

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
NÍVEL DOUTORADO**

**VINICIUS DE KAYSER ORTOLAN**

**ESTUDO DE MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADA COM FIBRA TÊXTIL PARA  
USO EM PAINÉIS**

**SÃO LEOPOLDO**

**2021**

VINICIUS DE KAYSER ORTOLAN

**ESTUDO DE MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADA COM FIBRA TÊXTIL PARA  
USO EM PAINÉIS**

Tese apresentada como requisito parcial  
para obtenção do título de Doutor em  
Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -  
UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian

SÃO LEOPOLDO

2021

O78e Ortolan, Vinicius de Kayser.  
Estudo de matriz cimentícia reforçada com fibra têxtil para uso em painéis / por Vinicius de Kayser Ortolan. -- São Leopoldo, 2021.

288 f. : il. color. ; 30 cm.

Tese (doutorado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian, Escola Politécnica.

1.Concreto armado. 2.Compostos fibrosos. 3.Concreto – Mistura. 4.Fibras de vidro. 5.Resistência de materiais. I.Tutikian, Bernardo Fonseca. II.Título.

CDU 624.012.45  
666.982.2

VINICIUS DE KAYSER ORTOLAN

**ESTUDO DE MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADA COM FIBRA TÊXTIL PARA  
USO EM PAINÉIS**

Tese apresentada como requisito parcial  
para obtenção do título de Doutor em  
Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -  
UNISINOS

Aprovado em 24 de fevereiro de 2021

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian

Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Geilma Lima Vieira

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

---

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Regina Célia Espinosa Modolo

Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

---

Prof. Dr. Romildo Dias Tolêdo Filho

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

À minha família por todo carinho, apoio e compreensão, sendo eles os maiores incentivadores na realização deste sonho.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à **Deus** por me oportunizar momentos de aprendizado e crescimento humano, profissional e acadêmico.

Agradeço a minha família, a minha esposa, **Bianca Bonalume**, por sempre ter sido minha fortaleza, meu incentivo para seguir em frente com a realização deste sonho. Aos meus pais, **Pasqual e Mirian**, que participaram ativamente com o desenvolvimento do trabalho, auxiliando no corte dos têxteis, na produção de algumas amostras e fôrmas. Além de todo o apoio emocional em todas as horas, sempre na busca do sucesso deste trabalho. Não poderia de lembrar e agradecer por terem deixado eu usar a garagem da casa como laboratório, depósito, maquetaria, oficina, estúdio de foto, enfim, para que as atividades do programa experimental não fossem interrompidas. Á minha irmã, **Tamiris Kayser Ortolan**, que mesmo de longe sempre incentivou o desenvolvimento do trabalho.

Se hoje sou o primeiro da família em concluir o doutorado, é porque vocês souberam da importância para mim e me ajudaram para que este sonho pudesse ser concretizado, a vocês, sou eterno grato.

Ao meu orientador Professor Dr. Bernardo Fonseca Tutikian, por ter confiado a orientação e por toda a parceria desde o trabalho de conclusão do curso da graduação em engenharia civil. Obrigado pelos conselhos e ensinamentos, sou muito grato por todo o aprendizado.

A toda a equipe do **itt Performance**, que tive a feliz oportunidade em também fazer parte, um especial obrigado, vocês não medem esforços para auxiliar a todos, sempre com profissionalismo, comprometimento e atenção com todos, dentro das possibilidades impostas. Em especial, agradeço ao **Gian Moreira** que sempre esteve pronto para auxiliar nos momentos que precisei, sempre muito receptivo e competente em suas atividades. A **Simone Braatz** que sempre muito atenta, possibilitou que todos os ensaios fossem realizados na maior perfeição possível.

Não posso deixar de agradecer a colega de graduação, de PPGEC, de itt Performance e amiga **Fernanda Pacheco**, meus mais sinceros agradecimentos, pelos momentos de apoio acadêmico, profissional e emocional.

Aos **colegas e amigos do LMC** – Laboratório de Materiais de Construção, meu muito obrigado pelo auxílio nas dosagens dos concretos e moldagem das amostras.

Agradeço também as empresas que colaboraram na doação de materiais para o desenvolvimento deste trabalho, a empresa **Texiglass**, que doou os têxteis, a empresa **Concresul**, em nome do **Eng. Marcelo Krumenauer**, que cedeu o agregado miúdo e a sílica ativa. A empresa **Construrohr**, em nome do **Eng. Felipe Lima**, que doou o cimento Portland CPV, a empresa **MC Bauchemie** que disponibilizou o aditivo superplastificante. Agradeço também a empresa **Hilt** que doou a resina epóxi. A estas pessoas e empresas, eu agradeço por entenderem a importância do apoio e contribuição para o desenvolvimento da pesquisa científica.

Aos **amigos e colegas da Universidade Feevale**, agradeço pelos votos de incentivo e torcida para a conclusão deste trabalho. Em especial a colega **Daiana Cristina Metz Arnold**, pelas conversas, debates e discussões acadêmicas e profissionais.

Aos membros das bancas de qualificação e defesa final pelas contribuições.

A UNISINOS, pelo fornecimento da bolsa de pesquisa.

Por fim, agradeço a todos, que de alguma forma, contribuíram para que esta tese fosse realizada e este sonho fosse alcançado. MUITO OBRIGADO.

## RESUMO

O concreto têxtil (TRC) é um composto de matriz cimentícia com adição de fibras longas orientadas produzidas com multifilamentos. Este compósito é capaz de produzir elementos esbeltos, com reduzidas espessuras, e importantes características mecânicas de elevada durabilidade. O presente trabalho tem como objetivo avaliar de modo experimental as características de dois têxteis de vidro álcali resistentes (AR) com diferentes aberturas de malha, bem como a influência nas propriedades mecânicas quando empregados como reforço com diferentes quantidades de camadas em uma matriz cimentícia, a fim de obter parâmetros de eficiência a serem considerados em dois modelos de dimensionamento estrutural analítico. O programa experimental foi desenvolvido em etapas, sendo na inicial, os têxteis foram caracterizados quanto geometria com auxílio de microscópio digital e a resistência à tração direta, tanto no fio isolado quanto no têxtil, para ambas as orientações, trama e urdidura. A resistência à compressão e módulo de elasticidade da matriz cimentícia foram determinados nas idades de 7, 28 e 91 dias. Na etapa seguinte, foram moldados corpos de prova de TRC, para caracterização da resistência à tração e à flexão. Foram produzidos contendo uma e duas camadas do têxtil AR122 e com até quatro camadas do têxtil AR192, com os têxteis posicionados nas duas orientações. Os resultados obtidos foram satisfatórios a partir de duas camadas, pois caracterizaram propriedades desejadas de concreto têxtil. A etapa três, com base nos resultados anteriores, moldou-se painéis com dimensões de 500 x 1000 mm, com espessura de 20 e 30 mm, contendo duas e três camadas do têxtil AR192, a fim de determinar a resistência à flexão. Foi utilizado apenas o têxtil AR 192, porque apresentou resistência mecânica superior em relação ao têxtil AR122. Por fim, na última etapa, com base nos resultados das etapas anteriores, foi possível obter os coeficientes de eficiência  $k_1$  e FPI, como subsídios para procedimentos de dimensionamento analíticos. Os resultados teóricos apresentaram comportamento satisfatórios e condizentes com os resultados experimentais, sendo possível a inserção dos coeficientes para dimensionamento de elementos de painéis.

**Palavras-chave:** Concreto têxtil. Dimensionamento. Coeficiente de eficiência.



## ABSTRACT

Textile reinforced concrete (TRC) is a cementitious matrix with the addition of long oriented fibers produced with multifilament. This composite is able of producing slender elements with reduced thickness, and important mechanical properties of high durability. The present work aims to evaluate in an experimental way the characteristics of two alkali resistant (AR) glass textiles with different mesh openings, as well as the influence on the mechanical properties when used as reinforcement with different amounts of layers in a cementitious matrix, in order to obtain efficiency parameters to be considered in two analytical structural design models. The experimental program was developed in stages, and in the initial, the textiles were characterized in terms of geometry with the aid of a digital microscope and tensile strength, in the isolated yarn and the fabric, for both orientations, weft and warp. The compressive strength and young's modulus of the cement matrix were determined at the ages of 7, 28 and 91 days. In the next stage, were molded TRC specimens to characterize the tensile and flexural strength. Were produced containing one and two layers for the AR122 textile and specimens of one to four layers with the AR192 textile, with the textiles positioned in the two orientations. The results obtained were satisfactory from two layers, as they characterized the desired properties of textile reinforced concrete. Step three, based on the previous results, were molded panels with dimensions of 500 x 1000 mm, containing two and three layers of the AR192 textile, with thickness of 20 and 30 mm, in order to determine the flexural strength, only the textile AR 192 was used, because it demonstrated superior mechanical resistance in relation to the AR122 textile. Finally, in the last step, based on the results of the previous steps, it was possible to obtain the efficiency coefficients  $k_1$  and FPI, as subsidies for analytical design procedures. The theoretical results demonstrated satisfactory behavior and consistent with the experimental results, making it possible to insert the coefficients for design panel elements.

**Keywords:** Textile reinforced concrete. Design. Efficiency coefficient.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Painéis de fachada com painéis de TRC .....	27
Figura 2 – Exemplos de aplicações de TRC: (a) Passarela de pedestre; (b) Cobertura em estrutura tipo casca .....	28
Figura 3 – Sistemas de reforço do concreto.....	36
Figura 4 – Reforço têxtil: malha têxtil (esquerda); estrutura do fio de multifilamentos (direita) .....	37
Figura 5 – Propriedades mecânicas de fios e filamentos .....	39
Figura 6 – Tecido em estrutura do tipo leno (giro inglês) .....	40
Figura 7 – Tecido em estrutura colada.....	41
Figura 8 – Tecido do tipo tricô: (a) esquema ilustrativo; (b) imagem.....	42
Figura 9 – Tecido do tipo pilar: (a) esquema ilustrativo; (b) imagem.....	42
Figura 10 – Influência da geometria do fio no desenvolvimento da tensão: (a) pequeno ângulo e (b) grande ângulo para com a direção do carregamento .....	44
Figura 11 – Tecido volumoso tridimensional .....	45
Figura 12 – Comportamento de arrancamento telescópico de um feixe inserido no interior de uma matriz de cimento: (a) após o processo de arrancamento, esquema tridimensional e (b) esquema bidimensional.....	52
Figura 13 – Representação esquemática do comportamento do TRC à tração.....	54
Figura 14 – Corpo de prova para ensaio de resistência à tração.....	56
Figura 15 – Esquema do comportamento característico à flexão, diagrama carga x deslocamento .....	58
Figura 16 – Efeito do descolamento do cobrimento inferior da matriz por ação da pressão transversal .....	60
Figura 17 – Configuração de carregamento para ensaio de flexão.....	61
Figura 18 – Configuração do teste de flexão em quatro pontos.....	62
Figura 19 – Orientação do reforço em relação à direção do carregamento .....	71
Figura 20 – Distribuição das tensões e deformações na seção transversal do elemento estrutural.....	73
Figura 21 – Esquema de representação da seção transversal com balanço das forças ..	76
Figura 22 – Fluxograma do programa experimental adotado.....	81

Figura 23 – (a) Configuração da malha do tecido AR122, (b) detalhe de fabricação	84
Figura 24 – (a) Configuração da malha do tecido AR192, (b) detalhe de fabricação	85
Figura 25 – Análise granulométrica do agregado miúdo .....	86
Figura 26 – Espalhamento obtido com a proporção dos materiais empregados.....	89
Figura 27 – Amostra de tecido no ensaio de tração .....	91
Figura 28 – Geometria e layout da amostra do ensaio de tração.....	92
Figura 29 – Posicionamento das camadas 1T, 2T, 3T e 4T do reforço no interior da matriz, medida em mm .....	95
Figura 30 – Fôrma para moldagem dos corpos de prova do ensaio de Tração, (a) fôrma; (b) fôrma com a régua posiciona, (c) detalhe da régua .....	97
Figura 31 – Fôrma para moldagem dos corpos de prova do ensaio de Flexão, (a) fôrma; (b) fôrma com a régua posiciona, (c) detalhe da régua .....	98
Figura 32 – Configuração do ensaio de tração direta, unidade em mm .....	99
Figura 33 – Configuração do ensaio de flexão, unidades em mm.....	101
Figura 34 – Posicionamento das camadas do reforço no interior da matriz para os painéis com 20 mm de espessura (a) duas camadas 2T, (b) três camadas 3T.....	104
Figura 35 – Posicionamento das camadas 2T do reforço no interior da matriz com 30 mm (2T T 30).....	104
Figura 36 – Fôrma para moldagem dos painéis, (a) fôrma; (b) fôrma com a régua posicionada, (c) detalhe da régua .....	105
Figura 37 – Configuração do ensaio de flexão dos painéis, medidas em mm.....	106
Figura 38 – Seção transversal do fio na direção da trama do têxtil AR122, (a) cotas longitudinais e (b) cotas transversais .....	110
Figura 39 – Visualização e dimensões dos filamentos da trama, unidade em $\mu\text{m}$ ..	111
Figura 40 – Seção transversal do fio na direção da urdidura do têxtil AR122, (a) cotas longitudinais e (b) cotas transversais .....	112
Figura 41 – Magnificação dos filamentos da urdidura, (a) indicação dos vazios (b) dimensões dos filamentos, unidade em $\mu\text{m}$ .....	113
Figura 42 – Comportamento mecânico à tração individual dos fios nas direções: (a) trama e (b) urdidura.....	116
Figura 43 – Estado de ruptura dos corpos de prova após ensaio na direção da trama .....	117

Figura 44 – Estado de ruptura dos corpos de prova após ensaio na direção da urdidura .....	117
Figura 45 – Vista geral do têxtil AR192, ampliação de 40x .....	120
Figura 46 – Seção transversal do fio na direção da trama do têxtil AR192, (a) cotas longitudinais e (b) cotas transversais .....	121
Figura 47 – Magnificação dos filamentos da trama, indicação dos vazios e dimensões dos filamentos, unidade em $\mu\text{m}$ .....	122
Figura 48 – Seção transversal do fio na direção da urdidura do têxtil AR192, (a) cotas longitudinais e (b) cotas transversais .....	122
Figura 49 – Magnificação dos filamentos da urdidura, indicação dos vazios e dimensões dos filamentos, unidade em $\mu\text{m}$ .....	123
Figura 50 – Comportamento mecânico à tração das amostras AR192 na direção: (a) Trama e (b) Urdidura .....	126
Figura 51 – Alinhamento dos fios da urdidura .....	127
Figura 52 – Estado de ruptura nas amostras AR192, após ensaio de tração dos fios na direção (a) trama e (b) urdidura .....	128
Figura 53 – Diagramas da tensão de tração <i>versus</i> deformação do TRC com uma camada de reforço AR122 na direção da trama nas idades (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias .....	133
Figura 54 – Diagramas da tensão de tração <i>versus</i> deformação do TRC com duas camadas de reforço AR122 na direção da trama nas idades de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias .....	134
Figura 55 – Diagramas da tensão de tração <i>versus</i> deformação do TRC com uma camada de reforço AR122 na direção da urdidura nas idades de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias .....	135
Figura 56 – Diagramas da tensão de tração <i>versus</i> deformação do TRC com duas camadas de reforço AR122 na direção da urdidura nas idades de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias .....	136
Figura 57 – Aspecto final dos corpos de prova de TRC com têxtil AR122 na direção da trama após ensaio de tração conforme idade de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias .....	139
Figura 58 – Aspecto final dos corpos de prova de TRC com têxtil AR122 na direção da urdidura após ensaio de tração conforme idade de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias .....	140

Figura 59 – Número de fissuras e espaçamentos entre fissuras.....	141
Figura 60 – Aspecto de ruptura dos fios de têxtil AR122 na orientação da trama após ensaio de tração conforme idade de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias .....	142
Figura 61 – Aspecto de ruptura dos fios de têxtil AR122 na orientação da urdidura após ensaio de tração conforme idade de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias.....	143
Figura 62 – Diagramas Força vs Deslocamento – Flexão AR122 1T Trama, idades (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias .....	145
Figura 63 – Diagramas Força vs Deslocamento – Flexão AR122 2T Trama; idades (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias .....	146
Figura 64 – Diagramas Força vs Deslocamento – Flexão AR122 1T Urdidura, idades (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias .....	147
Figura 65 – Diagramas Força vs Deslocamento – Flexão AR122 2T Urdidura; idades (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias .....	148
Figura 66 – Aspecto final dos corpos de prova com uma camada de reforço AR122 na direção da trama após ensaio de flexão conforme as idades analisadas .....	152
Figura 67 – Aspecto final dos corpos de prova com duas camadas de reforço AR122 na direção da trama após ensaio de flexão conforme as idades analisadas .....	153
Figura 68 – Aspecto final dos corpos de prova com uma camada de reforço AR122 na direção da urdidura após ensaio de flexão conforme as idades analisadas .....	154
Figura 69 – Aspecto final dos corpos de prova com duas camadas de reforço AR122 na direção da urdidura após ensaio de flexão conforme as idades analisadas .....	155
Figura 70 – Número de fissuras e espaçamentos entre fissuras após ensaio de flexão.....	156
Figura 71 – Diagramas da tensão de tração <i>versus</i> deformação do TRC com uma camada do AR192 na direção da trama nas idades (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias .....	167

