevadas;
- refinamento do processo de moldagem das vigas de concreto têxtil com reforço nas direções longitudinal e transversal;
- ensaios em elementos estruturais de grande escala.

- [1] RILEM TECHNICAL COMMITTEES. **RILEM TC 201-TRC: Textile Reinforced Concrete**. Rilem publications; 2006.
- [2] GROSSE, C. U. (Ed). **Advances in Construction Materials 2007**. Springer Science & Business Media; 2007.
- [3] BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fiber Reinforced Cementitious Composites**. 2.ed. Taylor & Francis, 2007.
- [4] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, properties and materials**. 3.ed. McGraw-Hill; 2006.
- [5] PIVACEK, A.; HAUPT, G. J.; MOBASHER, B. Cement based cross-ply laminates. **Advanced Cement Based Materials**, vol. 6, no. 3-4, pp. 144-152, 1997.
- [6] SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D.; MELO FILHO, J. A.; FAIRBAIRN, E. Effect of reinforcement ratio on the mechanical response of compression molded sisal fiber textile reinforced concrete. **High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC5)**, pp. 175-182, 2007.
- [7] NAAMAN, A. E. Textile reinforced cement composites: competitive status and research directions. **International RILEM Conference on Materials Science**, pp. 3-22, 2010.
- [8] MINUS, M. L.; KUMAR, S. The processing, properties, and structure of carbon fibers. **JOM**, vol. 57, no. 2, pp. 52-28, 2005.
- [9] **Hull, D. An introduction to composite materials**. Cambridge University Press; 1996.
- [10] HERAKOVICH, C. T. **Mechanics of Fibrous Composites**. John Wiley & Sons, Inc.; 1998.
- [11] MOBASHER, B. **Mechanics of Fiber and Textile Reinforced Cement Composites**. CRC Press; 2012.
- [12] CHAND, S. Review - carbon fibers for composites. **Journal of materials science**, vol. 35, no. 6, pp. 1303-1313, 2000.

- [13] SAUDER, C.; LAMON, J.; PAILLER, R. Thermomechanical properties of carbon fibres at high temperatures (up to 2000 °C). **Composites Science and Technology**, vol. 62, no. 4, pp. 499-504, 2002.
- [14] SAUDER, C.; LAMON, J.; PAILLER, R. The tensile behavior of carbon fibers at high temperatures up to 2400 °C. **Carbon**, vol. 42, no. 4, pp. 715-725, 2004.
- [15] XU, S.; KRÜGER, M.; REINHARDT, H. W.; OŽBOLT, J. Bond characteristics of carbon, alkali resistant glass, and aramid textiles in mortar. **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 16, no. 4, pp. 356-364, 2004.
- [16] XU, S.; LI, H. Bond properties and experimental methods of textile reinforced concrete. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci Ed**, vol. 22, no. 3, pp. 529-532, 2007.
- [17] DVORKIN, D.; POURSAEE, A.; PELED, A.; WEISS, W. J. Influence of bundle coating on the tensile behavior, bonding, cracking and fluid transport of fabric cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, vol. 42, pp. 9-19, 2013.
- [18] DONNINI, J.; CORINALDESI, V.; NANNI, A. Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments. **Composites Part B: Engineering**, vol. 88, pp. 220-228, 2016.
- [19] CURBACH, M.; JESSE, F. High-performance textile-reinforced concrete. **Structural engineering international**, vol. 9, no. 4, pp. 289-291, 1999.
- [20] KAW, A. K. **Mechanics of Composite Materials**. CRC Press; 2005.
- [21] NAAMAN, A.E.; REINHARDT, H.W. Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response. **Materials and structures**, vol. 39, no. 5, pp. 547-555, 2006.
- [22] TRIANTAFILLOU, T. C. **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. Woodhead Publishing; 2016.
- [23] BENTUR, A.; PELED, A. Cementitious composites reinforced with textile fabrics. **Third International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC 3)**, RILEM Publications SARL, pp. 31-40, 1999.
- [24] PELED, A.; BENTUR, A. Fabric structure and its reinforcing efficiency in textile reinforced cement composites. **Composites Part A: Applied**

- Science and Manufacturing**, vol. 34, no. 2, pp. 107-118, 2003.
- [25] PELED, A.; BENTUR, A.; YANKELEVSKY, D. Woven fabric reinforcement of cement matrix. **Advanced Cement Based Materials**, vol. 1, no. 5, pp. 216-223, 1994.
 - [26] PELED, A.; BENTUR, A. Reinforcement of cementitious matrices by warp knitted fabrics. **Materials and Structures**, vol. 31, no. 8, pp. 543-550, 1998.
 - [27] PELED, A.; BENTUR, A. Geometrical characteristics and efficiency of textile fabrics for reinforcing cement composites. **Cement and Concrete Research**, vol. 30, no.5, pp. 781-790, 2000.
 - [28] TANABE, Y.; YASUDA, E.; BUNSELL, A. R.; FAVRY, Y.; INAGAKI, M.; SAKAI, M. The strength of pitch-based carbon fibre at high temperature. **Journal of Materials Science**, vol. 26, no. 6, pp. 1601-1604, 1991.
 - [29] ARBOLEDA, D.; BABAEIDARABAD, S.; NANNI, A. Durability of fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) composites. **Proceedings 7th international conference on FRP composites in civil engineering**, 2014.
 - [30] JOHNSTON, C. D. **Fiber-Reinforced Cements and Concretes**. CRC Press; 2010.
 - [31] MORGAN, P. **Carbon Fibers and their Composites**. CRC Press; 2005.
 - [32] DVORKIN, D.; PELED, A. Effect of reinforcement with carbon fabrics impregnated with nanoparticles on the tensile behavior of cement-based composites. **Cement and Concrete Research**, vol. 85, pp. 28-38, 2016.
 - [33] HALVAEI, M.; LATIFI, M.; JAMSHIDI, M. Study of the microstructure and flexural behavior of cementitious composites reinforced by surface modified carbon textiles. **Construction and Building Materials**, vol. 158, pp. 243-256, 2018.
 - [34] LI, Q.; XU, S. Experimental research on mechanical performance of hybrid fiber reinforced cementitious composites with polyvinyl alcohol short siber and carbon textile. **Journal of Composite Materials**, vol. 45, no. 1, pp. 5-28, 2011.
 - [35] PELED, A.; MECHTCHERINE, V.; NICKE, D.; HEMPEL, S. Modifying carbon roving-cement matrix bond by inorganic coating. **High**

- Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC7)**, 2015.
- [36] REINHARDT, H. W.; KRUEGER, M. Prestressed concrete plates with high strength fabric. **6th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)**, 2004.
 - [37] JESSE, F.; ORTLEPP, R.; CURBACH, M. Tensile stress-strain behaviour of textile reinforced concrete. **IABSE Symposium Report**, vol. 86, no.7, pp. 127-134, 2002.
 - [38] HEGGER, J.; VOSS, S. Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete. **Engineering Structures**, vol. 30, no. 7, pp. 2050-2056, 2008.
 - [39] HEGGER, J.; VOSS, S.; DI PRISCO, M.; FELICETTI, R.; PLIZZARI, G. A. Textile reinforced concrete under biaxial loading. **6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes**, pp. 1463-1472, 2004.
 - [40] VOSS, S.; HEGGER, J. Dimensioning of textile reinforced concrete structures. **Proceedings of the 1st International RILEM Symposium on Textile Reinforced Concrete**, pp. 151-160, 2006
 - [41] SCHUETZE, E.; LORENZ, E.; CURBACH, M. Static and dynamic fatigue strength of textile reinforced concrete. **IABSE Symposium Report**, vol. 104, no. 13, pp. 1-8, 2015.
 - [42] BRÜCKNER, A.; ORTLEPP, R.; CURBACH, M. Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear. **Materials and Structures**, vol. 39, no. 8, pp. 741-748, 2006.
 - [43] D'AMBRISI, A.; FOCACCI, F. Flexural strengthening of RC beams with cement-based composites. **Journal of Composites for Construction**, vol. 15, no. 5, pp. 707-720, 2011.
 - [44] OMBRES, L. Flexural analysis of reinforced concrete beams strengthened with a cement based high strength composite material. **Composite Structures**, vol. 94, no. 1, pp. 143-155, 2011.
 - [45] AL-SALLOUM, Y. A.; ELSANADADEY, H. M.; ALSAYED, S. H.; IQBAL, R. A. Experimental and numerical study for the shear strengthening of reinforced concrete beams using textile-reinforced mortar. **Journal of Composites for Construction**, vol. 16, no. 1, pp. 74-90, 2011.
 - [46] SCHLADITZ, F.; FRENZEL, M.; EHLIG, D.; CURBACH, M. Bending

- load capacity of reinforced concrete slabs strengthened with textile reinforced concrete. **Engineering Structures**, vol. 40, pp. 317-326, 2012.
- [47] LORETO, G.; LEARDINI, L.; ARBOLEDA, D.; NANNI, A. Performance of RC slab-type elements strengthened with fabric-reinforced cementitious-matrix composites. **Journal of Composites for Construction**, vol. 18, no. 3, pp. A4013003, 2013.
- [48] BABAEIDARABAD, S.; DE CASO, F.; NANNI, A. URM walls strengthened with fabric-reinforced cementitious matrix subjected to diagonal compression. **Journal of Composites for Construction**, vol. 18, no. 2, pp. 04013045, 2013.
- [49] BABAEIDARABAD, S.; DE CASO, F.; NANNI, A. Out-of-plane behavior of URM walls strengthened with fabric-reinforced cementitious matrix composite. **Journal of Composites for Construction**, vol. 18, no. 4, pp. 04013057, 2013.
- [50] BABAEIDARABAD, S.; LORETO, G.; NANNI, A. Flexural strengthening of RC beams with an externally bonded fabric-reinforced cementitious matrix. **Journal of Composites for Construction**, vol. 18, no. 5, pp. 04014009, 2014.
- [51] AZAM, R.; SOUDKI, K. FRCM strengthening of shear-critical RC beams. **Journal of Composites for Construction**, vol. 18, no. 5, pp. 04014012, 2014.
- [52] HEGGER, J.; KULAS, C.; HORSTMANN, M. Spatial textile reinforcement structures for ventilated and sandwich facade elements. **Advances in Structural Engineering**, vol. 15, no. 4, pp. 665-675, 2012.
- [53] GOPINATH, S.; KUMAR, V. R.; SHETH, H.; MURTHY, A. R.; IYER, N. R.. Pre-fabricated sandwich panels using cold-formed steel and textile reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 64, pp. 54-59, 2014.
- [54] SHAMS, A.; HORSTMANN, M.; HEGGER, J. Experimental investigations on textile-reinforced concrete (TRC) sandwich sections. **Composite Structures**, vol. 118, pp. 643-653, 2014.
- [55] DEY, V.; ZANI, G.; COLOMBO, M.; DI PRISCO, M.; MOBASHER, B. Flexural impact response of textile-reinforced aerated concrete sandwich panels. **Materials & Design**, vol. 86, pp. 187-197, 2015.