Figura 72 – Diagramas da tensão de tração <i>versus</i> deformação do TRC com uma camada do AR192 na direção da urdidura nas idades (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias .....	168
Figura 73 – Diagramas da tensão de tração <i>versus</i> deformação do TRC com duas camadas do AR192 na direção da trama nas idades (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias .....	169
Figura 74 – Diagramas da tensão de tração <i>versus</i> deformação do TRC com duas camadas do AR192 na direção da urdidura nas idades (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias .....	170
Figura 75 – Diagramas da tensão de tração <i>versus</i> deformação do TRC com têxtil AR192 na direção (a) trama com três camadas; (b) urdidura com três camadas; (c) trama com quatro camadas e (d) urdidura com quatro camadas.....	171
Figura 76 – Aspecto final dos corpos de prova de TRC com uma camada de têxtil AR122 após ensaio de tração conforme idade de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias.....	174
Figura 77 – Aspecto final dos corpos de prova de TRC com duas camadas de têxtil AR122 após ensaio de tração conforme idade de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias.....	175
Figura 78 – Aspecto final dos corpos de prova de TRC com três e quatro camadas de têxtil AR122 após ensaio de tração nas orientações do têxtil (a) trama (b) urdidura .....	176
Figura 79 – Número de fissuras e espaçamentos entre fissuras.....	177
Figura 80 – Aspecto do escorregamento do reforço no sentido da trama com (a) três camadas e (b) quatro camadas.....	178
Figura 81 – Aspecto de ruptura dos fios de têxtil AR192 na orientação da trama após ensaio de tração conforme idade de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias .....	180
Figura 82 – Aspecto de ruptura dos fios de têxtil AR192 na orientação da urdidura após ensaio de tração conforme idade de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias.....	181
Figura 83 – Diagramas Força vs Deslocamento – Flexão AR192 1T Trama; (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias .....	183

Figura 84 – Curvas Força vs Deslocamento – Flexão AR192 1T Urdidura; idade (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias .....	184
Figura 85 – Curvas Força vs Deslocamento – Flexão AR192 2T Trama; idade (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias .....	185
Figura 86 – Curvas Força vs Deslocamento – Flexão AR192 2T Urdidura; idade (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias .....	186
Figura 87 – Curvas Força vs Deslocamento – Flexão AR192 3T (a)Trama; (b) Urdidura.....	187
Figura 88 – Curvas Força vs Deslocamento – Flexão AR192 4T (a)Trama; (b) Urdidura.....	187
Figura 89 – Aspecto final dos corpos de prova com uma camada de reforço AR192 na direção da Trama após ensaio de flexão conforme as idades analisadas .....	193
Figura 90 – Aspecto final dos corpos de prova com duas camadas de reforço AR192 na direção da Trama após ensaio de flexão conforme as idades analisadas .....	194
Figura 91 – Aspecto final dos corpos de prova com uma camada de reforço AR192 na direção da Urdidura após ensaio de flexão conforme as idades analisadas .....	195
Figura 92 – Aspecto final dos corpos de prova com duas camadas de reforço AR192 na direção da Urdidura após ensaio de flexão conforme as idades analisadas .....	196
Figura 93 – Aspecto final dos corpos de prova com três camadas de reforço AR192 na direção da Trama e Urdidura após ensaio de flexão .....	197
Figura 94 – Aspecto final dos corpos de prova com quatro camadas de reforço AR192 na direção da Trama e Urdidura após ensaio de flexão .....	198
Figura 95 – Número de fissuras e espaçamentos entre fissuras, 28 dias de cura ..	199
Figura 96 – Diagramas Força x Deslocamento à flexão dos painéis.....	211
Figura 97 – Aspecto final dos corpos de prova AR192 2T A Trama após ensaio de flexão.....	213
Figura 98 – Aspecto final dos corpos de prova AR192 2T B Trama após ensaio de flexão.....	214
Figura 99 – Mecanismo de falha e fissura de cisalhamento e flexão .....	215

Figura 100 – Aspecto final dos corpos de prova AR192 3T Trama, amostra A após ensaio de flexão .....	216
Figura 101 – Aspecto final dos corpos de prova AR192 3T Trama, amostra B após ensaio de flexão .....	217
Figura 102 – Mecanismo de falha do compósito, a) fissuras de cisalhamento e flexão; b) fissura de descolamento; c) escorregamento do têxtil .....	218
Figura 103 – Aspecto final dos corpos de prova AR192 2T Urdidura após ensaio de flexão, amostra A.....	220
Figura 104 – Aspecto final dos corpos de prova AR192 2T Urdidura após ensaio de flexão, amostra B.....	221
Figura 105 – Aspecto final dos corpos de prova AR192 2T Trama com espessura de 30 mm após ensaio de flexão corpo de prova A .....	222
Figura 106 – Aspecto final dos corpos de prova AR192 2T Trama com espessura de 30 mm após ensaio de flexão, corpo de prova B .....	223
Figura 107 – Escorregamento do têxtil.....	224
Figura 108 – Quantidade de fissuras e espaçamento .....	225
Figura 109 – Capacidade da Força de flexão experimental e teórica em função do número de fio e do FPI .....	234
Figura 110 – Capacidade da Força de flexão experimental e teórica em função do número de fio e do FPI para amostras de painéis com espessura de 20 mm .....	237
Figura 111 – Capacidade da Força de flexão experimental e teórica em função do número de fio e do FPI para amostras de painéis com espessura de 30 mm .....	239
Figura 112 – Diagramas Força x Deslocamento dos resultados experimentais relacionados com os teóricos .....	243



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais pesquisas relacionadas ao tema.....	32
Quadro 2 – Composição dos principais materiais constituintes na matriz.....	50
Quadro 3 – Valores de $k_1$ relacionados na bibliografia para têxtil de vidro AR.....	69
Quadro 4 – Propriedades dos tecidos fornecidos pelo fabricante .....	83
Quadro 5 – Proporção unitária da matriz .....	88
Quadro 6 – Quantidade e distinções dos corpos de prova de resistência à tração direta .....	94
Quadro 7 – Quantidade e distinções dos corpos de prova de resistência à tração direta .....	102
Quadro 8 – Síntese da análise de variância da resistência à flexão dos compósitos reforçados com o têxtil AR122.....	160
Quadro 9 – Síntese da análise de variância da resistência à flexão dos compósitos reforçados com o têxtil AR192 entre as idades ensaiadas .....	203
Quadro 10 – Síntese da análise de variância da resistência à flexão dos compósitos reforçados com o têxtil AR192 entre orientações do têxtil.....	206
Quadro 11 – Valores constantes considerados no estudo .....	233

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais propriedades mecânicas de alguns tipos de fibras .....	38
Tabela 2 – Geometria e resistência dos tecidos produzidos com fibras de vidro AR utilizadas em estudos .....	46
Tabela 3 – Características das diferentes tipologias de impregnação .....	47
Tabela 4 – coeficiente de carregamento biaxial – $k_2$ .....	72
Tabela 5 – Características físicas e químicas da sílica ativa .....	86
Tabela 6 – Propriedades físicas do agregado miúdo .....	87
Tabela 7 – Propriedades do aditivo superplastificante .....	87
Tabela 8 – Resultados de resistência à compressão conforme idade de cura .....	108
Tabela 9 – Resultados de módulo de elasticidade conforme idade de cura .....	109
Tabela 10 – Características mecânicas do fio do têxtil AR122 em ambas as direções .....	114
Tabela 11 – Características mecânicas do têxtil AR122 .....	119
Tabela 12 – Características mecânicas do fio na direção da trama e urdidura .....	124
Tabela 13 – Características mecânicas do têxtil AR192 .....	129
Tabela 14 – Resultados médios da resistência à tração direta do TRC com o têxtil AR122 .....	131
Tabela 15 – Valores médios dos resultados do comportamento à flexão dos compósitos reforçados com o têxtil AR122 .....	150
Tabela 16 – Análise de variância da resistência à flexão crítica e máxima dos compósitos reforçados com uma camada do têxtil AR122 na direção da trama .....	157
Tabela 17 – Análise de variância da resistência à flexão crítica e máxima dos compósitos reforçados com duas camadas do têxtil AR122 na direção da trama .....	158
Tabela 18 – Análise de variância da resistência à flexão máxima dos compósitos reforçados com uma camada do têxtil AR122 na direção da urdidura. ....	158
Tabela 19 – Análise de variância da resistência à flexão crítica e máxima dos compósitos reforçados com duas camadas do têxtil AR122 na direção da urdidura .....	159

Tabela 20 – Análise de variância da resistência à flexão máxima dos compósitos reforçados com uma camada do têxtil AR122 entre as direções de reforço .....	161
Tabela 21 – Análise de variância da resistência à flexão máxima dos compósitos reforçados com duas camadas do têxtil AR122 entre as direções de reforço .....	161
Tabela 22 – Valores médios referentes aos resultados da resistência à tração direta dos compósitos reforçados com o têxtil AR192.....	164
Tabela 23 – Valores médios dos resultados do comportamento à flexão dos compósitos reforçados com o têxtil AR192 .....	191
Tabela 24 – Análise de variância da resistência à flexão crítica e máxima dos compósitos reforçados com uma camada do têxtil AR192 na direção da trama .....	200
Tabela 25 – Análise de variância da resistência à flexão crítica e máxima dos compósitos reforçados com duas camadas do têxtil AR192 na direção da trama .....	201
Tabela 26 – Análise de variância da resistência à flexão crítica e máxima dos compósitos reforçados com uma camada do têxtil AR192 na direção da urdidura .....	201
Tabela 27 – Análise de variância da resistência à flexão crítica e máxima dos compósitos reforçados com duas camadas do têxtil AR192 na direção da urdidura .....	202
Tabela 28 – Análise de variância da resistência à flexão máxima dos compósitos reforçados com uma camada do têxtil AR192 entre as direções de reforço .....	204
Tabela 29 – Análise de variância da resistência à flexão máxima dos compósitos reforçados com duas camadas do têxtil AR192 entre as direções de reforço .....	205
Tabela 30 – Análise de variância da resistência à flexão máxima dos compósitos reforçados com três camadas do têxtil AR192 entre as direções de reforço .....	205
Tabela 31 – Análise de variância da resistência à flexão máxima dos compósitos reforçados com quatro camadas do têxtil AR192 entre as direções de reforço .....	205

Tabela 32 – Resultados da resistência à flexão dos painéis .....	209
Tabela 33 – Coeficientes de eficiência para as amostras reforçadas com uma camada na direção da trama .....	227
Tabela 34 – Resultados do momento fletor teórico e erro relativo dos corpos de prova com uma camada de têxtil.....	228
Tabela 35 – Coeficientes de eficiência para as amostras reforçadas com duas camadas na direção da trama .....	229
Tabela 36 – Resultados do momento fletor teórico e erro relativo para amostras com duas camadas de reforço na direção da trama .....	229
Tabela 37 – Coeficientes de eficiência para as amostras reforçadas com três camadas na direção da trama .....	230
Tabela 38 – Resultados do momento fletor teórico e erro relativo para amostras com três camadas de reforço na direção da trama .....	230
Tabela 39 – Análise do momento fletor teórico, momento fletor experimental e erro relativo para amostras de painéis.....	232
Tabela 40 – Erros relativos para os valores de FPI – amostras de escala reduzida .....	235
Tabela 41 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=1.....	236
Tabela 42 – Erros relativos para os valores de FPI para os painéis com espessura de 20 mm .....	238
Tabela 43 – Erros relativos para os valores de FPI para os painéis com espessura de 30 mm .....	238
Tabela 44 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=0,6 (espessura de 20 mm).....	241
Tabela 45 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=0,8 (espessura de 30 mm).....	241
Tabela 46 – Comparativo entre modelos de dimensionamento .....	242

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do ciclo de vida
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ARI	Alta resistência inicial
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AR	Álcali Resistente
BOP	<i>bend-over point</i>
°C	<i>Graus Celsius</i>
CPV	Cimento Portland
GRC	<i>Glass Reinforced Concrete</i>
EPS	Poliestireno expandido a quente
FPI	<i>Fiber Performance Index</i>
FRP	<i>Fiber Reinforced polymer</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i> ou Transformador Diferencial Variável Linear
NBR	Norma Brasileira de Regulação
P	Carga
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
RILEM	<i>Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux e les Constructions</i>
RWTH	<i>Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule</i>
TRC	<i>Textile Reinforced Concrete</i>
TU	Technische Universität
UR	Umidade relativa

## LISTA DE SÍMBOLOS

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
$\alpha$	Alfa
a/c	Água/cimento
A	área da seção transversal
Ac	Área do concreto
At	Área do reforço
$\beta$	Beta
b	Largura
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de cálcio
CH	Hidróxido de cálcio (CH, forma abreviada de Ca(OH) <sub>2</sub> )
C <sub>3</sub> S	Silicato tricálcico (C <sub>3</sub> S, forma simplificada de 3CaO.SiO <sub>2</sub> )
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
d	distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração
E	Módulo de elasticidade
E <sub>f</sub>	Módulo de elasticidade do têxtil
E <sub>c</sub>	Módulo de elasticidade do concreto
E <sub>cr</sub>	Módulo de elasticidade crítica
E <sub>FTRC</sub>	Fator de eficiência
$\epsilon$	Deformação
$\epsilon_t$	Deformação do reforço
$\epsilon_{tu} = \epsilon_{fu}$	Deformação último do reforço
$\epsilon_c$	Deformação da matriz
$\epsilon_{cu}$	Deformação último da matriz
F <sub>ctu</sub>	Força de tração máxima do reforço têxtil
F	Força
F <sub>u</sub>	Força máxima
F <sub>t</sub>	Força do reforço
F <sub>c</sub>	Força da matriz
g	Gramas

GPa	GigaPascal
h	altura
$\sigma_c$	Tensão de compressão
$\sigma_{cu}$	Tensão de tração última (máxima) do compósito
$\sigma_f$	Tensão de tração do reforço
$\sigma_{fil}$	Tensão de tração máxima do filamento
$\sigma_{max}$	Tensão de tração máxima do compósito
$\sigma_{,cr}$	Tensão de tração crítica do compósito
$\sigma_t$	Tensão de tração do reforço
$\sigma_{tu} = \sigma_{fu}$	Tensão de tração última (máxima) do reforço
$k_1$	Coefficiente de eficiência
$k_{0,\alpha}$	Coefficiente de carregamento de ângulo oblíquo
$k_2$	Coefficiente de carregamento biaxial
$k_{fl,p}$	Fator de carregamento à flexão
km	Quilometro
kN	QuiloNewton
L	Comprimento
min	minuto
m	Metro
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
mm	Milímetro
mm <sup>2</sup>	Milímetro quadrado
μm	Micrómetro
MJ	MegaJoule
MPa	MegaPascal
M	Momento fletor
Mu	Momento fletor último
N	Newton
pH	Potencial hidrogeniônico
P <sub>TRC</sub>	Capacidade de carga global
P <sub>f,max</sub>	Força última à tração da malha têxtil
ρ <sub>l</sub>	Taxa de reforço longitudinal

$\rho$	Densidade
$t_{ex}$	Finura
$x = c$	Linha neutra
$z$	Braço de alavanca interno
$\emptyset$	Diâmetro



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>26</b>
1.1 OBJETIVOS .....	30
<b>1.1.1 Objetivo geral</b> .....	<b>30</b>
<b>1.1.2 Objetivos específicos</b> .....	<b>30</b>
1.2 JUSTIFICATIVA .....	31
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA .....	34
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>35</b>
2.1 REFORÇO TÊXTIL .....	36
<b>2.1.1 Geometria dos tecidos</b> .....	<b>40</b>
<b>2.1.2 Tratamento superficial do tecido</b> .....	<b>46</b>
2.2 MATRIZ.....	48
2.3 PROPRIEDADES DE ADERÊNCIA MATRIZ-FIBRA .....	51
2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO TRC .....	53
<b>2.4.1 Resistência à tração</b> .....	<b>53</b>
<b>2.4.2 Resistência à tração na flexão</b> .....	<b>57</b>
2.5 ASPECTOS DE DURABILIDADE DO TRC.....	62
2.6 MODELOS ANALÍTICOS DE DIMENSIONAMENTO.....	65
<b>2.6.1 Modelo I de dimensionamento à flexão</b> .....	<b>67</b>
<b>2.6.2 Modelo II de dimensionamento à flexão</b> .....	<b>74</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODO</b> .....	<b>79</b>
3.1 FATORES FIXOS E VARIÁVEIS .....	82
3.2 MATERIAIS .....	82
<b>3.2.1 Reforço têxtil</b> .....	<b>82</b>
<b>3.2.2 Cimento</b> .....	<b>85</b>
<b>3.2.3 Sílica ativa</b> .....	<b>85</b>
<b>3.2.4 Agregado miúdo</b> .....	<b>86</b>
<b>3.2.5 Aditivo superplastificante</b> .....	<b>87</b>
3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	87
<b>3.3.1 Composição da matriz</b> .....	<b>87</b>
<b>3.3.2 Etapa 1– Caracterização dos materiais</b> .....	<b>89</b>
3.3.2.1 Caracterização da matriz.....	89

3.3.2.2 Caracterização do têxtil .....	90
<b>3.3.3 Etapa 2– Caracterização do concreto têxtil .....</b>	<b>93</b>
3.3.3.1 Corpos de prova .....	93
3.3.3.2 Moldagem dos corpos de prova .....	96
3.3.3.3 Resistência à tração direta .....	98
3.3.3.4 Resistência à tração na flexão .....	101
3.3.3.5 Análise visual dos fios após ruptura .....	102
<b>3.3.4 Etapa 3 – Caracterização do painel.....</b>	<b>102</b>
<b>3.3.5 Etapa 4 - Análises dos parâmetros de dimensionamento .....</b>	<b>106</b>
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>108</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MATRIZ .....	108
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO TÊXTIL .....	109
<b>4.2.1 Têxtil AR 122 .....</b>	<b>109</b>
4.2.1.1 Caracterização geométrica.....	109
4.2.1.2 Caracterização mecânica do fio .....	113
4.2.1.3 Caracterização mecânica do têxtil.....	118
<b>4.2.2 Têxtil AR 192.....</b>	<b>120</b>
4.2.2.1 Caracterização geométrica.....	120
4.2.2.2 Caracterização mecânica do fio .....	123
4.2.2.3 Caracterização mecânica do têxtil.....	129
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO TÊXTIL .....	130
<b>4.3.1 Têxtil AR122.....</b>	<b>130</b>
4.3.1.1 Resistência à tração direta .....	130
4.3.1.2 Resistência à flexão .....	144
4.3.1.2.1 <i>Análise estatística</i> .....	156
4.3.1.3 Síntese dos resultados .....	162
<b>4.3.2 Têxtil AR192.....</b>	<b>163</b>
4.3.2.1 Resistência à tração direta .....	163
4.3.2.2 Resistência à flexão .....	182
4.3.2.2.1 <i>Análise estatística</i> .....	200
4.3.2.3 Síntese dos resultados .....	206
4.4 CARACTERIZAÇÃO DO PAINEL .....	208
4.5 MODELO ANALÍTICO DE DIMENSIONAMENTO .....	225

<b>4.5.1 Modelo I</b> .....	<b>226</b>
4.5.1.1 Painel de maior escala .....	231
<b>4.5.2 Modelo II</b> .....	<b>233</b>
<b>4.5.3 Síntese dos modelos analíticos de dimensionamento.</b> .....	<b>242</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>244</b>
5.1 CONCLUSÕES .....	244
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	246
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>247</b>
<b>APÊNDICE A – TABELAS DOS RESULTADOS RELATIVOS RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA DO TÊXTIL AR122</b> .....	<b>255</b>
<b>APÊNDICE B – TABELAS DOS RESULTADOS RELATIVOS RESISTÊNCIA À FLEXÃO DO TÊXTIL AR122</b> .....	<b>259</b>
<b>APÊNDICE C – TABELAS DOS RESULTADOS RELATIVOS RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA DO TÊXTIL AR192</b> .....	<b>263</b>
<b>APÊNDICE D – TABELAS DOS RESULTADOS RELATIVOS A RESISTÊNCIA À FLEXÃO DO TÊXTIL AR192</b> .....	<b>268</b>
<b>APÊNDICE E – TABELAS DOS RESULTADOS RELATIVOS AOS DEMAIS VALORES DE FPI PARA AS AMOSTRAS DE MENOR ESCALA</b> .....	<b>274</b>
<b>APÊNDICE F – TABELAS DOS RESULTADOS RELATIVOS AOS DEMAIS VALORES DE FPI PARA AS AMOSTRAS DE MAIOR ESCALA (PAINEL) COM ESPESSURA DE 20 MM</b> .....	<b>280</b>
<b>APÊNDICE G – TABELAS DOS RESULTADOS RELATIVOS AOS DEMAIS VALORES DE FPI PARA AS AMOSTRAS DE MAIOR ESCALA (PAINEL) COM ESPESSURA DE 30 MM</b> .....	<b>285</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto reforçado com fibras têxteis é um composto de matriz cimentícia constituída por agregado miúdo de pequenas partículas, com adição de filamentos orientados produzidos por fibras de vidro álcali resistente (AR), carbono, polímeros, aramida ou basalto. A origem desta denominação provém do termo inglês, *Textile Reinforced Concrete* (TRC) (BRAMESHUBER, 2006).

As primeiras pesquisas relacionadas ao concreto têxtil remetem ao final do século 20, pelos autores Curbach e Heeger (1998) na Alemanha, e difundido como importante tecnologia para a construção por Brameshuber, (2006) e Hegger et al., (2006) (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017a).

Por não possuírem elementos metálicos, as espessuras do TRC podem ser reduzidas, assim como as camadas de cobrimento, no entanto, com elevado potencial de durabilidade, ao ser relacionado com reforços metálicos (MOBASHER, 2016; VOGEL; HOLČAPEK; KONVALINKA, 2014).

O concreto reforçado com têxtil, segundo Vogel (2014), apresenta elevada resistência aos esforços de tração e, devido ao comportamento dúctil, importante desempenho quando solicitado à tração na flexão. Laiblová et al. (2017) comentam que estes comportamentos mecânicos são resultantes da associação do reforço têxtil e da matriz cimentícia de elevada resistência à compressão.

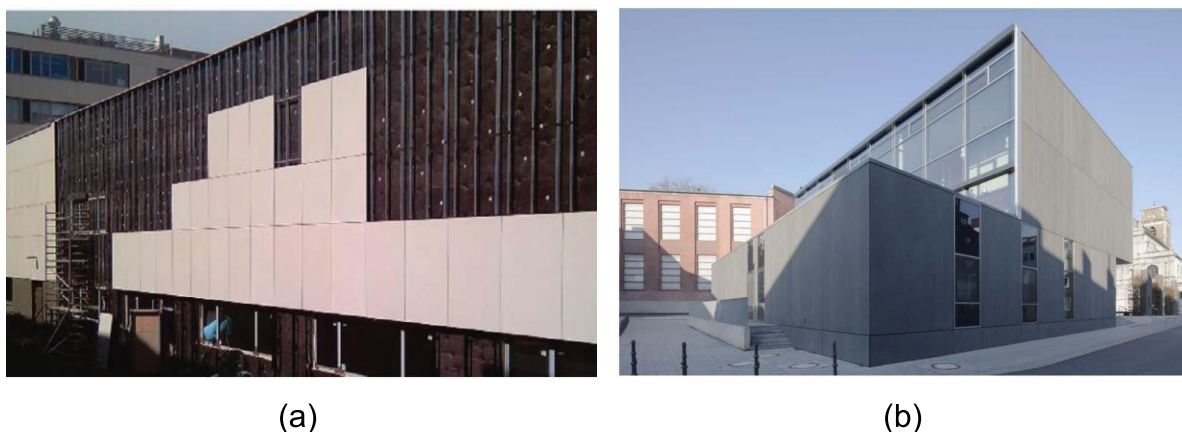
Cabe destacar, que o desenvolvimento do TRC decorre do uso de concretos reforçados com fibras, porém, contando com o benefício do posicionamento orientado dos têxteis, aumentando com isso a eficiência mecânica. Além do mais, devido à otimização da matriz e do têxtil, extingue-se a necessidade de armaduras metálicas para reforço estrutural para específicas situações, e assim, é vedada a ocorrência da corrosão do reforço metálico, manifestação patológica de maior ocorrência em estruturas de concreto armado (SCHEERER; SCHLADITZ; CURBACH, 2015).

Para Mueller et al. (2016), a incorporação de reforços têxteis na matriz de concreto, também garante benefícios à economia de materiais e apresenta qualidades em termos de sustentabilidade ambiental. O que possibilita a utilização em diversas aplicações, tais como: placas estruturais, reforço estrutural ou reparo estrutural de elementos em concreto armado (BÖSCHE et al., 2007; WEILAND et al., 2007; MECHTCHERINE, 2013). Mobasher (2016) acrescenta que elementos em concretos

reforçados com têxteis possuem elevado potencial em construções com peças esbeltas com ou sem função estrutural.

Os possíveis campos de aplicações do TRC envolvem painéis de fachada, como o empregado em uma edificação da Universidade de Dresden, *Technische Universität (TU) Dresden*, (Figura 1a). Mechtcherine, Schneider e Brameshuber (2016) comentam que estes elementos de fachada possuem comprimento entre 1300 e 2000 mm e espessura de 30 mm, reforçados com duas camadas de têxtil produzidos com vidro AR revestidos com resinas estireno butadieno. Outro exemplo de aplicação como painel de fachada é na escola St.-Leonhard, em Aachen, Alemanha (Figura 1b). Devido à combinação do tamanho, com a baixa massa dos painéis com dimensões de até 14 m<sup>2</sup> e espessura de 30 mm, o sistema possibilitou reduzidos custos de transporte e de produção, quando comparados com elementos de concreto armado (REMPEL; HEGGER, 2015).

Figura 1 – Painéis de fachada com painéis de TRC



Fonte: (a) Mechtcherine; Schneider; Brameshuber (2016, p. 26); (b) Rempel e Hegger (2015, p. 338)

Outra possibilidade de uso, como elementos estruturais para passarela de pedestre, como a construída na cidade de Albstadt, na Alemanha (Figura 2a) (TRANTAFILLOU, 2016). E a aplicação como elemento estrutural de cobertura do tipo casca, exemplo a construída no campus da RWTH Aachen University (Figura 2b).

Figura 2 – Exemplos de aplicações de TRC: (a) Passarela de pedestre; (b) Cobertura em estrutura tipo casca



Fonte: (a) Hegger e Will (2016, p. 190); (b) Scholzen, Chudoba e Hegger (2015a, p.106)

Há também outras aplicações como elementos de vedação externo, exemplo a composição de painel do tipo sanduíche, compostos por placas externas de TRC com núcleo em material isolante do tipo poliestireno expandido (EPS) (DE MUNCK et al., 2018).

O comportamento mecânico do TRC tem sido frequentemente estudado em elementos estruturais de pequena escala, com simples comportamento de suporte de carga e configurações simples de reforços têxteis, o que pode desenvolver certa insegurança no comportamento final nos elementos em escala real. Para que elementos de maior escala sejam passíveis de utilização, necessita-se de interação e extrapolação do comportamento em menor escala para o de maior escala. Neste sentido, validar o modelo de escala real de modo experimental também se faz necessário (HEGGER et al., 2015). Rempel et al. (2018) analisaram, em laboratório, o comportamento estrutural de uma passarela com 15,5 m de comprimento, reforçada com têxtil de carbono, a qual demonstrou propriedades adequadas aos níveis de segurança requeridos para uso como passarelas.

O uso do TRC como painéis de fachada apresenta adequados valores de resistência frente às solicitações naturais de uso (ENGBERTS; FYDRO, 2006; VOGEL, 2014; MUELLER et al., 2016; SHAMS et al., 2015). Como apresentam Engberts e Fydro (2006), na análise de painéis de fachada com dimensões de 3490 x 1040 mm (comprimento x largura) e espessura de 25 mm, os painéis alcançaram comportamentos satisfatórios às solicitações de uso, resultando em deformações inferiores à relação  $L/300$  no centro da placa.

Para que estas propriedades mecânicas do TRC fossem alcançadas de forma satisfatória, a matriz cimentícia deve interagir adequadamente com o reforço têxtil. Para Purnell et al. (2006) e Peled (2016), a qualidade da aderência das fibras com a matriz desempenha característica importante na capacidade de resistir às solicitações mecânicas. Em decorrência desta propriedade de aderência, Williams Portal et al. (2014) afirmaram que a resistência à tração do têxtil não pode ser utilizada por completo, a qual deve ser relacionada à interação conjunta da matriz com o reforço, o que resulta em fatores de regulação de eficiência.

O coeficiente de eficiência, pode ser obtido através do teste de resistência à tração uniaxial e é definido como a razão entre a tensão máxima do compósito e a resistência à tração máxima do reforço (HEGGER; VOSS, 2008). O coeficiente guia os parâmetros de dimensionamento estrutural do concreto têxtil e distingue a possibilidade de adoção dos modelos clássicos de dimensionamentos do concreto armado, pois segundo Schnabel e Gries (2011), o concreto têxtil apresenta diversidade nas propriedades mecânicas dos tecidos utilizados para reforço, o que afeta a resposta da tensão e deformação do compósito. Apenas com o conhecimento das propriedades mecânicas do reforço e da interação com a matriz, segundo Hegger, Schneider e Kulas (2010), que a etapa de dimensionamento de painéis de fachada se faz possível.

Como existem diversos tipos de reforço têxtil, em função do material, do modo de produção do têxtil e da finura, necessitando com isto o conhecimento do comportamento isolado do reforço bem como a interação com a matriz. Neste sentido, Williams Portal et al. (2014) analisaram de forma comparativa, as alternativas de reforços têxteis com o concreto armado, em relação ao comportamento mecânico de flexão unidirecional de painel com dimensões de 1000 x 1000 x 80 mm, com diferentes alternativas de reforço têxtil, sendo elas: fibra de vidro AR, carbono e basalto. Os autores observam que, ao comparar o concreto armado convencional com diferentes reforços têxteis, para o mesmo valor de momento fletor, a espessura pode ser reduzida de 80 mm do concreto armado para 40 mm quando reforço têxtil de carbono e 50 mm quando o elemento é reforçado com têxtil de vidro AR e basalto.

Laiblová et al. (2014, 2017) relacionaram resultados mecânicos com a redução do impacto ambiental nas construções, pois, ao serem produzidos elementos esbeltos com reduzidos consumos de concreto, atende-se aos requisitos almejados de sustentabilidade ambiental. Percebe-se, ainda, a menor extração de materiais como

os agregados e demais componentes para desenvolvimento de elementos que tenham a mesma capacidade portante, destacando as vantagens do ponto de vista da sustentabilidade ambiental. Também nesse contexto, os autores acrescentaram a maior expectativa de durabilidade do TRC como um dos principais benefícios.

Vogel (2014) e Williams Portal et al. (2014) realizaram análises de avaliação do ciclo de vida (ACV), as quais comprovaram vantagens da utilização de painéis de concreto têxtil em relação aos parâmetros de sustentabilidade ambiental. A avaliação do ACV mostrou que é possível reduzir a demanda de energia acumulada e o impacto ambiental de um elemento de concreto quando este for reforçado com têxtil.

Williams Portal et al. (2014) ampliaram a discussão ao comparar o impacto ambiental do têxtil de vidro com o aço. O reforço de vidro, isolado, apresentou maior impacto ambiental ao ser comparado com o aço, entretanto, ao ser inserido na matriz cimentícia, o impacto tornou-se inferior à matriz reforçada com aço, visto que o reforço não metálico possibilita menores espessuras de seção transversal. A reduzida massa dos elementos de TRC, consequência das mínimas espessuras, aliada a importante resistência à tração, são os principais fatores que tornam o concreto têxtil um material com menor impacto ambiental (NGUYEN et al., 2020).

Para Hegger, Kulas e Horstmann (2011), a redução da seção transversal é possível em decorrência da camada de cobertura de concreto no reforço têxtil ser reduzida, resultado da não reação corrosiva das fibras com o meio externo. Os autores acrescentam a necessidade de uma camada de concreto de 3 mm, para que ocorra interação entre a matriz e o reforço.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Analisar, experimentalmente, as características de têxteis de vidro AR, a fim de relacionar as propriedades obtidas ao modelo de dimensionamento analítico, para o uso em painéis.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:



- a) analisar, experimentalmente, a resistência à tração de dois têxteis de vidro AR;
- b) analisar a interação do têxtil com a matriz, quando submetido ao esforço de tração direta e à flexão, para ambas as orientações do têxtil;
- c) caracterizar de modo experimental, um painel reforçado com um têxtil, quanto ao comportamento mecânico à flexão;
- d) definir, experimentalmente, o coeficiente de eficiência do têxtil de vidro AR para balizar os modelos de dimensionamento;
- e) validar, de forma experimental, dois modelos analíticos de dimensionamento, com os parâmetros encontrados neste estudo;

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Na atual conjuntura de inovação dos materiais de construção frente aos quesitos de sustentabilidade ambiental exigidos pela sociedade, o concreto têxtil vai ao encontro destes propósitos, com expressiva redução da espessura para a mesma solicitação, quando comparado com o concreto armado (MECHTCHERINE, SCHNEIDER; BRAMESHUBER, 2016; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017; NGUYEN et al., 2020). Neste contexto positivo, o concreto têxtil no cenário internacional apresenta potencial substituição parcial do concreto armado para elementos construtivos específicos, tais como elementos de fechamento de fachada (HEGGER et al., 2017; TRIANTAFILLOU, 2016).

Para que isto ocorra, faz-se necessário compreender o comportamento mecânico à tração do têxtil isolado, bem como o comportamento à tração direta e à flexão da matriz cimentícia reforçada com têxtil (WILLIAMS PORTAL et al., 2016). Em específicas regiões do mundo, os comportamentos mecânicos são conhecidos, o que já possibilitou a sua aplicação na construção civil.

Entretanto, a reprodução da aplicação com os materiais produzidos nacionalmente, não é possível, pois não há pesquisas nacionais suficientes que expõem as propriedades. Ou seja, para a utilização dos materiais nacionais, faz-se necessário conhecer o comportamento individual do têxtil, assim como, os coeficientes de eficiência, que relacionam a interação com a matriz, para então aplicar a metodologia de dimensionamento analítico já consolidada.

O setor privado, na Alemanha, juntamente com universidades, iniciaram investimentos no desenvolvimento do compósito, resultando no surgimento de diversos grupos e associações que visam a troca de experiências, difundir o conceito do TRC e obter avanços comerciais (SCHEERER; SCHLADITZ; CURBACH, 2015).

Ainda assim, existem diversas lacunas a serem compreendidas acerca do comportamento mecânico do TRC, motivada pelas inúmeras variáveis que recaem sobre o têxtil, como a geometria, o material, a forma de produção e propriedades dos fios (GRIES; OFFERMANN; PELED, 2006).

A visto disso, a introdução de compósitos de fibras têxteis no mercado é cautelosa e demanda pesquisas aprofundadas. A exemplo, uma ampla variedade de publicações já demonstra o interesse mundial por este material estrutural (HEGGER; WILL, 2016). Com o intuito de relacionar as pesquisas desenvolvidas no concreto têxtil, de modo cronológico, e os locais de desenvolvimento, o Quadro 1 indica os estudos mais relevantes.