- [56] JUNES, A.; LARBI, A. S. An experimental and theoretical study of sandwich panels with TRC facings: Use of metallic connectors and TRC stiffeners. **Engineering Structures**, vol. 113, pp. 174-185, 2016.
- [57] TRIANTAFILLOU, T.; PAPANICOLAOU, C. C. G. Innovative applications of textile-based composites in strengthening and seismic retrofitting as well as in the prefabrication of new structures. **Advanced Materials Research**, vol. 639, pp. 26-41, 2013. 2
- [58] DE SUTTER, S.; REMY, O.; TYSMANS, T.; WASTIELS, J. Development and experimental validation of a lightweight Stay-in-Place composite formwork for concrete beams. **Construction and Building Materials**, vol. 63, pp. 33-39, 2014.
- [59] PAPANTONIOU, I. C.; PAPANICOLAOU, C. G. Textile reinforced concrete (TRC) for precast stay-in-place formwork elements. **Tailor Made Concrete Structures**, pp. 475-481, 2008.
- [60] PAPANICOLAOU, C. G.; PAPANTONIOU, I. C. Mechanical behavior of textile reinforced concrete (TRC)/concrete composite elements. **Journal of Advanced Concrete Technology**, vol. 8, no. 1, pp. 35-47, 2010.
- [61] HEGGER, J.; GORALSKI, C.; KULAS, C. A slender pedestrian bridge made of textile reinforced concrete. **IABSE Symposium Report**, vol. 97, no. 35, pp. 48-55, 2010.
- [62] REMPEL, S.; KULAS, C.; WILL, N.; BIELAK, J. Extremely light and slender precast pedestrian-bridge made out of textile-reinforced concrete (TRC). **High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet**, vol. 1, pp. 2530-2537, 2018.
- [63] SILVA, F. A.; BUTLER, M.; MECHTCHERINE, V.; ZHU, D.; MOBASHER, B. Strain rate effect on the tensile behaviour of textile-reinforced concrete under static and dynamic loading. **Materials Science and Engineering: A**, vol. 528, no. 3, pp. 1727-1734, 2011.
- [64] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR: 11578**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.
- [65] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C125**: Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates. United States, 2016.
- [66] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM**

- C230/230M:** Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement. United States, 2014.
- [67] BÄHR, L. T. D. A. L. Mechanical behavior and numerical modeling of textile reinforced concrete. Rio de Janeiro, 2016. Dissertação de Mestrado - Departameto de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [68] TRINDADE, A. C. C. Desenvolvimento e comportamento mecânico de compósitos geopoliméricos têxteis reforçados com fibra de juta. Rio de Janeiro, 2017. Dissertação de Mestrado - Departameto de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [69] SILVA, F. A.; MOBASHER, B.; TOLEDO FILHO, R. D. Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites. **Cement and Concrete Composites**, vol. 31, no. 10, pp. 721-730, 2009.
- [70] RAMBO, D. A. S.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. Effect of elevated temperatures on the mechanical behavior of basalt textile reinforced refractory concrete. **Materials & Design**, vol. 65, pp. 24-33, 2015.
- [71] SOUZA, L. O. Mecanismos de fissuração e autocicatrização de compósitos cimentícios reforçados com tecido de curauá. Rio de Janeiro, 2017. Dissertação de Mestrado - Departameto de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [72] SILVA, F. A.; BUTLER, M.; HEMPEL, S.; TOLEDO FILHO, R. D.; MECHTCHERINE, V. Effects of elevated temperatures on the interface properties of carbon textile-reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, vol. 48, pp. 26-34, 2014.
- [73] PEREIRA, E. V. Influência de fibras de aço no comportamento mecânico e nos mecanismos de fissuração de concretos autoadensáveis. Rio de Janeiro, 2017. Dissertação de Mestrado - Departameto de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [74] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733:** Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- [75] HINZEN, M.; BRAMESHUBER, W. Influence of short fibres on strength, ductility and crack development of textile reinforced concrete. **Proceedings of the Fifth International RILEM Workshop on High Performance**

- Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC5)**, vol. 53, 2007.
- [76] BARHUM, R.; MECHTCHERINE, V. Effect of short, dispersed glass and carbon fibres on the behaviour of textile-reinforced concrete under tensile loading. **Engineering Fracture Mechanics**, vol. 92, pp. 56-71, 2012.
- [77] MANSUR, M. A.; ONG, K. C. G.; PARAMASIVAM, P. Shear strength of fibrous concrete beams without stirrups. **Journal of Structural Engineering**, vol. 112, no. 9, pp. 2066-2079, 1986.
- [78] LIM, D. H.; OH, B. H. Experimental and theoretical investigation on the shear of steel fibre reinforced concrete beams. **Engineering Structures**, vol. 21, no. 10, pp. 937-944, 1999.
- [79] CUCCHIARA, C.; LA MENDOLA, L.; PAPIA, M. Effectiveness of stirrups and steel fibres as shear reinforcement. **Cement and Concrete Composites**, vol. 26, no. 7, pp. 777-786, 2004.
- [80] DINH, H.; PARRA-MONTESINOS, G. J.; WIGHT, J. K. Shear strength model for steel fiber reinforced concrete beams without stirrup reinforcement. **Journal of Structural Engineering**, vol. 137, no. 10, pp. 1039-1051, 2010.
- [81] HEGGER, J.; KULAS, C.; SCHNEIDER, H. N.; BRAMESHUBER, W.; HINZEN, M.; RAUPACH, M.; BUTTNER, T. TRC Pedestrian Bridge - Design, Load-bearing Behavior and Production Processes of a Slender and Light-weight Construction. **International RILEM Conference on Material Science**, vol. 1, PP. 353-364, 2010.
- [82] FUSCO, P. B. **Estruturas de concreto: solicitações tangenciais**. PINI, 2008.
- [83] GRACE, N. F.; SOLIMAN, A. K.; ABDEL-SAYED, G.; SALEH, K. R. Behavior and Ductility of Simple and Continuous FRP Reinforced Beams. **Journal of Composites for Construction**, vol. 2, no. 4, pp. 186-194, 1998.
- [84] JELIĆ, I.; PAVLOVIĆ, M. N.; KOTSOVOS, M. D. A study of dowel action in reinforced concrete beams. **Magazine of Concrete Research**, vol. 51, no. 2, pp. 131-141, 1999.
- [85] EL-ARISS, B. Behavior of beams with dowel action. **Engineering Structures**, vol. 29, no. 6, pp. 899-903, 2007.
- [86] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procediment. Rio de Janeiro, 2014.

Apêndice A

Nesta seção encontram-se os resultados individuais obtidos nos ensaios de tração direta.

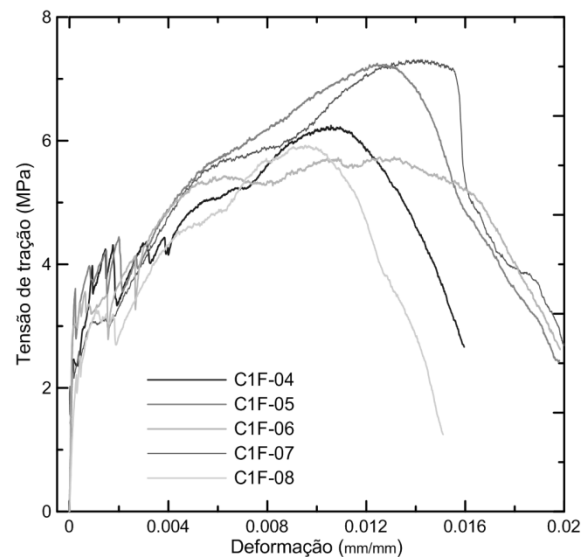


Figura A.1 - Curvas tensão de tração *versus* deformação para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível.

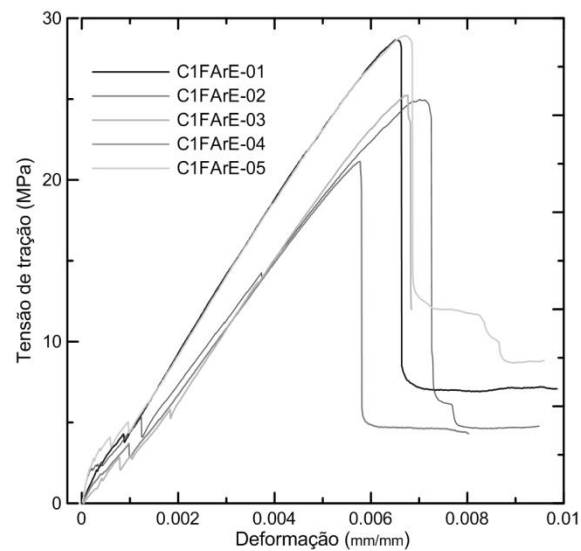


Figura A.2 - Curvas tensão de tração *versus* deformação para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível impregnado com *coating*.

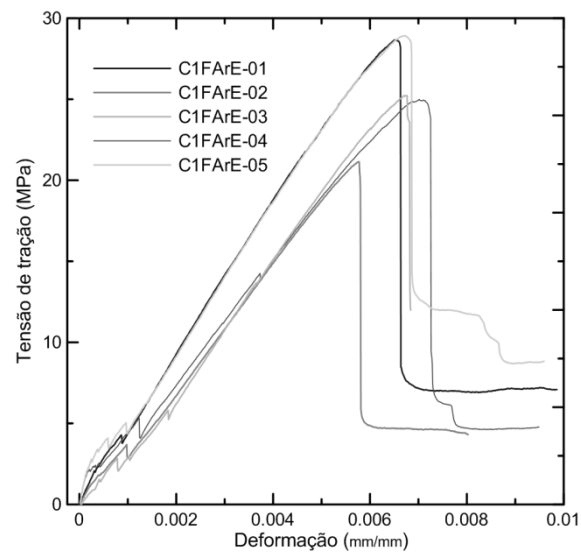


Figura A.3 - Curvas tensão de tração *versus* deformação para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível impregnado com *coating* apenas extremidades.