Quadro 1 – Principais pesquisas relacionadas ao tema

<b>Referência</b>	<b>Inovação</b>	<b>País</b>
Hegger; Voss, (2008)	Modelos de dimensionamento do TRC	Alemanha
Schütze; Lorenz; Curbach (2015)	Desenvolvimento de procedimentos avaliativos do comportamento mecânico	Alemanha
Colombo, Colombo, Di Prisco (2015a)	Caracterização mecânica de painel sanduíche pré-fabricado	Itália
Rilem, (2016)	Recomendação para avaliação da resistência à tração	Alemanha
Tomazi Kny et al., (2017)	Análise computacional do potencial utilização do concreto têxtil como elemento para distribuição de energia	Brasil
Vlach et al., (2018)	Recomendação do procedimento de ensaio para avaliação da resistência à tração na flexão	República Tcheca
Hawkins et al., (2018)	Análise do modelo analítico de dimensionamento com base em ensaios de tensão-deformação	Reino Unido
Souza; Souza; Silva (2018)	Concreto reforçado com têxtil natural de Curauá	Brasil
Araújo, (2019)	Desenvolvimento de um modelo computacional para simulação numérica de peças em concreto têxtil aplicando o método dos elementos finitos	Brasil
Giese (2019)	Determinar se o reforço de ART aplicado em uma viga de concreto armado promove aumento de sua	Brasil

	capacidade resistente e como os parâmetros de execução	
Kamani et al., (2019)	Aplicação do coeficiente FPI, considerando número de fios em têxtil de carbono	Irã
Colombo; Colombo; Di Prisco (2019)	Validação do modelo de dimensionamento numérico de painel sanduíche com ensaio experimental de flexão	Itália
Silva; Silva (2020)	Estudo sobre o comportamento mecânico do TRC de carbono submetido a esforços de flexão e tração direta	Brasil
Hamilko Giese et al. (2020)	Avaliar o desempenho do TRM utilizando têxtil brasileiro de fibra de vidro como armadura de flexão em vigas RC.	Brasil
Goliath; Cardoso; Silva (2020)	Investigar o desempenho de vigas em TRC reforçadas com têxtil de carbono, considerando diferentes condições do material: TRC simples, TRC revestido de areia e híbrido TRC-SHCC.	Brasil
Cibulka; Musil; Vodicka (2020)	Apresentar os resultados de experimentos em dois conjuntos de placas ultrafinas reforçadas com tecidos de vidro 3D com diferentes densidades de malha.	República Tcheca
Rempel; Ricker; Hegger (2020)	Lista parâmetros variáveis e discute sobre a relevância dos parâmetros na influência dos resultados mecânicos à flexão	Alemanha
O'hegarty; Kinnane (2020)	Uma revisão bibliográfica sobre painéis sanduíche pré-fabricados relaciona o corpo de pesquisa realizada e analisa soluções de projeto propostas e resultados de testes para identificar futuros focos de pesquisa.	Irlanda
(VALERI et al., 2020)	Concreto têxtil para construções sustentáveis: Perspectiva de futuro e aplicação em um protótipo de pavilhão	Suíça
(NGUYEN et al., 2020)	Segurança contra incêndio em compósitos de construção pré-fabricada: Do reforço com fibras poliméricas para o concreto têxtil	Austrália
(LIU et al., 2021)	Estudo experimental e modelagem analítica do desempenho à tração do concreto têxtil com têxtil de basalto	China
(TROCHOUTSOU et al., 2021)	Caracterização mecânica da argamassa reforçada com têxtil de Linho e Juta	Reino Unido

Todavia, nota-se uma lacuna, em pesquisas relacionadas com materiais fabricados no território brasileiro, especificamente do têxtil de vidro AR para aplicação em painéis.

Com base neste cenário, faz-se necessário, primeiramente, avaliar a potencial inserção dos têxteis produzidos pela indústria brasileira como reforço em elementos de concreto de espessura reduzida. Como produto desta tese, o trabalho almeja

informar a resistência mecânica do TRC, bem como determinar coeficientes de eficiência para inserção em procedimentos de dimensionamentos analíticos.

Os trabalhos desenvolvidos em âmbito nacional, não empregam o têxtil produzido no Brasil para reforço em painel, apenas como reforço em vigas de concreto armado.

Além do mais, por apresentar importante potencial ambiental, visto que demanda reduzido consumo de material e elevada durabilidade frente ao concreto armado.

Destaca-se com isto, a justificativa de desenvolvimento deste estudo, o qual se enquadra na linha de pesquisa de otimização de processos para minimização de resíduos, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Unisinos.

É delineada, com base nestas evidências, a justificativa de desenvolvimento desta tese de doutorado.

### 1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta tese está organizada em seis capítulos. Sendo o primeiro responsável pela apresentação da introdução do estudo, os objetivos e justificativa. No segundo capítulo, é abordado o referencial teórico necessário para o desenvolvimento deste trabalho. Ao longo do capítulo três, são apresentados os materiais utilizados para a elaboração do programa experimental, bem como os procedimentos adotados para confecção dos corpos de prova, realização dos ensaios e equipamentos empregados. Os resultados alcançados são apresentados e discutidos no capítulo quatro. Dando continuidade, o capítulo cinco aborda as conclusões do estudo. Por fim, o último tópico reúne as referências bibliográficas utilizadas para a realização deste trabalho.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O concreto têxtil consiste de uma matriz cimentícia reforçada com fios de multifilamentos contínuos posicionados na direção da tensão principal (BRAMESHUBER, 2006; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

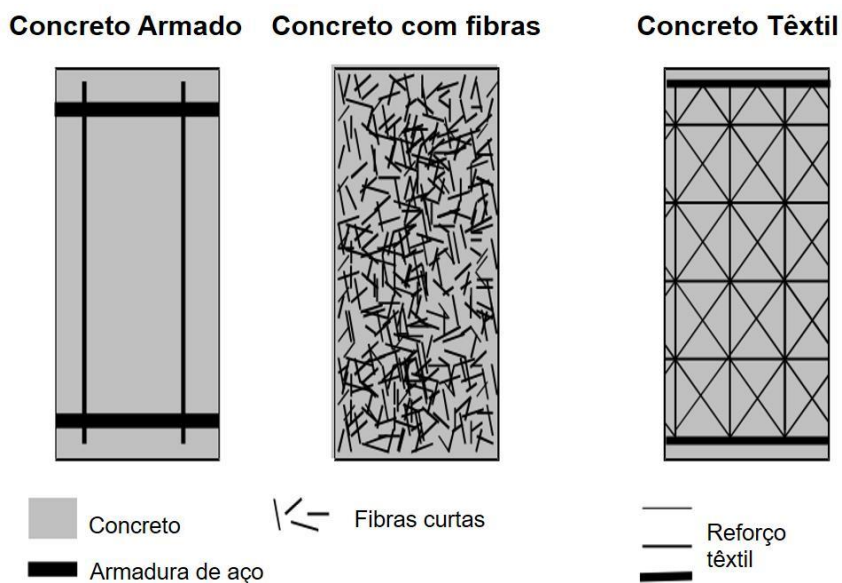
O termo “têxtil” é uma referência ao processo de fabricação dos fios em forma de malha, tramados semelhantes às de um tecido, o que permite a garantia da mesma taxa de filamentos por toda a extensão do material (TRIANAFILLOU, 2016).

Para Peled, Bentur e Mobasher (2017), tecido é uma estrutura têxtil fabricada em fios, montados por diversos procedimentos, que podem ser: tecelagem, tricô, tranças ou ligação de teias. Em geral, os têxteis estão associados a roupas ou aplicações domésticas; no entanto, a aplicação de têxteis é mais ampla em vários ramos da indústria (TRIANAFILLOU, 2016).

O concreto têxtil, segundo Schneider, Schätzke e Bergmann (2006), pouco difere do concreto armado. No estado fresco, ambos possuem fluidez adequada à moldagem em formas e em geometrias distintas, entretanto o concreto reforçado com têxtil, no estado endurecido, apresenta positivas características mecânicas em elementos de espessuras entre 8 e 30 mm, o que não é observado no concreto armado, que demanda maiores espessuras e conseqüente maior uso de materiais em sua composição.

Hegger e Voss (2004) elucidam a distinção entre o concreto armado, concreto reforçado com fibras curtas e o concreto reforçado com têxtil, de acordo com a Figura 3.

Figura 3 – Sistemas de reforço do concreto



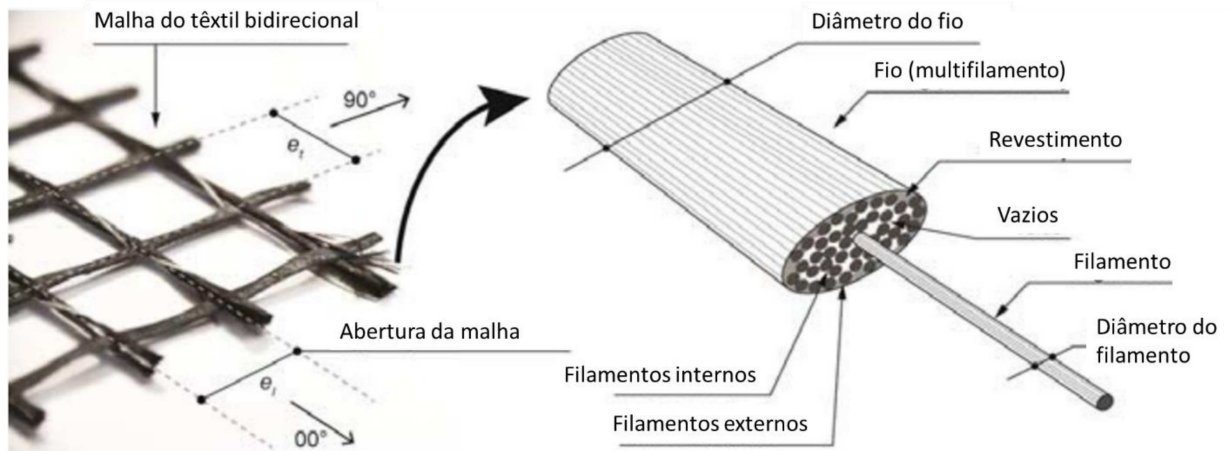
Fonte: Hegger et al. (2006b, p. 766)

Como percebe-se através da Figura 3, em termos de posicionamento do reforço, o TRC, para Peled, Bentur e Mobasher (2017), conduz a uma elevada eficácia em comparação com a utilização de fibras curtas distribuídas aleatoriamente na matriz. Pois, segundo Brameshuber et al. (2006), compósitos cimentícios reforçados com fibras dispersas aleatoriamente não exploram completamente o potencial do reforço, tornando necessária a incorporação de grandes proporções volumétricas, de modo a abranger as regiões solicitadas. Para Hegger et al. (2006a), a capacidade de carga aumenta com a incorporação de fibras longas em comparação com o concreto reforçado com fibras curtas.

## 2.1 REFORÇO TÊXTIL

Os têxteis consistem em fios compostos por fibras longas, chamados de filamentos. Os têxteis são produzidos a partir de fios em forma de monofilamento ou multifilamento, o último é composto por centenas ou milhares de filamentos agrupados em feixes (fio) de multifilamentos dispostos em duas direções para criar uma malha ou tecido (Figura 4). Para Gries, Offermann e Peled (2006), Reinhardt et al. (2006) e Peled (2016), a maioria das fibras de alto desempenho estão na forma de fios de multifilamentos. Os filamentos possuem diâmetros mínimos de 14  $\mu\text{m}$  para vidro AR e 7  $\mu\text{m}$  para carbono (REMPEL; HEGGER, 2015).

Figura 4 – Reforço têxtil: malha têxtil (esquerda); estrutura do fio de multifilamentos (direita)



Fonte: Valeri, Ruiz e Muttoni (2018, p. 2)

Para garantir que os compósitos cimentícios mantenham seus efeitos de reforço durante todo o seu tempo de vida, o material da fibra deve suportar a agressão do meio alcalino desenvolvido pela matriz de cimento Portland, sem perder suas propriedades mecânicas (GRIES et al., 2006; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

A utilização de fibras de vidro resistentes aos álcalis (AR), as fibras de carbono e aramida para a concepção de têxteis satisfazem os requisitos de módulo de elasticidade e resistência à tração para incorporação como elemento de reforço do concreto têxtil (GRIES et al., 2006).

Para Peled (2018), tanto as fibras de vidro AR como as de carbono são comumente utilizadas para o TRC, pois possuem módulo de elasticidade maior que a matriz, o que proporciona um comportamento satisfatório frente às tensões de tração.

A resistência alcalina do vidro AR é alcançada com, pelo menos, a adição de 15% de zircônio na mistura (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017). Devido à boa adesão dos filamentos de vidro AR com as matrizes cimentícias de cimento Portland, o material possui importante empregado nas aplicações do concreto têxtil (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

Considera-se que o uso de fibras com alto módulo e alta resistência geralmente aumenta a resistência e a tenacidade dos compósitos de cimento, melhorando o comportamento no estado plástico, enquanto que, fibras de baixo módulo geralmente aumentam a ductilidade dos compósitos de cimento, mas não sua resistência (TRIANAFILLOU, 2016).

Algumas propriedades mecânicas dos principais fios produzidos por filamentos comumente empregados como fibras longas para reforço em matriz cimentícia, são apresentadas na Tabela 1, como comparativo à fibra de aço.

Tabela 1 – Principais propriedades mecânicas de alguns tipos de fibras

Tipo da fibra	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento máximo (%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
Carbono	3.500 – 6.000	230 - 600	1,5-2,0	1,60 -1,95
Basalto	3.000 – 4.840	79,3 – 93,1	3,1	2,8 – 2,9
Aramida	3.000	60 - 130	2,1-4,0	1,4
Vidro–AR	2.500	70	3,6	2,78
Polietileno (PE)	250	1,4 -2,2	10-15	0,95
Polipropileno (PP)	140 - 690	3 - 5	25	0,90 – 0,95
Aço	600	210	1,0	7,85

Fonte: adaptado de Peled; Bentur; Mobasher (2017, p. 21)

Analisando comparativamente os materiais apresentados na Tabela 1, observa-se elevada diferença nos valores de resistência à tração e ao módulo de elasticidade entre a fibra de vidro AR e a de carbono. A fibra de carbono apresenta elevado comportamento de resistência à tração e módulo de elasticidade quando comparado às propriedades de vidro AR.

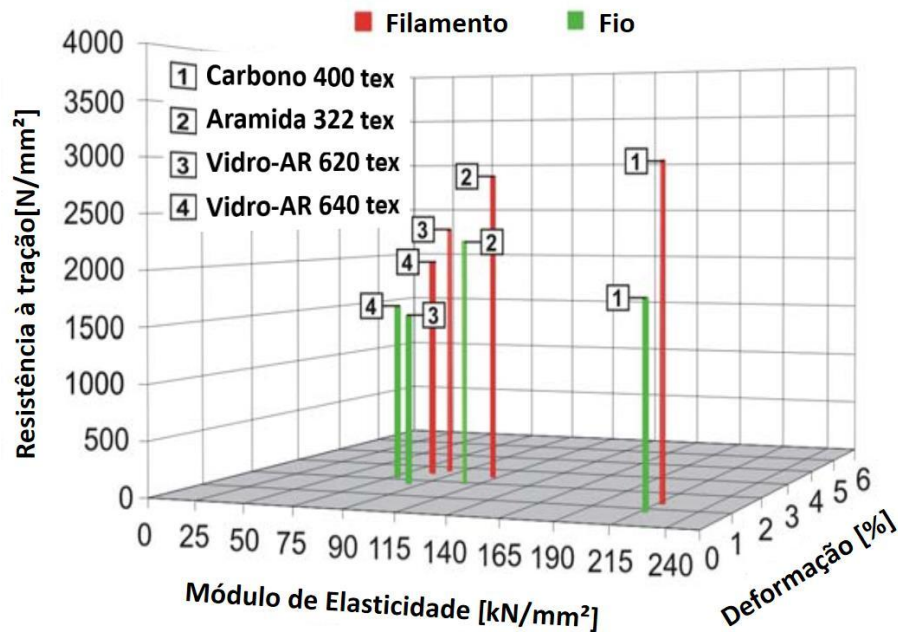
Um dos parâmetros que influencia no comportamento mecânico do têxtil é a densidade do material, que também pode ser relacionada com a finura do fio, representada pela unidade “tex”, o qual constitui a massa de uma grama em 1000 m de comprimento (g/km). Quanto menor o tex, mais fino é o fio (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

As relações de desempenho dos filamentos são influenciadas pela localização do filamento único no fio e a interações entre eles (GRIES; OFFERMANN; PELED, 2006). Como ilustra a Figura 5, o filamento isolado apresenta maior resistência à tração, que quando compreendido em um fio de multifilamento. As razões para isso são o dano ao fio durante o processo de produção e o carregamento não uniforme dos filamentos no interior do fio (HEGGER; ZELL; VOSS, 2008).



A Figura 5 reporta de modo comparativo os parâmetros mecânicos do fio e do filamento mais importantes destes materiais do fio, variando a finura (tex) dos materiais analisados.

Figura 5 – Propriedades mecânicas de fios e filamentos



Fonte: Gries, Offermann e Peled (2006, p.12)

Como percebe-se através da Figura 5, o filamento apresenta maior resistência à tração e maior deformação, quando comparado com o fio de multifilamentos, no entanto, conseqüentemente, não há alterações no módulo de elasticidade, independentemente do material.

O entendimento da interação entre o filamento e o fio influenciarão no comportamento mecânico do TRC, bem como a relação do fio com a matriz, que também merece atenção, visto que a interação do compósito ocorre entre duas interfaces, matriz-fio e fio com filamento (VALERI; FERNÁNDEZ RUIZ; MUTTONI, 2020).

Em geral, a fibra de carbono apresenta melhor desempenho quando comparada ao vidro AR e a aramida. Isso se deve à maior rigidez, que é cerca de três vezes maior que a do vidro AR. Porém, a fibra de vidro AR é atraente devido ao seu custo inferior (PELED, 2018).

Além das propriedades já listadas, como a finura, tex, e o comportamento em conjunto do fio, o modo de produção também pode influenciar no desempenho

mecânico (HANISCH, 2006). Fios produzidos com filamentos torcidos reduzem sua densidade e prejudicam a capacidade de suporte de carga (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017). Existem diferentes tipos de fios estruturais e produzidos em forma de malhas estruturais para uso como reforço em concreto em diferentes formatos.

### 2.1.1 Geometria dos tecidos

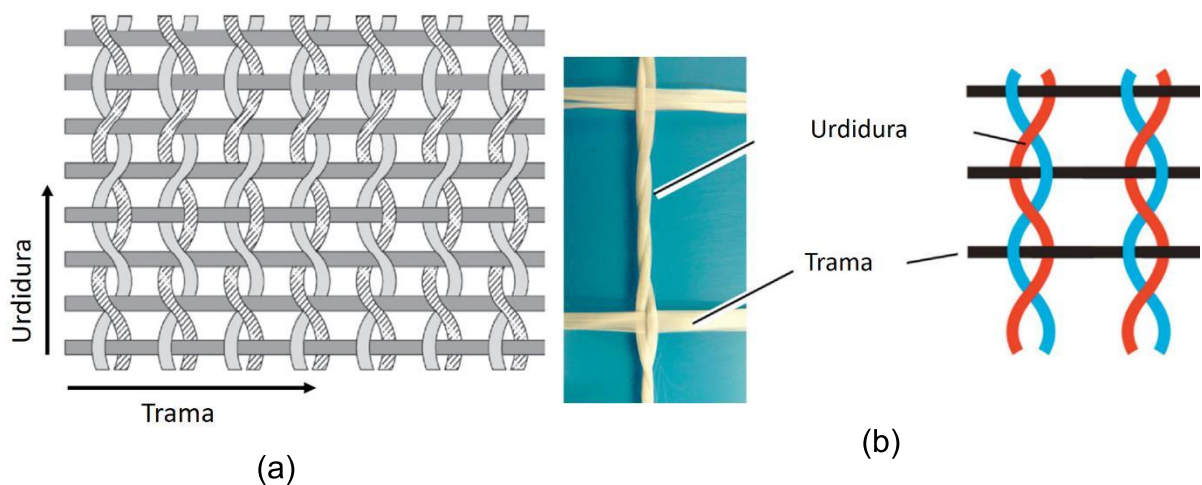
Os principais modos de fabricação e formas dos têxteis são os bidimensionais e os tridimensionais.