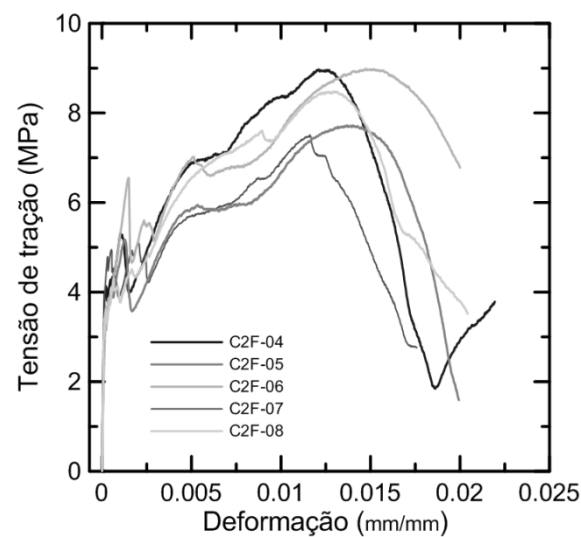


Figura A.4 - Curvas tensão de tração *versus* deformação para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono flexível.

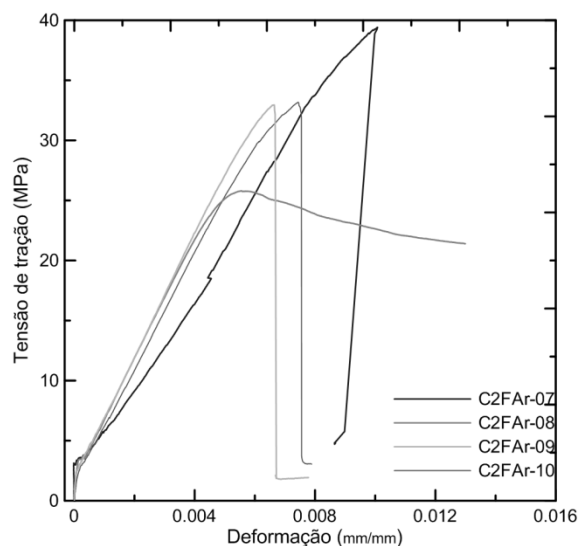


Figura A.5 - Curvas tensão de tração *versus* deformação para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono flexível impregnado com *coating*.

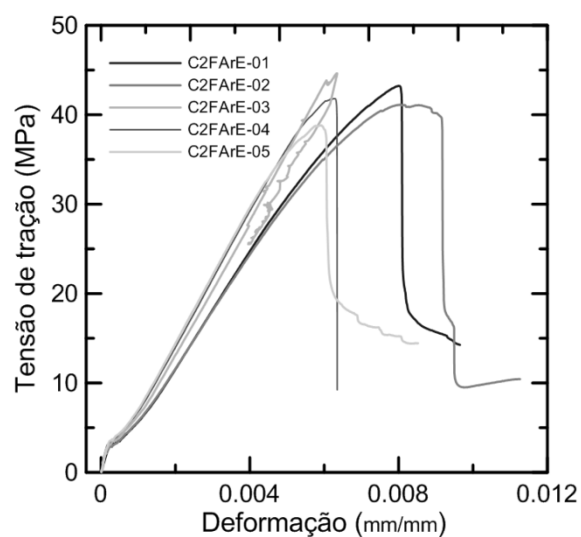


Figura A.6 - Curvas tensão de tração *versus* deformação para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono flexível impregnado com *coating* apenas nas extremidades.

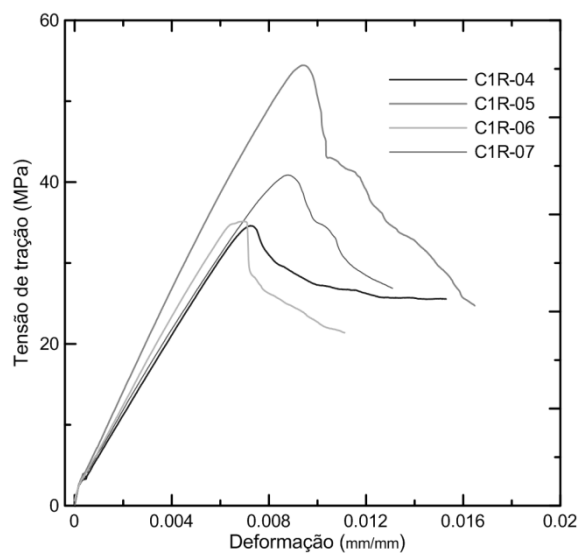


Figura A.7 - Curvas tensão de tração *versus* deformação para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono rígido.

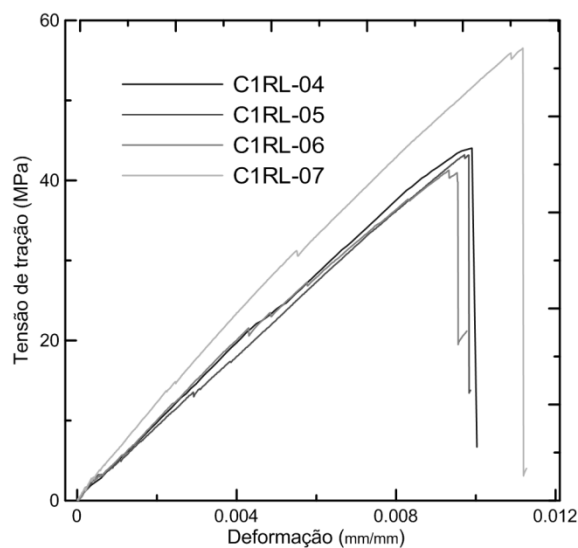


Figura A.8 - Curvas tensão de tração *versus* deformação para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono rígido com a trama na direção do carregamento.

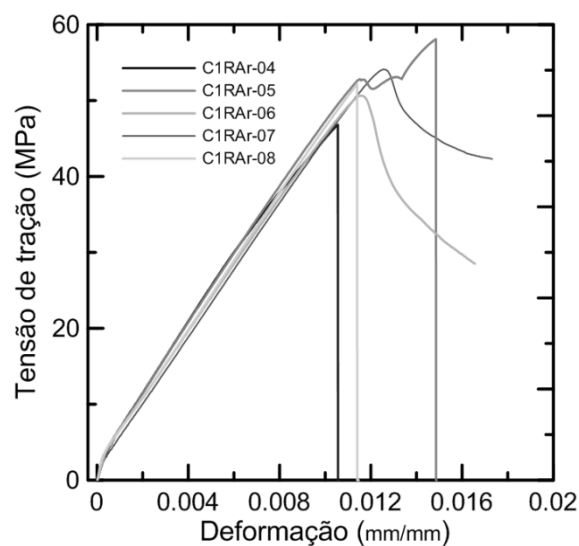


Figura A.9 - Curvas tensão de tração *versus* deformação para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono rígido impregnado com *coating*.

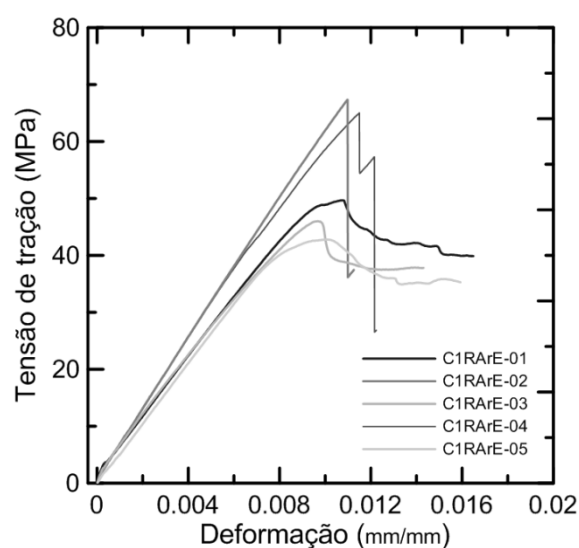


Figura A.10 - Curvas tensão de tração *versus* deformação para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono rígido impregnado com *coating* apenas nas extremidades.

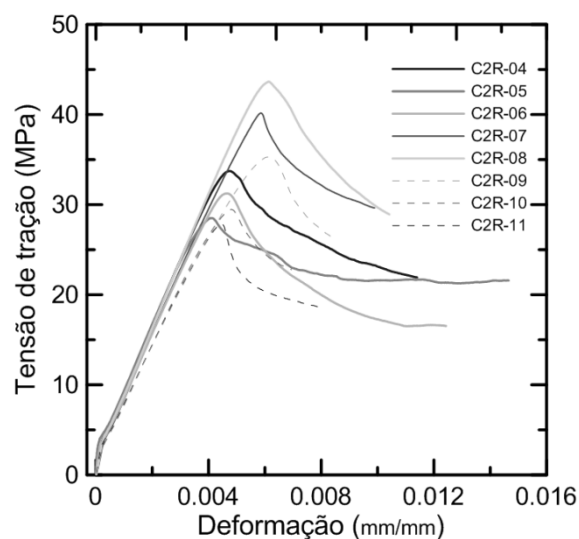


Figura A.11 - Curvas tensão de tração *versus* deformação para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono rígido.

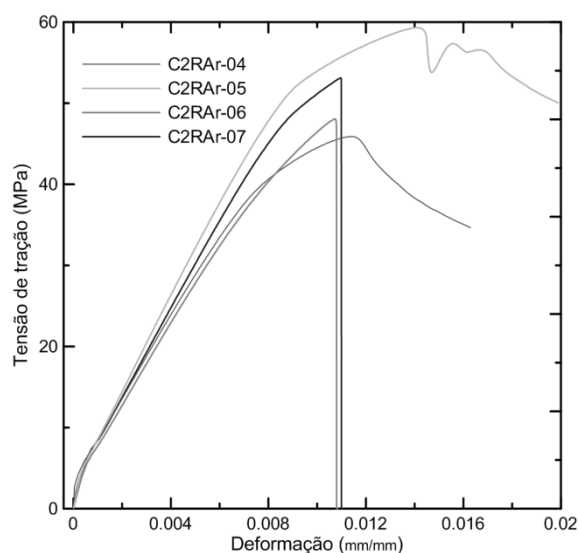


Figura A.12 - Curvas tensão de tração *versus* deformação para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono rígido impregnado com *coating*.