#### a) Bidimensional

São fabricados com dois conjuntos de fios entrelaçados perpendicularmente ( $0^\circ / 90^\circ$ ) entre si, os fios ao longo do comprimento são denominados fios de urdidura (fios a  $0^\circ$ ), e aqueles ao longo da sua largura são denominados fios de trama (fios a  $90^\circ$ ) (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

Uma das tipologias empregadas como reforço, é o do tipo leno, ou giro inglês, nos quais os fios da urdidura são torcidos em torno dos fios da trama, que são posicionados sem qualquer entrelaçamento, resultado em maior estabilidade dimensional, ideal para usos como reforço de compósitos cimentícios. A Figura 6 ilustra este tipo de geometria (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

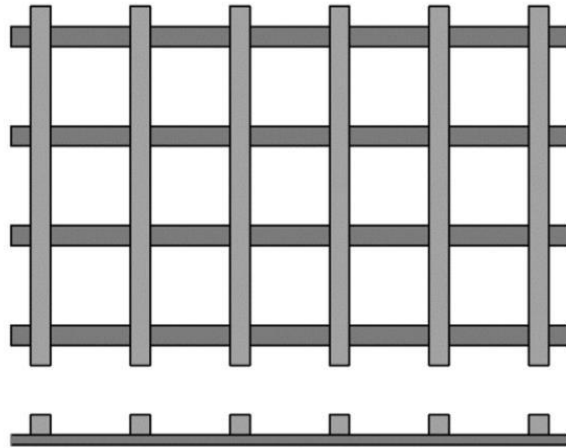
Figura 6 – Tecido em estrutura do tipo leno (giro inglês)



Fonte: a) Peled, Bentur e Mobasher (2017, p. 42); b) Triantafillou (2016, p. 10)

Outra tipologia relacionada aos tecidos bidimensionais, são os colados. Estes têxteis são produzidos com a conexão perpendicular da trama à urdidura, conforme mostra a Figura 7. Segundo Peled, Mobasher e Bentur (2017), a variação é indicada, também, para usos como reforço em compósitos cimentícios.

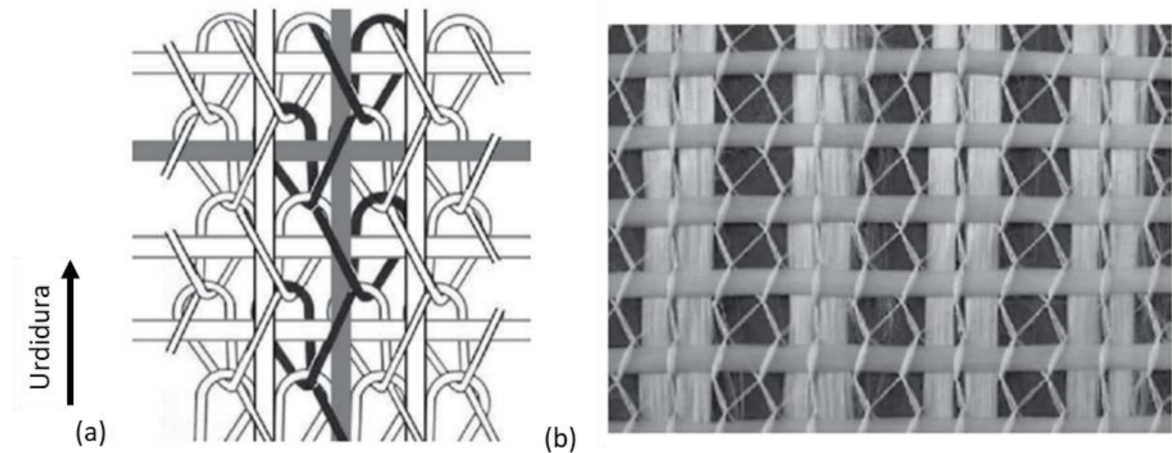
Figura 7 – Tecido em estrutura colada



Fonte: Peled, Mobasher e Bentur (2017, p. 44)

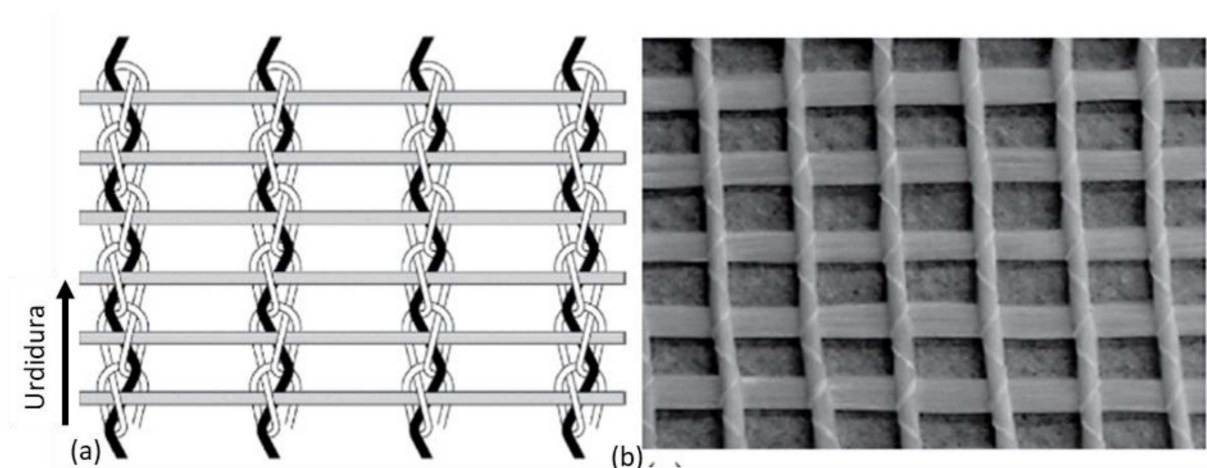
Há também as tipologias de têxtil onde os fios da urdidura são tricotados e do tipo pilar, pelos fios da trama, como ilustra, respectivamente a Figura 8 e Figura 9. O conjunto de fios dispostos na largura do têxtil, denominado trama, são retos e conectados em laços com a urdidura, sem qualquer ondulação. A orientação da urdidura torna-se aplicável para uso com fibras rígidas e quebradiças, como são o vidro AR e o carbono. Ao invés de dobrar os fios quebradiços, o processo de tricô garante aos fios da urdidura sua inserção como filamentos retos, limitando danos e quebras nos filamento (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

Figura 8 – Tecido do tipo tricô: (a) esquema ilustrativo; (b) imagem



Fonte: adaptado de Peled, Mobasher e Bentur (2017, p. 56)

Figura 9 – Tecido do tipo pilar: (a) esquema ilustrativo; (b) imagem



Fonte: adaptado de Peled, Mobasher e Bentur (2017, p. 56)

Para Haik, Sasi e Peled (2017), a direção do têxtil, bem como o modo de produção, quando inserido no interior da matriz cimentícia, pode influenciar no comportamento mecânico do compósito, alterando a resistência à tração. Como por exemplo o têxtil do tipo pilar, produzidos em forma de tricô com fios de poliéster. Os autores observaram que, em situação não inserida no interior da matriz, na direção da urdidura, manifestaram melhor desempenho à tração em relação à direção da trama. A razão para esta diferença pode ser explicada ao fato de a urdidura estar enlaçada nos fios da trama, resultando em um maior atrito entre os filamentos, enquanto os filamentos no fio de trama estão livres, portanto, são solicitados separadamente, resultando em menor resistência do tecido nesta direção.

Em contrapartida, Zani et al. (2019) demonstraram que, na direção da trama, em têxtil do tipo leno, com finura igual em ambas as direções, a trama pode apresentar maior tensão de tração em relação à direção da urdidura.

Quando tecidos tricotados são inseridos na matriz cimentícia, Haik, Sasi e Peled (2017) observaram que, quando o TRC é solicitado ao esforço de flexão, o compósito com a direção da trama está posicionado paralelo à direção do esforço, sua resistência à flexão é 30% maior que do compósito reforçado com o tecido na direção da urdidura. Para os autores, este comportamento está relacionado com a ligação entre a matriz e o têxtil. Nos materiais analisados, o diâmetro dos fios da trama e da urdidura são diferentes, assim como a seção transversal, respectivamente, elíptico com diâmetro de 1,89 mm e esférico com diâmetro de 1,23 mm, isto é, existe uma maior área de contato do fio de trama do que a urdidura, consecutivamente maior a ligação do fio com a matriz.

Quando em compósitos reforçados com têxtil do tipo leno, com a direção da urdidura disposta no sentido da solicitação, a trama exerce funções importantes em termos de eficiência de ligação. A trama pode minimizar o escorregamento dos fios da urdidura, por outro lado, pode representar um defeito na seção transversal, que favorece o surgimento de fraturas no reforço, no encontro com a trama (COLOMBO, 2015).

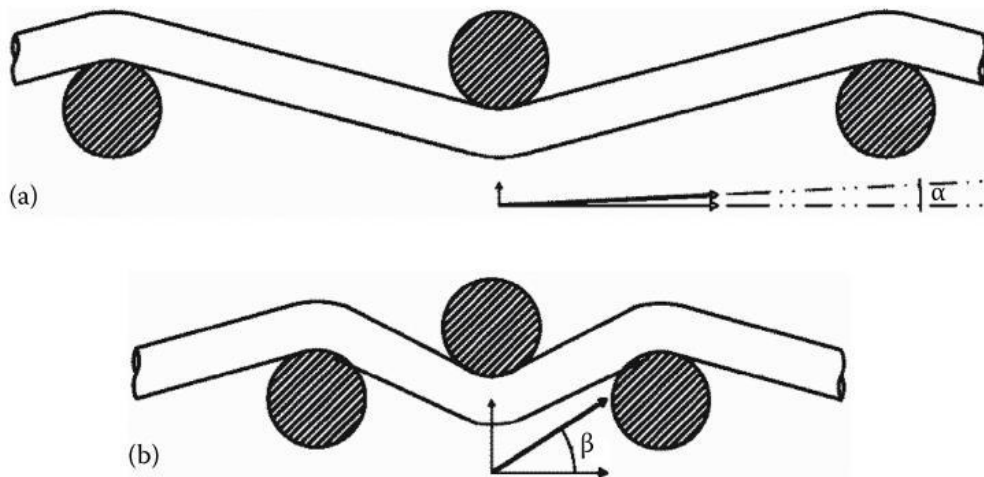
Hegger et al. (2006) contribuem que o reforço na direção da trama, os fios estão planos e com livre movimentação, o que pode resultar em melhor eficiência de ligação do reforço com a matriz.

Colombo (2015) acrescenta que em reforços com espaçamentos entre tramas maiores, o desempenho à tração, quando solicitado no sentido da urdidura, é melhorado, uma vez que o esforço no encontro entre tramas é menor.

Em estudo realizado por Zani et al. (2019), foi analisada a influência da direção do tecido do tipo leno revestido com resina polimérica a base de estireno butadieno. Os autores verificaram que a resistência à tração do compósito é influenciada pela direção do reforço. Identificaram ainda o escorregamento do reforço mais pronunciado na direção da trama, resultando em maior perda da rigidez após o período de fissuração. Os autores contribuem que a direção da trama pode não representar a resposta estrutural plena do reforço, sendo assim, a resistência mecânica à flexão é favorecida quando o têxtil é posicionado no sentido da urdidura.

Em relação aos têxtil com fios que possuem mudança de ângulo, como o caso do têxtil do tipo leno para os fios de urdidura, Peled, Bentur e Mobasher (2017) destacam que quando este fio é solicitado à tração, pode haver menor eficiência frente ao fio reto, sem alteração do ângulo. Este comportamento é de maior destaque, nos fios com maior ângulo, quando os fios da trama estão mais próximo, como ilustra a Figura 10. Além do que, durante a produção do têxtil, na situação de enrolamento e dobra dos fios, a forma ondulada pode causar a quebra dos filamentos, reduzindo as propriedades mecânicas.

Figura 10 – Influência da geometria do fio no desenvolvimento da tensão: (a) pequeno ângulo e (b) grande ângulo para com a direção do carregamento



Fonte: Peled, Bentur e Mobasher (2017, p. 47)

Nesta tipologia de têxtil, o fio da urdidura pode possuir baixa eficiência e quebra da fibra, o que geralmente leva a uma redução geral nas propriedades mecânicas do compósito em comparação com um compósito semelhante com fios retos na direção da tensão principal (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017)

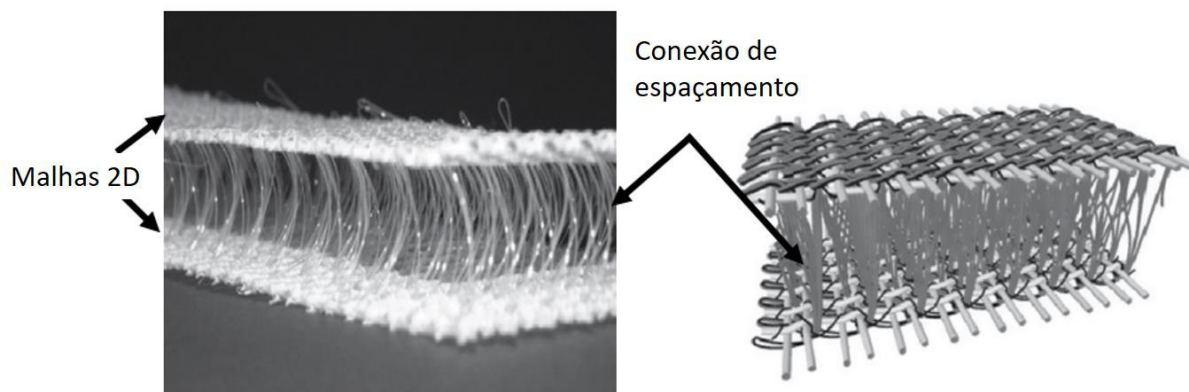
#### b) Tridimensionais

A moderna tecnologia de produção do têxtil permite uma ampla variedade de estruturas, entre elas a produção dos tridimensionais, fornecendo reforço em três direções ortogonais (X, Y, Z), havendo fios nos planos e ao longo de toda a espessura, como observa-se na Figura 11 (HAIK; SASI; PELED, 2017).

Nesta tipologia de têxtil, a estrutura é criada por dois conjuntos de têxtil de malha 2D independentes, juntamente com um terceiro conjunto de fios ao longo da

espessura (direção z). Desta forma, por possuir boas conexões entre os fios nas três direções, as possíveis fissuras no interior do compósito são impedidas (GRIES et al., 2006; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

Figura 11 – Tecido volumoso tridimensional



Fonte: Peled, Mobasher e Bentur (2017, p. 51)

Para Haik, Sasi e Peled (2017), este tipo de têxtil permite limitar a falha por cisalhamento do compósito e ainda aumentar a resistência ao cisalhamento, acarretando em melhores propriedades mecânicas do compósito cimentício. Estes têxteis possuem estrutura relativamente aberta, com espaços suficientes para o ingresso da matriz, com espessura entre 15 e 100 mm (GRIES et al., 2006).

Peled, Mobasher e Bentur (2017) expõem que, para explorar o potencial do reforço do concreto têxtil, tanto os tecidos bidimensionais como os tridimensionais, devem estar posicionados no interior da matriz isentos de qualquer torção, de tal forma que possibilitem a penetração das partículas de cimento entre os fios, e que garantem que estejam retos e em paralelo com a direção das tensões principais.

Para Köckritz et al. (2006), a configuração do reforço no interior da matriz é influenciada pela manipulação das etapas de produção do compósito, os quais necessitam de uma estrutura estável. Peled, Mobasher e Bentur (2017) acrescentam que, além do controle da exatidão da localização do reforço na matriz, a orientação e a geometria dos fios do reforço, bem como a forma e a abertura da malha, devem permitir a passagem da matriz por entre os fios.

Outro fator que demanda cuidado para um preenchimento satisfatório da matriz entre o têxtil é o espaçamento da malha que, segundo Hegger, Kulas e Horstmann (2012), deve ser de 2 a 3 vezes o tamanho máximo do grão da matriz, a fim de permitir o fluxo completo do concreto, sem que ocorra o feito “peneira” nos grãos.

Com o intuito de elucidar as influências da geometria e finura dos tecidos isolados, quando solicitados às ações de tração direta, a Tabela 2 apresenta geometrias de têxteis, assim como resistências encontradas na bibliografia e apresentadas por diversos autores.

Tabela 2 – Geometria e resistência dos tecidos produzidos com fibras de vidro AR utilizadas em estudos

Autores	Modo de fabricação	impregnação	Tensão de tração do têxtil (MPa)	Tamanho da malha (mm)	Tex
You et al. (2020)	Leno	-	1451 (urdidura) 1241 (trama)	8 x 8	640
Zani et al. (2019).	Leno	SBR	879,6 (urdidura) 1419,69 (trama)	5 x 12,5	2400
Rampini et al. (2019)	Leno	SBR	1596,87 (urdidura) 1496,37 (trama)	18 x 18	2400
Rampini et al. (2019)	Leno	SBR	1274,62 (urdidura) 1617,34 (trama)	5 x 12	2400
Vervloet et al. (2018)	Pilar	Epóxi	1700	16,9 x 18,1	2400
Haik; Adiel Sasi; Peled (2017)	Pilar	-	834 MPa	8 x 8	1200

O comportamento mecânico do TRC, assim como a vinculação do reforço têxtil com a matriz, é o principal tópico de estudo, segundo Colombo et al. (2013). Há ainda de ser considerada a influência decorrente das condições de cura da matriz e pela existência de tratamentos na superfície da fibra.