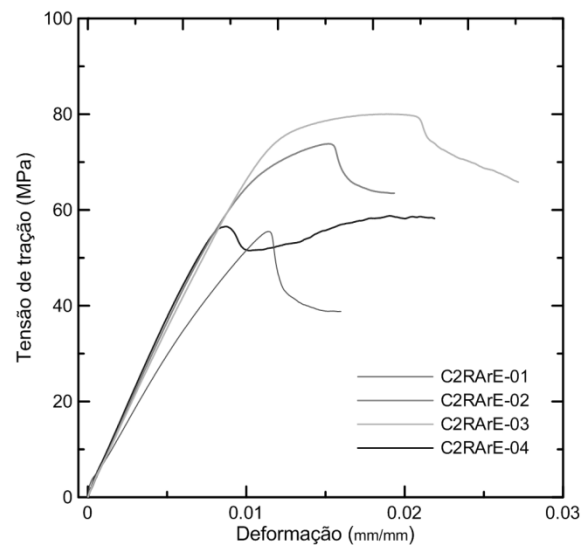


Figura A.13 - Curvas tensão de tração *versus* deformação para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono rígido impregnado com *coating* apenas nas extremidades.

Apêndice B

Nesta seção encontram-se os resultados individuais obtidos nos ensaios de flexão a quatro pontos.

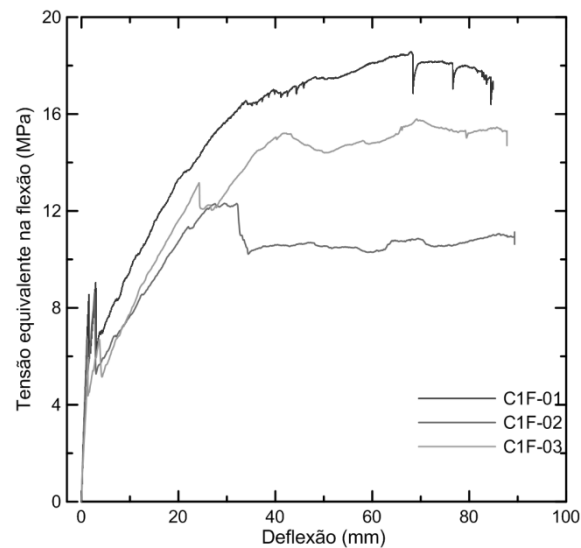


Figura B.1 - Curvas tensão equivalente na flexão *versus* deflexão para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível.

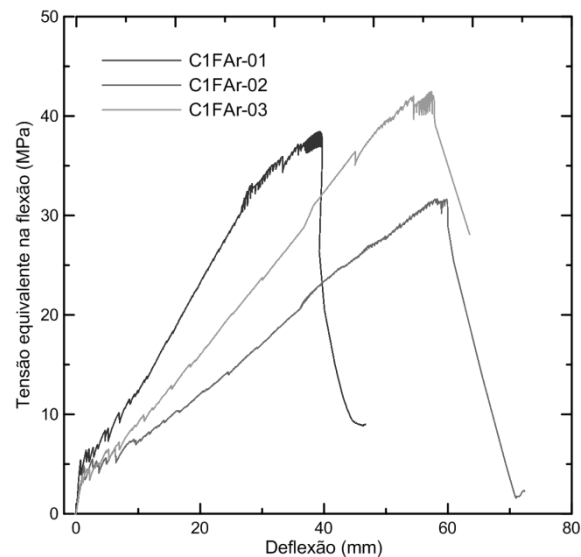


Figura B.2 - Curvas tensão equivalente na flexão *versus* deflexão para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono flexível impregnado com *coating*.

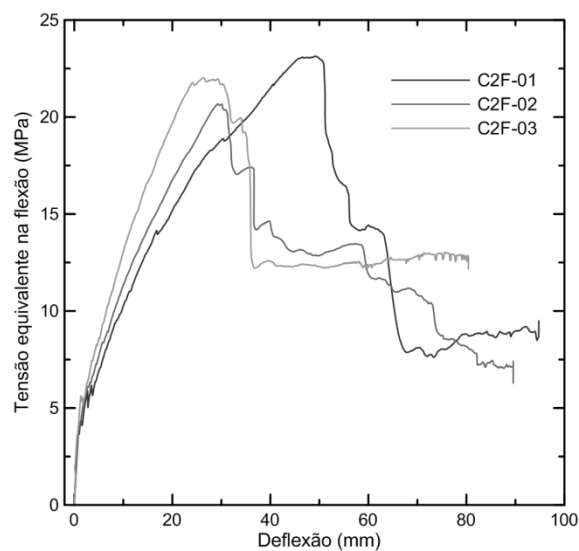


Figura B.3 - Curvas tensão equivalente na flexão *versus* deflexão para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono flexível.

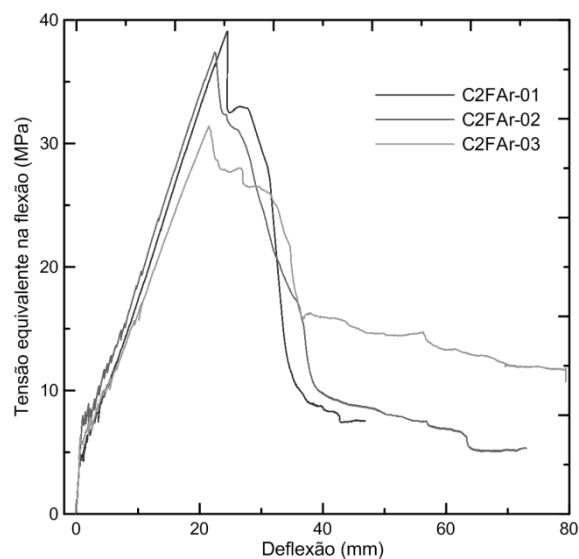


Figura B.4 - Curvas tensão equivalente na flexão *versus* deflexão para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono flexível impregnado com *coating*.