### 2.1.2 Tratamento superficial do tecido

O tratamento da superfície nas fibras é promovido por impregnação de soluções poliméricas capazes de desenvolver a união dos filamentos por meio de adesivo, produzindo uma seção transversal homogênea (HEGGER; VOSS, 2008). Para Triantafillou (2016), este tratamento resulta em uma melhor ativação dos filamentos internos em comparação aos fios sem tratamento, assim, há uma tendência de maior resistência e redução do comprimento de ancoragem do compósito



cimentício, tendo em vista o tratamento promove aumento da eficiência de aderência com a matriz (RAUPACH et al., 2006).

Além do auxílio no comportamento mecânico, têxteis com tratamento superficial simplificam o manuseio na instalação e impedem indesejadas movimentações do tecido no instante da concretagem (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017). Porém, reduz a flexibilidade necessária para as geometrias curvas (TRANTAFILLOU, 2016).

Cohen e Peled (2010) comentam que o tratamento superficial do têxtil favorece na moderação da penetração dos produtos de hidratação do cimento entre os filamentos do feixe, mantendo o modo de arrancamento telescópico e a ductilidade do compósito, ao mesmo tempo em que protege os filamentos do núcleo contra os ataques químicos, resultando na manutenção da durabilidade e da resistência à tração do compósito.

Kulas (2015) apresenta diferentes produtos de impregnação dos têxteis e características que cada tipo de tratamento desenvolve. A Tabela 3 apresenta os diferentes materiais de impregnação e suas respectivas influências nas propriedades no concreto têxtil.

Tabela 3 – Características das diferentes tipologias de impregnação

	Impregnação por Resina Epóxi	Impregnação por Estireno Butadieno	Sem impregnação
Eficiência	Alta	Média	Média / Baixa
Comprimento de ancoragem	Curto	Médio	Médio / Longo
Estabilidade de forma	Alto (aplicável para elementos de reforço pré-formados)	Médio (aplicável para elementos de reforço pré-formados)	Baixo (não aplicável para elementos de reforço pré-formados)
Possibilidades geométricas	Direto e plano (Vigas e lajes)		Curvo e espacial

Fonte: (KULAS, 2015; TRIANTAFILLOU, 2016)

Conforme o estudo dos autores, tem-se que a impregnação por resina epóxi apresenta-se como mais vantajosa do ponto de vista de eficiência de aderência, minimizando a necessidade de altos comprimentos de ancoragem (KULAS, 2015).

Em estudo realizado por Rempel, Kulas e Hegger (2015), em vigas de concreto têxtil, resultados positivos foram observados nos elementos reforçados com têxteis empregados com epóxi e com estireno butadieno, quando comparados às peças

reforçados com têxteis sem tratamento superficial. Nos elementos com impregnação, a resistência à flexão foi superior em relação aos sem impregnação.

Além da importância do tratamento superficial do reforço têxtil no comportamento mecânico do TRC, a proporção dos materiais constituintes da matriz também influencia na resistência e na durabilidade do compósito. Para reforços de vidro AR sem tratamento superficial, estima-se perdas de resistência de até 40% ao longo de um período de 50 anos em elementos exteriores, cujas matrizes cimentícias possibilitam a penetração de umidade e as altas temperaturas influenciem a aderência do reforço no interior da matriz (HEGGER; VOSS, 2008).

No âmbito ambiental, Neves e Felicíssimo (2020) discorre que reforços têxteis sem resina apresentam potencial ambiental favorável, no quesito de serem menos prejudiciais ao meio ambiente, sendo mais fácil de sofrerem processo de reciclagem.

## 2.2 MATRIZ

As matrizes cimentícias utilizadas no TRC, para Peled (2018), devem atender aos requisitos de cada aplicação, incluindo a composição da matriz, para promover uma união satisfatória com o reforço, que resulte em um adequado comportamento mecânico.

Vogel, Holcapek e Konvalinka (2014) comentam que a composição dos materiais é de caráter inovador, pois a sua combinação se assemelha com os empregados nos concretos de alto desempenho. Enquanto que Peled; Mobasher e Bentur (2017) comentam que, embora as matrizes possuem alta desempenho, a combinação dos materiais não requer formulação muito rigorosa ou uso de materiais diferentes dos utilizados nos concretos convencionais.

Conforme Brameshuber et al. (2006), as proporções dos materiais constituintes nestas matrizes devem possuir requisitos no estado fresco, como a trabalhabilidade compatível à geometria da peça; e no estado endurecido, como a resistência mecânica adequada e durabilidade satisfatória para a aplicação, além dos aspectos econômicos para a produção industrial.

O aspecto no estado fresco, a mistura deve apresentar elevada fluidez, a fim de que a matriz envolva totalmente o têxtil e não desenvolva vazios, o que pode prejudicar o comportamento mecânico do compósito (SHAMS et al., 2015; WANG et al., 2016). Para que não haja vazios de concretagem, a composição granulométrica

dos materiais não pode superar a dimensão máxima de 0,6 mm. (BRAMESHUBER et al., 2006; COLOMBO et al., 2013; KONG et al., 2017 e HALVAEI; LATIFI; JAMSHIDI, 2018).

Para que as propriedades do estado endurecido sejam alcançadas, os materiais constituintes devem possuir dimensões adequadas para cada geometria do reforço têxtil (SHAMS et al., 2015). Os principais materiais que constituem a matriz, capazes de proporcionar as propriedades esperadas, segundo Vogel (2014), são o cimento, pozolanas como a sílica ativa e cinza volante, agregados miúdos naturais, aditivos e água. Agregados naturais são geralmente de origem quartzosa, como a areia (HALVAEI; LATIFI; JAMSHIDI, 2018).

Rempel e Hegger (2015), a fim de diminuir o consumo de cimento para a produção de elementos de fachada com espessura de 20 mm, utilizaram agregados com o diâmetro máximo de 8 mm, o resultado alcançado foi satisfatório às propriedades pretendidas para a aplicação. Entretanto, o diâmetro máximo do agregado dependerá da abertura da malha do tecido utilizado.

Com o intuito de resumir as diversas proporções utilizadas na bibliografia, o Quadro 2 apresenta os principais traços empregados na matriz de TRC que alcançaram as propriedades reológicas desejadas pelos autores.

Quadro 2 – Composição dos principais materiais constituintes na matriz

Referência	Barhum e Mectcherine (2013)	Vogel Holcapek e Konvalinka (2014)	Scholzen, Chudoba e Hegger (2015a)	Williams Portal; Nyholm Thrane e Lundgren (2017)	Park et al. (2017)	Hawkins et al. (2018)	Kamani et al. (2019)	Valeri, Fernández Ruiz e Muttoni (2020)
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	554	680	490	406	490	349	650	860
Cinza Volante (kg/m <sup>3</sup> )	233	-	175	121	175	150	-	-
Sílica Ativa (kg/m <sup>3</sup> )	89	455	35	22	35	-	65	-
Agregado miúdo (kg/m <sup>3</sup> )	832	924	1249	1400	1213	1494	1214	1290
Dimensão máxima do agregado (mm)	1,0	1,2	0,8	4,0		2		1,6
Plastificante (%)	2	6,8	-	7,6	3,43	3	2,46	-
Água	330	238	280	171	315	199	255	125
Relação a/c	0,40	0,35	0,57	0,42	0,64	0,57	0,39	0,25
Resistência à compressão MPa	36,1	102,2	89,0	47,5	40	47,2	65,3	107,8

Percebe-se que, de uma maneira geral, os estudos utilizam adições pozolânicas, que, além de reduzirem o consumo de cimento, alcançam valores reduzidos da alcalinidade da solução dos poros do concreto. Salienta-se, ainda, os valores reduzidos da relação água/cimento empregados pelos autores, resultando na elevação da resistência à compressão da matriz. Logo, estas características de mistura logram compacidade elevada na matriz, consecutivamente, produtos produzidos com estas características conquistam elevada durabilidade (BRAMESHUBER et al., 2006).

Peled (2018) analisou os efeitos de diferentes matrizes com diversas substituições parciais do cimento em massa, com 25% de cinza volante e 7% de sílica ativa. O autor observou que a matriz com substituição parcial do cimento por sílica ativa alcançou o melhor comportamento mecânico à flexão em comparação à mistura

sem substituição parcial do cimento. Em seu estudo, Peled (2018) utilizou as proporções utilizadas por Scholzen, Chudoba e Hegger (2015a).

No estado endurecido, Hegger, Zell e Voss (2008) recomendam que a matriz cimentícia deve possuir resistência à compressão elevada, próxima a 80 MPa, e resistência à tração de, aproximadamente, 4 MPa.

Normalmente, as propriedades mecânicas de compressão, tração e módulo de elasticidades são determinadas para caracterizar as matrizes usadas em TRC, e estas propriedades são consideradas no dimensionamento da aplicação planejada (BRAMESHUBER et al., 2006).

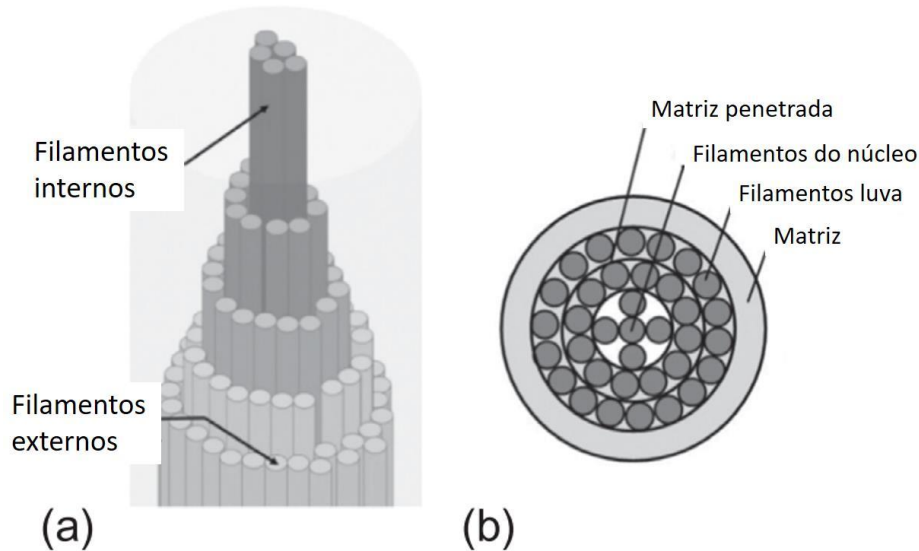
### 2.3 PROPRIEDADES DE ADERÊNCIA MATRIZ-FIBRA

As propriedades do material compósito de concreto reforçado com têxtil são influenciadas pelas propriedades do fio, assim como o material do fio e sua geometria, além da composição da matriz (GRIES et al., 2006; PELED, 2016). Segundo Hegger e Voss (2008), o comportamento mecânico do TRC também é influenciada pela posição do têxtil no interior da matriz da seção transversal (HEGGER; VOSS, 2008). Purnell et al. (2006) e Peled (2016) acrescentam que a qualidade da aderência das fibras com a matriz também promove aumento na capacidade resistente frente às solicitações mecânicas.

A qualidade de aderência do têxtil junto à matriz, desempenha um papel importante nas propriedades mecânicas do compósito, visto que, a transmissão dos esforços ocorre na matriz cimentícia para o reforço, pela ligação matriz e têxtil, que por sua vez, transmite aos filamentos internos por atrito (GRIES et al., 2006). Hegger et al. (2006a) explicam que os filamentos da superfície, em contato direto com a matriz, possuem maior desempenho de ligação do que os filamentos do núcleo, os quais são estressados indiretamente.

Este mecanismo de deterioração é denominado arrancamento por telescópio, no qual os filamentos externos formam uma luva, e os filamentos são firmemente ligados à matriz e falham, enquanto os filamentos do núcleo interno, que não são bem ligados, podem deslizar-se e fornecer resistência secundária ao compósito, como mostrado o mecanismo de falha do fio na Figura 12 (PELED; MOBASHER; BENTUR, 2017).

Figura 12 – Comportamento de arrancamento telescópico de um feixe inserido no interior de uma matriz de cimento: (a) após o processo de arrancamento, esquema tridimensional e (b) esquema bidimensional.



Fonte: Peled (2016, p 82)

Os filamentos começam a se romper na circunferência e, depois disso, camada por camada, da periferia em direção ao centro do fio. O modo telescópico de arrancamento expõem os filamentos externos, rompendo primeiro, imediatamente após a carga máxima, permanecendo uma ligação residual pelos filamentos do núcleo, seguida pelo deslizamento desses (PELED, 2016).

A fim de que as ligações de aderência com os filamentos externos sejam eficientes e as transmissões de tensões sejam adequadas, Schütze, Lorenz e Curbach (2015) comentam que o reforço têxtil necessita de uma camada de cobertura com espessura de 1,5 a 3,0 mm.

Para TRC produzidos com têxteis de vidro AR, Butler, Mechtcherine e Hempel (2010) concluíram, que a extensão das perdas de desempenho são observadas com o aumento da evolução das reações de hidratação do cimento, e dependem principalmente, da alcalinidade da matriz, a qual influencia na formação de fases sólidas na interface da fibra com a matriz.

Quando há eficiência de aderência entre o reforço e a matriz, a principal propriedade mecânica do compósito é a garantia da resististência à tração, a qual, quando solicitada, manifesta formas de ruptura características (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

## 2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO TRC

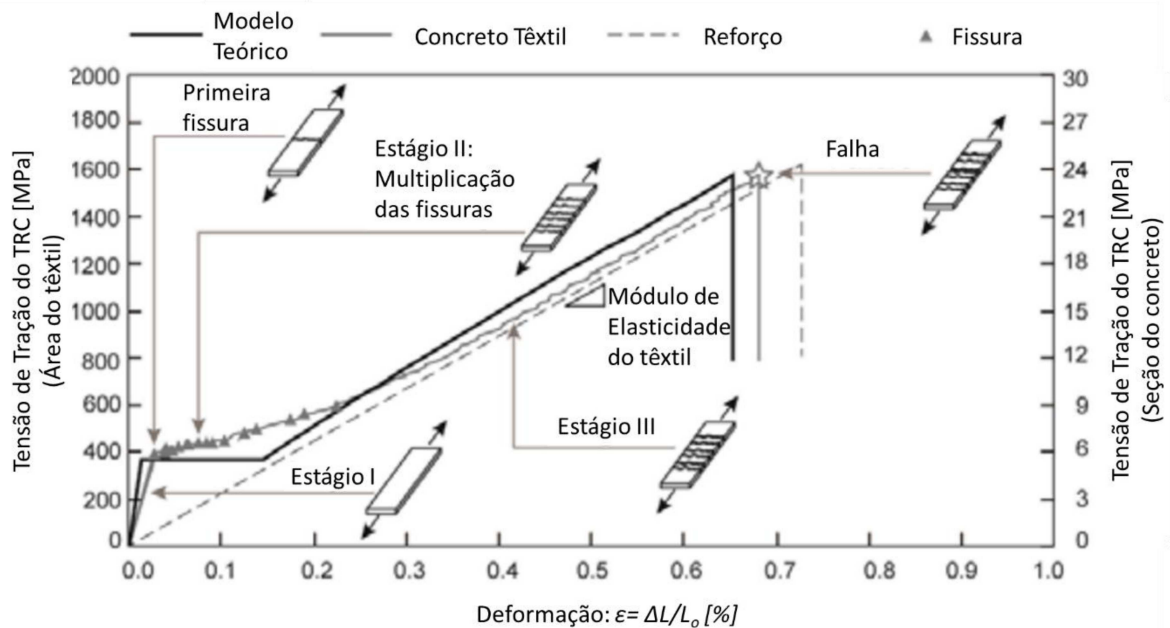
Em geral, para que as propriedades mecânicas do TRC sejam alcançadas de modo satisfatório, necessita-se de uma ligação, matriz-reforço, de boa qualidade, a qual acarreta em uma ruptura do compósito em alta resistência, com baixa ductilidade e ruptura do reforço relativamente frágil, enquanto que na ligação de qualidade inferior, acarreta no escorregamento das fibras, o que proporciona um compósito de maior ductilidade com menor resistência (PELED, 2016).

A fim de desenvolver aplicações estruturais para o compósito cimentício reforçado com fibra têxtil, são necessários parâmetros oriundos das propriedades à tração e flexão (MOBASHER, 2016). O autor complementa que o entendimento dos mecanismos de resposta à tensão de tração e de formação de fissura são importantes informações para aspectos de projeto.

### 2.4.1 Resistência à tração

Quando o compósito é solicitado ao esforço de tração direta, RILEM (2016), Peled; Bentur e Mobasher (2017), Valeri; Ruiz e Muttoni (2018), Rampini et al. (2019) e Silva e Silva (2020) expõem que o compósito cimentício reforçado com fibras têxteis, apresenta comportamento dúctil que pode ser dividido em três estágios distintos, como ilustrado no diagrama tensão x deformação sobre carregamento uniaxial na Figura 13.

Figura 13 – Representação esquemática do comportamento do TRC à tração



Fonte: Valeri, Ruiz e Muttoni (2018, p. 4)

O estágio I caracteriza o elemento não fissurado, o qual corresponde ao módulo de elasticidade da matriz cimentícia, intervalo que representa o regime elástico linear que a matriz e o têxtil atribuem ao composto. Este estágio é finalizado com o surgimento da primeira fissura, assim a tensão crítica de fissuração,  $\sigma_{cr}$ , é alcançada. Neste estágio apenas a matriz está sendo solicitada, ao passo da primeira fissura, o têxtil tornam-se efetivamente solicitadas (PELED, 2016).

Peled (2016) acrescenta que durante o estágio 1 há solicitação fundamental da matriz cimentícia na garantia da resistência à tração direta do compósito, visto que o diagrama da tensão x deformação da matriz não reforçada se assemelham ao comportamento do compósito no estágio 1, ao passo que no surgimento da primeira fissura o regime elástico regido pela matriz é superado.

O estágio 2 inicia com a formação da primeira fissura com propagação em toda a largura do corpo de prova, a qual ocorre de modo paralelo ao menor lado do elemento. O comportamento do diagrama expõe crescimento do deslocamento com pouca variação da carga (MOBASHER; PAHILAJANI; PELED, 2006; YAO et al., 2015).

Ao ingressar no estágio 2, a rigidez do composto diminui gradativamente, devido a formação de fissuras espaçadas regularmente. Conforme Hegger et al. (2006a), o espaçamento das fissuras é determinado pelo reforço e suas



características de ligação ao concreto. Mesmo com a formação das fissuras ao longo do corpo de prova, o deslocamento do composto fissurado permanece aumentando, com carga razoavelmente constante com quedas abruptas da carga (MOBASHER; PAHILAJANI; PELED, 2006; YAO et al., 2015).

A tensão de tração deve ser transferida através da fissura para o têxtil após a formação da primeira fissura da matriz. Em decorrência do desempenho da aderência entre o têxtil e a matriz, o reforço distribui a carga até que a tensão de fissura da matriz seja atingida em outra posição do corpo de prova, desenvolvendo com isto uma nova fissura. Este processo é repetido até que a distância entre fissuras seja pequena, do modo que a matriz não possa suportar a tensão de tração, com isto o estágio 3 é iniciado (DU et al., 2017).

No estágio 3 não há ocorrência de novas fissuras, apenas o reforço é solicitado, e este comportamento é atribuído à resistência e ao módulo de elasticidade do reforço têxtil. O diagrama tensão x deformação do conjunto acompanha, em paralelo, o diagrama tensão *versus* deformação do têxtil puro. A deformação dúctil ocorre neste estágio, pelo motivo do material de reforço não possuir comportamento plástico. Assim, a falha sucede quanto a tensão de ruptura do reforço é atingida, este ponto caracteriza a resistência máxima do compósito cimentício reforçado com têxtil (HEGGER et al., 2006b).

A principal característica a ser considerada no TRC é a geração de múltiplas fissuras espaçadas, pois a capacidade de distribuir as tensões ao longo do reforço acarretando em grandes deformações sem desenvolver maiores aberturas das fissuras (PELED; MOBASHER; BENTUR, 2017).

Segundo Hegger, Zell e Voss (2008), a resistência à tração do compósito é influenciada pelas propriedades de ligação do reforço com a matriz, esta propriedade é caracterizada pela eficiência de aderência, o que se alteram com o material do reforço.

A eficiência de aderência é demonstrada por Hegger e Voss (2008), com a redução na resistência do compósito quando comparado ao têxtil isolado em 75% para o têxtil de vidro AR e 81% para o têxtil de carbono. Em contrapartida, o têxtil de carbono apresenta em média resistência à tração 60% maior quando comparado ao vidro AR. No entanto, a eficiência do carbono é de apenas 19%, sendo que a eficiência do têxtil de fibra de vidro AR é maior (HEGGER; VOSS, 2008). Para que estes

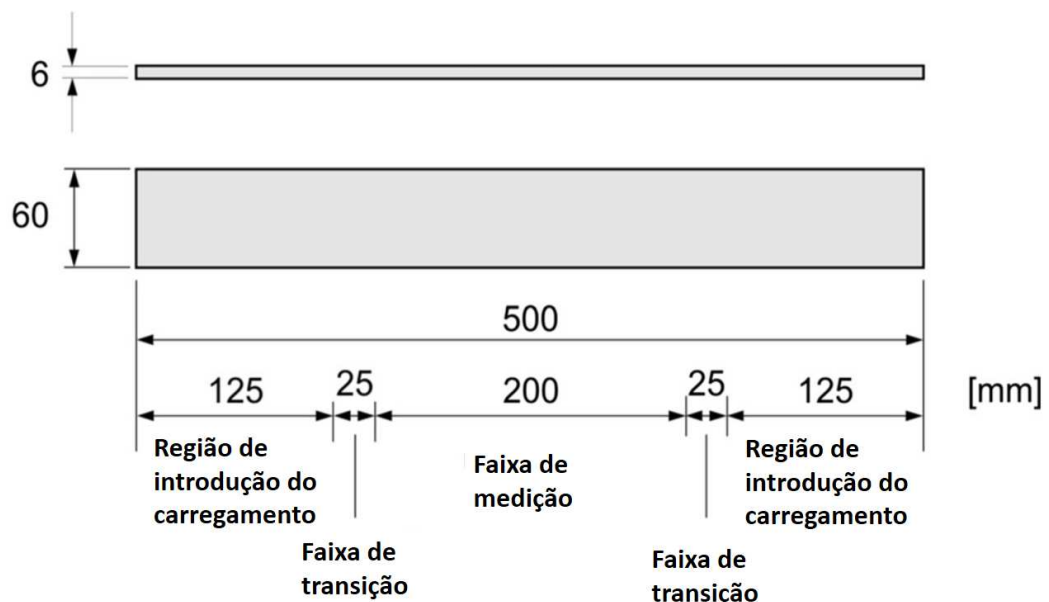
comportamentos sejam conhecidos, faz-se necessária a realização de ensaios que caracterizam as propriedades do TRC.

Ao se tratar dos materiais isolados, a propriedade da matriz deve ser analisada quanto sua resistência à compressão. As propriedades dos têxteis são analisadas de forma uniaxial por verificação da resistência à tração direta (MÜLLER; SCHEERER; CURBACH, 2016).

As características de resistência do TRC devem ser analisadas pelo estado limite de fissuração e o estado limite último (SCHOLZEN; CHUDOBA; HEGGER, 2015b). Propriedades que implicam em diretrizes para o projeto, obtidas com ensaio da resistência de tensão uniaxial pela resistência à tração direta, pois para Peled, Mobasher e Bentur (2017), esta análise aborda os efeitos do tipo, geometria, material e quantidade do têxtil, o traço e a espessura da matriz. Pois, como Schütze, Lorenz e Curbach (2015) destacam que a resistência à tração do TRC depende da seção transversal do reforço e da matriz.

O procedimento recomendado para este ensaio de resistência à tração é apresentado por RILEM (2016), em corpos de prova com as dimensões ilustradas na Figura 14.

Figura 14 – Corpo de prova para ensaio de resistência à tração



Fonte: RILEM (2016, p. 4)

A recomendação de RILEM (2016) trata que o comprimento mínimo da amostra deve ser de 500 mm e a largura não deve ser inferior a 60 mm. E que a amostra

possua relação comprimento / largura de pelo menos 5:1. A espessura pode ser influenciada pelo número de camadas têxteis, mas não deve ser inferior a 6 mm.

Por recomendação de Colombo et al. (2013), as amostras devem permanecer em sala úmida (UR > 98%) e temperatura controlada pelo período de cura de 28 dias. O procedimento de ensaio é iniciado com uma pré-carga de 100 N, e com uma taxa de carregamento de 1 mm/min, até a ruptura do corpo de prova (KONG et al., 2017).

Durante o desenvolvimento do ensaio a posição e localização das fissuras, além do espaçamento, bem como a carga em que ocorre a primeira fissura, devem ser registradas (RILEM, 2016).

Para determinação da tensão de tração do compósito ( $\sigma_{cu}$ ), a carga máxima ( $F_u$ ) pode ser relacionada com a seção transversal do concreto ( $A_c$ ), conforme destaca a Equação 1 (RILEM, 2016).

$$\sigma_{cu} = \frac{F_u}{A_c} \quad \text{Equação 1}$$

Ou ainda, quando necessária a informação para abastecer modelos de dimensionamento, a tensão de tração do reforço ( $\sigma_{tu}$ ) pode ser relacionada com a seção transversal do reforço ( $A_t$ ), através da Equação 2 (RILEM, 2016).

$$\sigma_{tu} = \frac{F_u}{A_t} \quad \text{Equação 2}$$

#### **2.4.2 Resistência à tração na flexão**

Conforme descreve Mobasher (2011a), o compósito cimentício reforçado com têxtil exibe características similares aos compósitos reforçados com fibras dispersas, quando ao comportamento à flexão. O autor complementa que as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com têxteis sob ações de tração, flexão e cisalhamento uniaxiais indicam desempenho superior, com resistência à tração e capacidade de deformação maiores em comparação com os materiais reforçados com fibras dispersas, além disso, a tenacidade é aumentada em até duas ordens de grandeza.

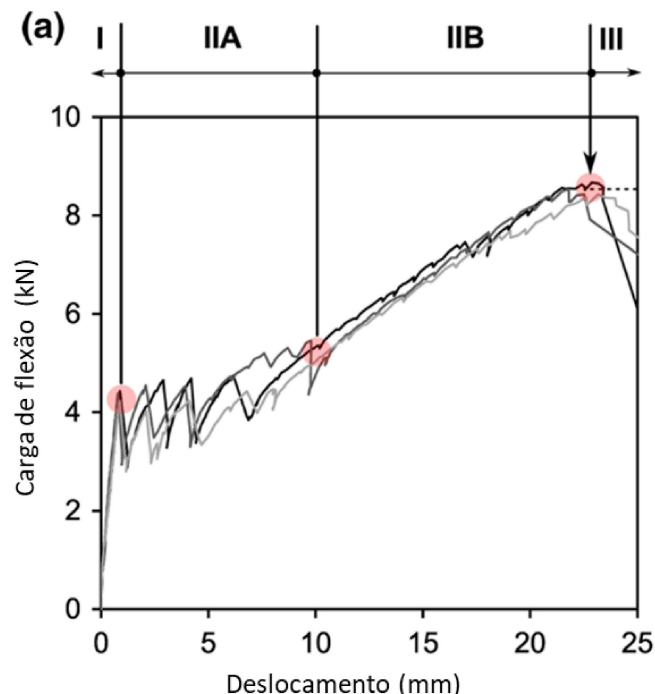
O comportamento à flexão deve ser considerado no processo de análise estrutural dos elementos estruturais, como os painéis de fachada, que são geralmente submetidos a ações de vento e variação de temperatura, bem como seu peso próprio. Consecutivamente, o suporte de carga depende, principalmente, da rigidez à flexão do compósito (SHAMS et al., 2015).

Para Peled, Mobasher e Bentur (2017), concretos reforçados com têxteis, quando solicitados à flexão, apresentam um progressivo aumento da tensão após o surgimento das fissuras, visto que a tensão máxima é maior que a tensão de fissuração, além do módulo de elasticidade após a fissuração ser relativamente horizontal.

No esforço de flexão, a resistência à tração e compressão, atuam em ação conjunta, para Mobasher (2016) e Peled, Bentur e Mobasher (2017), estes componentes surgem nos elementos solicitados à flexão, e, que como a resistência à compressão da matriz é superior à tração, a maior exigência do TRC é guiada pela zona tracionada.

Kamani, Kamali Dolatabadi e Jeddi (2018) e Williams Portal, Nyholm Thrane e Lundgren (2017) apresentam que o comportamento da carga x deslocamento da solicitação de flexão pode ser organizado em um diagrama dividida em três estágios, como ilustra a Figura 15.

Figura 15 – Esquema do comportamento característico à flexão, diagrama carga x deslocamento



Fonte: Williams Portal, Nyholm Thrane e Lundgren (2017, p. 6)

No instante inicial, estágio I, há influência do regime elástico do material, não há surgimento de fissuras e o concreto suporta os esforços. No estágio II existe

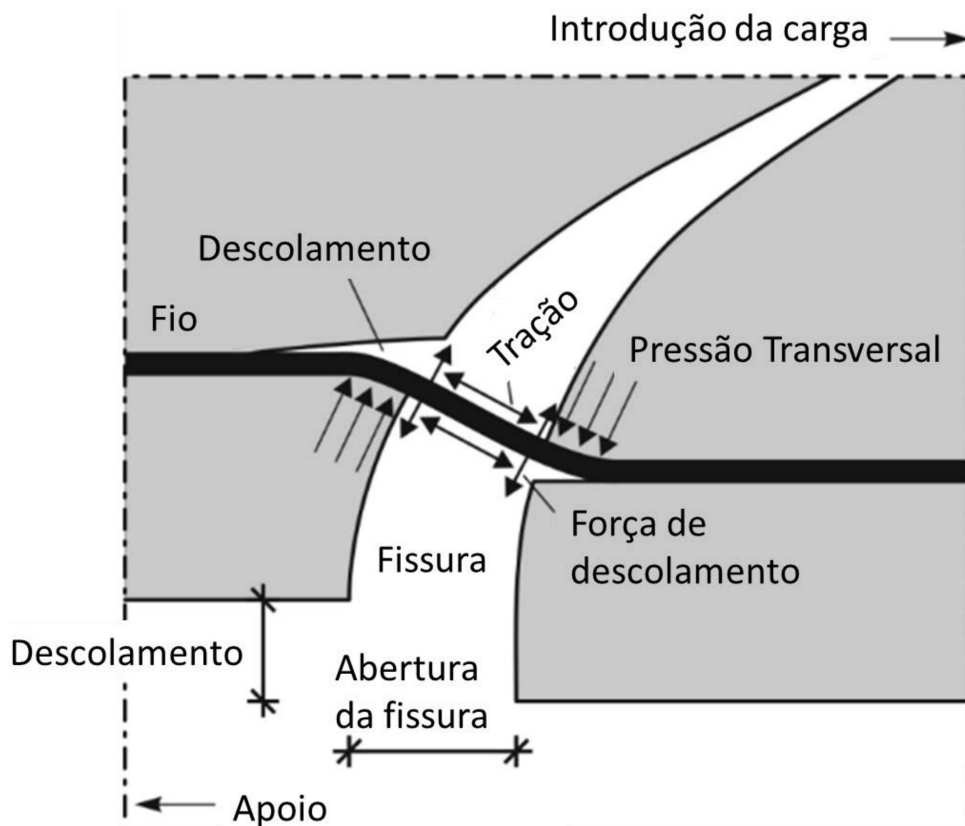
ocorrência de fissuras, com avanço da carga com o deslocamento, sendo que no estágio IIa há multiplicação das fissuras e no IIb não há surgimento de novas fissuras, apenas aumento da abertura das existentes, consecutivamente a carga é transferida diretamente para o têxtil. A falha do sistema principia o estágio III, na qual há falha da aderência do têxtil na matriz e ocorre a redução acentuada da carga, atribuída ao escorregamento dos filamentos externos do fio. Após o sistema rompe quando há deslizamento dos filamentos do núcleo, rompendo as fibras de forma telescópica, este modo de falha acontece lentamente por altas deformações (WILLIAMS PORTAL; NYHOLM THRANE; LUNDGREN, 2017).

Para Kulas (2013), a configuração da ruptura de painéis depende da taxa de reforço longitudinal, quando em situações com pequenas taxas de reforço, a falha ocorre com ruptura do reforço, ao passo que com maiores taxas, a ruptura do compósito pode ocorrer por cisalhamento à flexão, logo a fração de concreto do elemento rompe por excesso de tensão de compressão.

Este comportamento corrobora com o observado por Kamani; Dolatabadi e Jeedi (2018), o quais indicam que a fissura vertical face mais tracionada, migra em um ângulo decrescente na direção da introdução da carga.

Além das fissuras verticais, pode ainda surgir fissuras no nível do reforço com configuração longitudinal, ou seja, paralela ao têxtil, resultado de pressões internas transversais ao reforço, conduzindo no descolamento de parte da matriz, na região de cobertura inferior do reforço (KULAS, 2013). Este comportamento é detalhado na Figura 16.

Figura 16 – Efeito do descolamento do cobrimento inferior da matriz por ação da pressão transversal



Fonte: Kulas (2013, p. 182)

O têxtil quando solicitado à flexão, exerce pressão transversal na camada de cobrimento do concreto, resultando na fissura horizontal no nível do reforço e no descolamento da camada inferior do concreto (KULAS, 2013).

A análise das tensões de flexão são as melhores descrições do comportamento do concreto têxtil quanto às suas condições reais de uso (VLACH et al., 2018). Para Hegger et al. (2006a), este procedimento de avaliação é de fácil realização e pode fornecer informações importantes do material.

O método indicado para avaliação deste comportamento, é o dos quatro pontos, como indicar Hegger et al. (2006a), pois é possível identificar o momento de fissuração e momento fletor máximo, assim como o deslocamento e o cisalhamento do elemento (WILLIAMS PORTAL et al., 2017; VLACH et al., 2018).

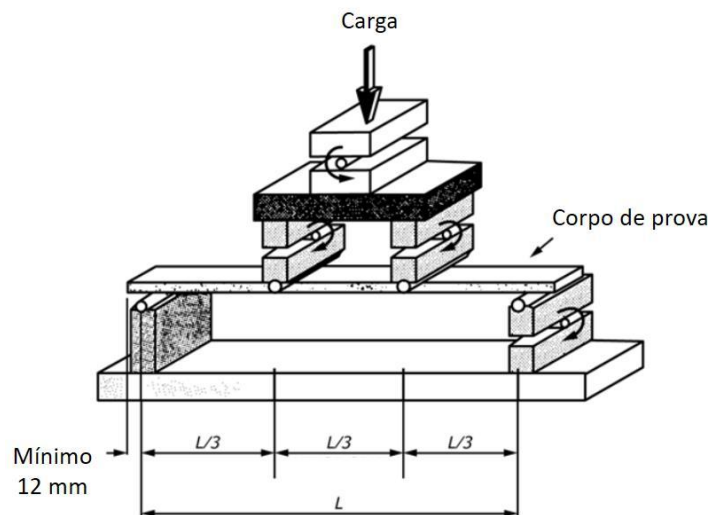
Para Vlach et al. (2018), fatores como a posição incorreta do reforço, coberturas variável do têxtil e espessura variável da matriz podem promover uma interação ruim entre o reforço e a matriz cimentícia, o que pode influenciar negativamente no resultado do comportamento à flexão.

O procedimento de ensaio descrito pela ASTM C947-3 (2016) para elementos reforçados com fibra de vidro pode ser empregado para o TRC. O corpo de prova deve ter uma razão do comprimento entre a espessura de 16 para 1 e 30 para 1, sendo a largura nominal de 50 mm, com velocidade de carregamento entre 1,27 e 5,1 mm/min.