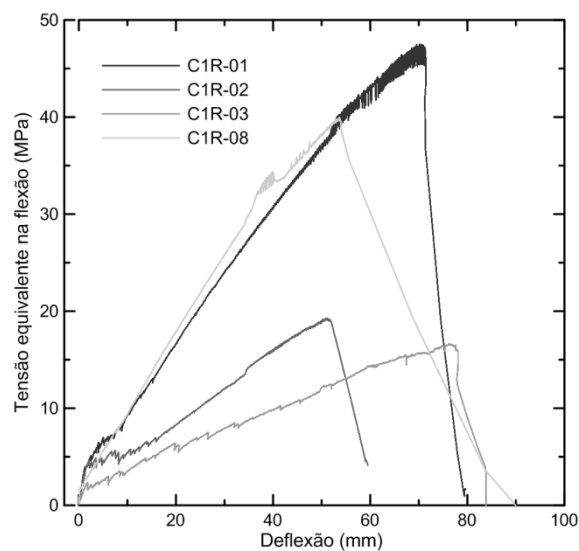


Figura B.5 - Curvas tensão equivalente na flexão *versus* deflexão para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono rígido.

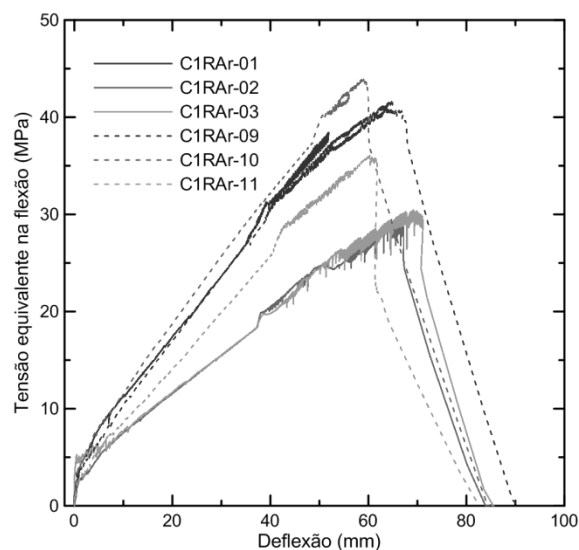


Figura B.6 - Curvas tensão equivalente na flexão *versus* deflexão para os compósitos reforçados com uma camada de tecido de carbono rígido impregnado com *coating*.

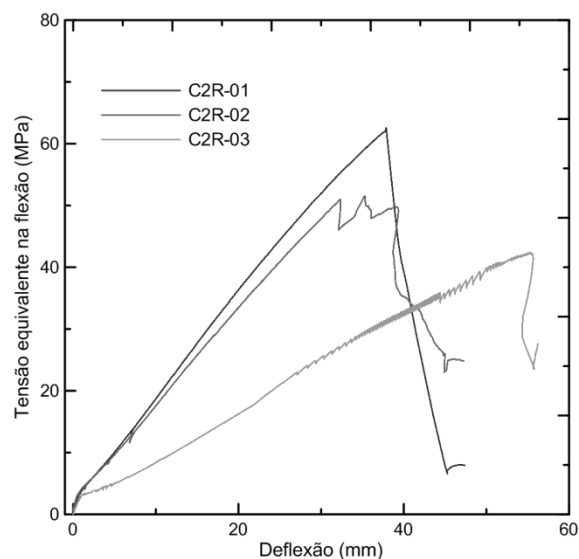


Figura B.7 - Curvas tensão equivalente na flexão *versus* deflexão para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono rígido.

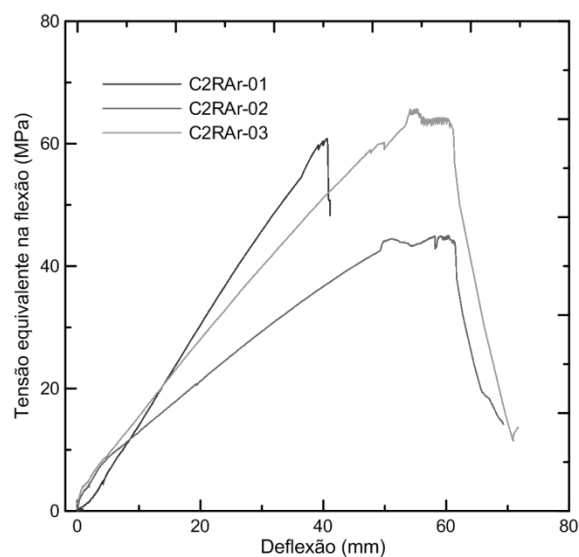


Figura B.8 - Curvas tensão equivalente na flexão *versus* deflexão para os compósitos reforçados com duas camadas de tecido de carbono rígido impregnado com *coating*.