Em relação as dimensões dos corpos de prova, por não haver um consenso a ser adotado para análise à flexão do TRC, há diversidade de dimensões encontradas na bibliografia, Kamani, Kamali Dolatabadi e Jeddi (2018) adotaram corpos de prova com dimensões de 360 x 50 x 20 mm (comprimento x largura x espessura) que seguem a relação descrito pela ASTM C947-3 (2016), no entanto os autores Vlach et al. (2018) utilizaram das dimensões 360 x 100 x 18 mm, Cibulka, Musil e Vodicka (2020) empregaram corpos de prova com dimensões de 620 x 150 x 18 mm e Halvaei, Latifi e Jamshidi, (2018) as dimensões de 500 x 100 x 25 mm.

Todavia, todos os autores seguiram a configuração de posicionamento do corpo de prova no equipamento de ensaio como descreve a ASTM C947-3 (2016), demonstrada pela Figura 17.

Figura 17 – Configuração de carregamento para ensaio de flexão



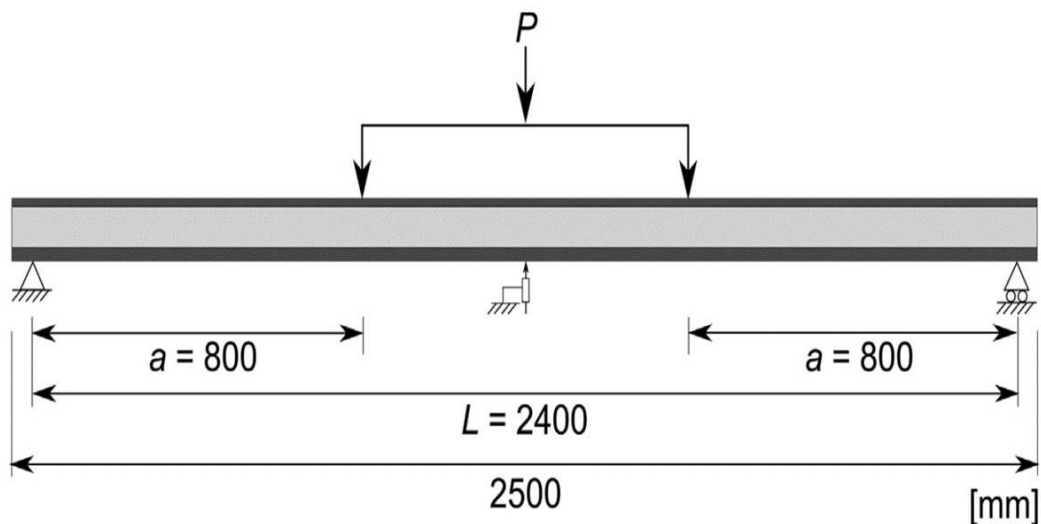
Fonte: ASTM C947-3, (2016, p. 2)

Em relação a verificação das condições aproximadas à situação de uso, Colombo, Colombo e Di Prisco (2015) realizaram o procedimento de avaliação da resistência à flexão pelo método dos quatro pontos, apresentado na Figura 17, em estudo com painéis sanduíches preenchidos com EPS, com dimensões próximas às aplicadas em situação de uso, sendo 1500 x 300 mm e 1200 x 300 mm (comprimento

x largura) e concluíram que a dimensão do corpo de prova não afeta o comportamento global, sendo ambos os resultados similares. Enquanto que Shams et al. (2015) e Williams Portal et al. (2017) optaram por corpos de prova de painéis do tipo sanduíche com dimensões similares às empregadas nas edificações, cujos resultados podem ilustrar o comportamento mecânico em situação real.

Williams Portal et al. (2017) adotaram corpo de prova de comprimento igual a 2500 mm, como apresenta a Figura 18, sendo a amostra apoiada em dois suportes rotulados, afastados em 50 mm da extremidade do painel de ensaio, com carregamento em dois pontos.

Figura 18 – Configuração do teste de flexão em quatro pontos



Fonte: Williams Portal et al. (2017, p. 107)

## 2.5 ASPECTOS DE DURABILIDADE DO TRC

A durabilidade do TRC é uma importante consideração de análise, que relaciona a interação da matriz com o reforço ao longo do tempo, portanto, o TRC, geralmente, possui propriedades que podem variar durante sua vida útil, especialmente no que tange a aderência do têxtil com a matriz. Em particular, a resistência à tração e flexão, bem como as respectivas deformações, até mesmo, o mecanismo de falha podem ser alterados (PURNELL et al., 2006).

As influências na aderência do têxtil com a matriz são atribuídos dois aspectos, que segundo Cohen e Peled (2010) caracterizam mecanismos de degradação observados durante o envelhecimento, devido à penetração da matriz no feixe: (i)



alteração do modo de ruptura telescópica pela penetração dos produtos de hidratação do cimento, à medida em que mais fibras fraturam após o envelhecimento, levando a comportamentos de falha frágeis e (ii) deterioração química das próprias fibras de vidro à medida em que mais fibras estão em contato direto com a matriz de cimento, reduzindo a resistência do compósito. Ambos os mecanismos de deterioração são desenvolvidos principalmente em decorrência do ambiente alcalino presente na solução do poro da matriz cimentícia.

A durabilidade do TRC reforçado com têxteis de vidro AR pode ser comparada com o concreto reforçado com fibra de vidro AR (GRC – *Glass Reinforced Concrete*), pois ambos os compósitos apresentam comportamentos similares ao longo da vida em serviço (PURNELL et al., 2006).

Purnell et al. (2006) acrescentam que as fibras de vidro AR podem se degradar em ambientes de elevada alcalinidade, potencial hidrogeniônico (pH) acima de 12, desenvolvem perdas parciais das características mecânicas, este ambiente é comumente encontrado na solução do poro de matriz cimentícia sem adição mineral. Os autores complementam que os têxteis de carbono sejam imunes à deterioração por álcalis.

Para Peled, Mobasher e Bentur, (2017), a fragilização do reforço ocorre com mudanças na interface da matriz com o reforço, há formação de hidróxido de cálcio na superfície do vidro, durante os primeiros 2 a 3 anos. Após este período, a degradação torna-se estável em um nível residual de suporte de carga suficientemente alto.

Com as reações de hidratação do cimento, existem precipitações de  $\text{Ca(OH)}_2$  na superfície dos filamentos de vidro AR, que aumentam a rigidez nesta região, de modo que a deformação dos filamentos é alcançada com menores aberturas de fissuras no TRC, com comportamento mais frágil. Além disso, quando os filamentos são solicitados, acarretam na fragmentação local pelos cristais de  $\text{Ca(OH)}_2$ . As pressões laterais, causadas pelos cristais aderidos nas fibras, se desenvolvem em rupturas locais da fibra, levando à falha prematura dos filamentos (BUTLER; MECHTCHERINE; HEMPEL, 2010).

Existem mecanismos que podem contornar a degradação natural e influenciar na maximização da durabilidade do TRC, quando há redução da concentração de álcalis na matriz, o que ocasiona efeitos positivos na manutenção do desempenho do compósito ao longo do tempo (COLOMBO et al., 2013).

Uma abordagem comum, envolve modificar a matriz de cimento, com o uso de adições pozolânicas. Estas adições destinam-se a reduzir a alcalinidade da solução do poro ao reagir com o hidróxido de cálcio produzido durante a hidratação do cimento (PURNELL et al., 2006). Estas reações ocorrem em misturas com adições minerais, como substituições parciais do cimento Portland. As modificações com pozolanas, como cinzas volantes e sílica ativa, são exemplos de interferência que influenciam na redução da perda de propriedades no envelhecimento (PELED; MOBASHER; BENTUR, 2017). Os autores acrescentam que as adições minerais não impedem a perda de resistência ao envelhecimento, mas diminuem a taxa de redução.

Além do mais, as modificações na matriz cimentícia com adições minerais, segundo Peled, Mobasher e Bentur (2017), contribuem com a manutenção do modo de ruptura do têxtil de vidro AR do tipo telescópico.

Estes mecanismos de deterioração foram observados no estudo realizado por Butler, Mechtcherine e Hempel (2010), com amostras de TRC com três tipos de matriz, sendo duas com adições pozolânicas, como substituição parcial do cimento Portland por sílica ativa e cinza volante, nas respectivas proporções, 6% e 30%, e uma mistura de referência, ou seja, sem substituição parcial do cimento. Os autores observaram que o valor da alcalinidade das misturas com pozolana alcançou o pH na faixa de 11,8 após 360 dias, enquanto, na mistura sem pozolanas o pH encontrado foi de 12,7, o que corrobora com a ação das pozolanas com a redução da alcalinidade da solução do poro.

Quanto ao comportamento mecânico dos concretos têxteis produzidos substituição parcial do cimento por pozolanas, em estudo de Butler, Mechtcherine e Hempel (2010), foi observado que as amostras com pozolanas tiveram degradação no desempenho mecânico inferior em comparação à matriz cimentícia sem a incorporação de pozolanas, visto que valores altos de pH ocasionaram no crescimento das falhas na superfície do filamento, prejudicando a ligação com a matriz. Importante destacar que este estudo transcorreu com procedimentos de envelhecimento acelerado, no qual os corpos de prova permaneceram em ambiente com temperaturas em 40°C e umidade acima dos 99%, por determinado período.

Butler, Mechtcherine e Hempel (2010) concluem que a composição de matriz com substituição parcial do cimento por pozolana é pré-requisito para que a resistência à tração e capacidade de deformação do TRC sejam preservadas sem perdas substanciais ao longo do período de exposição ao ambiente natural.

Em investigação realizada por Williams Portal et al. (2016) em têxtil de vidro AR, basalto e carbono de acordo com a ISO 10404-1:2015, com a imersão do reforço têxtil em solução alcalina, semelhante a solução do poro do concreto, ( $\text{pH} > 13$ ) e em solução com pH neutro ( $\text{pH} = 7$ ), ambos com temperatura de  $60 \pm 3^\circ\text{C}$  por 30 dias. Para Bentur e Mindess (2007) com este procedimento de análise, não é possível quantificar a vida útil do reforço, sendo possível apenas analisar de modo comparativo entre materiais.

Williams Portal et al. (2016) complementa que o têxtil de carbono possui resistência superior a álcalis e temperatura na condição de contorno do ensaio, enquanto a condição de ensaio foi considerada muito agressiva para os produtos de basalto e vidro AR. Além disso, a capacidade de tração e deformação do têxtil de carbono foram mantidas estáveis durante todo o período do ensaio, indicando propriedades de durabilidade favoráveis para inserção como reforço em matriz cimentícia.

Williams Portal et al. (2016) concluem que a redução da resistência à tração do têxtil de vidro AR, em solução alcalina, nos primeiros 5 dias, foi em torno de 65 a 70%, ao passo que, quando em solução de pH neutro, a redução da resistência à tração aos 30 dias foi dos mesmos 65%. Ou seja, a deterioração do têxtil de vidro AR aumentou com a elevação do pH. Caso estas fibras sejam colocadas em um ambiente de cimento, expostas a temperaturas elevadas ( $50 - 60^\circ\text{C}$ ), poderão surgir importantes efeitos nocivos ao comportamento mecânico do compósito.

Para Triantafillou (2016) os resultados das investigações da aderência do TRC ilustram a diversidade e complexidade do comportamento mecânico na região da interface e ao seu desenvolvimento a longo da vida útil. Assim, investigações experimentais em novas combinações fibra-matriz são indispensáveis.

## 2.6 MODELOS ANALÍTICOS DE DIMENSIONAMENTO

Para a utilização das propriedades do concreto reforçado com fibras têxteis como elementos estruturais, fazem-se necessários procedimentos de dimensionamento que determinarão as dimensões das peças estruturais, assim como os limites da capacidade de carregamento do sistema estrutura (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

Os modelos de dimensionamento consolidados para elementos de concreto armado não podem ser replicados ao concreto têxtil, pois o comportamento dos reforços têxteis difere aos de aço, devido às propriedades específicas de cada material e da ligação matriz com o reforço (HEGGER et al., 2006a; SCHOLZEN; CHUDOBA; HEGGER, 2015b).

Schnabel e Gries (2011) tratam sobre a impossibilidade de utilização dos mesmos modelos, de modo análogo ao dimensionamento do concreto armado, para o TRC, em decorrência da variedade de tecidos, assim como o tipo de fabricação e revestimento, que afetam bastante na resposta de tensão-deformação do compósito.

Para Hegger e Voss (2008), as propriedades de aderência do reforço têxtil com a matriz determinam de forma preponderante a capacidade de carga do TRC, portanto faz-se necessário o complemento com fatores de segurança inerentes ao reforço têxtil. Fatores que estão relacionados com a perda na resistência do reforço estrutural, a qual é influenciada pela composição da matriz, como esclarece Butler, Mechtcherine e Hempel (2010), bem como pelas fibras.

A eficiência das propriedades de adesão dos fios é afetada pelo diâmetro do filamento, o tipo do tratamento superficial da fibra e a espessura do fio (VOSS, 2008).

Existem modelos de cálculos iterativos para o dimensionamento do TRC ao momento fletor, para tanto, necessitam de parâmetros de entrada específicos do material a ser empregado, os quais devem ser determinados experimentalmente (HEGGER; WILL, 2016).

Para Scholzen, Chudoba e Hegger (2015b), o modelo analítico, neste trabalho denominado como modelo I, para determinação do momento fletor do TRC propostos por Hegger e Voss (2008); Hegger et al. (2006b) e Voss, (2008), foi desenvolvido para estados de tensão uniaxiais relevantes aos elementos estruturais, como painéis de TRC reforçados sob solicitação em apenas uma direção, que considera os efeitos máximos de resistência à tração da interação reforço têxtil com a matriz, correspondendo aos valores relacionados ao comportamento do estado de limite último dos elementos estruturais.

Enquanto que o modelo II, neste trabalho assim distinguido, proposto por Kamani; Dolatabadi; Jeddí (2018) e Kamani et al. (2019), consideram parâmetros de entrada estabelecidos por propriedades dos materiais, tais como deformação, tensão de tração do reforço e compressão da matriz, e os relacionam com o estado limite último dos elementos à flexão.

No entanto, para Hegger et al. (2015), nas situações em que o reforço têxtil não possui tratamento superficial, o modelo estrutural teórico deve ser validado com modelos experimentais similares, que possam contribuir com respostas do comportamento à flexão e tração do compósito. Os autores contribuem que, no cenário em que o reforço possui tratamento superficial com epóxi ou estireno butadieno, os modelos teóricos necessitam apenas serem validados com valores do comportamento dos materiais isolados.

### 2.6.1 Modelo I de dimensionamento à flexão

Esta metodologia de dimensionamento foi empregado por Hegger, Schneider e Kulas (2010) na produção de painéis de fachada ventilada, os quais alcançaram resultados satisfatórios entre o modelo teórico e o experimental. O processo de dimensionamento é apresentado nas Equação 3 à Equação 10.

Este modelo requer, primeiramente, a determinação da resistência à tração ( $F_{ctu}$ ) do elemento reforçado com têxtil, o qual demanda concordância com resultados experimentais de tração do reforço isolado e do reforço no interior da matriz cimentícia, como demonstra na Equação 3 (VOSS; HEGGER, 2006; HEGGER; ZELL; VOSS, 2008)

$$F_{ctu} = A_t \times \sigma_f \times k_1 \times k_{0,\alpha} \times k_2 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$A_t$ : Seção transversal do reforço têxtil ( $\text{mm}^2$ )

$\sigma_f$ : resistência à tração do reforço (fio) ( $\text{N/mm}^2$ )

$k_1$ : coeficiente de eficiência (Equação 6)

$k_{0,\alpha}$ : coeficiente de carregamento de ângulo oblíquo (Equação 9)

$k_2$ : coeficiente de carregamento biaxial (VOSS, 2008)

A área da seção transversal do reforço têxtil é o quociente da finura do reforço em tex com a densidade do material a ser utilizado, como ilustra o procedimento apresentado por Weiland et al. (2007), Colombo et al. (2013) e Neves e Felicíssimo (2020), na Equação 4.

$$A_t = \frac{\text{finura (tex)}}{\text{Densidade } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)} \quad \text{Equação 4}$$

O coeficiente  $k_1$  é o fator de eficiência é a relação da tensão máxima obtida dos ensaios de tração em elementos de TRC ( $\sigma_{tu}$ ), com a resistência à tração do filamento ( $\sigma_{fil}$ ), como expõe a Equação 6 (HEGGER; ZELL; VOSS, 2008).

$$k_1 = \frac{\sigma_{tu}}{\sigma_{fil}} \quad \text{Equação 5}$$

Em estudos realizados por Hawkins et al. (2018) e Silva e Silva (2020), os autores adotaram a tensão de tração do fio ( $\sigma_t$ ), ao invés da resistência do filamento, dado que a seção transversal do fio não ser completamente preenchida por filamentos, como apresentado na Equação 6, uma vez que possa haver solicitação diferente entre filamentos. Schütze, Lorenz e Curbach (2015), Valeri, Ruiz e Muttoni (2018) e Valeri, Fernández Ruiz e Muttoni (2020) destacam que a resistência final do TRC não pode ser deduzida pela resistência individual do filamento, pois há diminuição no desempenho da ligação dos filamentos próximos ao núcleo do fio com a matriz cimentícia.

$$k_1 = \frac{\sigma_{tu}}{\sigma_t} \quad \text{Equação 6}$$

Rampini et al. (2019) relacionam o coeficiente  $k_1$  como o fator de eficiência ( $EF_{TRC}$ ) padrão do concreto têxtil, determinado pela Equação 7, o qual é definido com a relação entre a capacidade de força máxima do TRC ( $P_{TRC}$ ) com a força última à tração da malha têxtil ( $P_{f,max}$ ).

$$EF_{TRC} = \frac{P_{TRC}}{P_{f,max}} \quad \text{Equação 7}$$

No estudo realizado por Du et al. (2017), os autores associam o coeficiente  $k_1$  com o fator de utilização, determinado pelo quociente da força máxima de tração do TRC ( $F_{UTS}$ ) com força máxima do têxtil ( $F_t$ ), como demonstra a Equação 8. Sendo  $F_t$  calculado com o produto da força máxima de uma camada de têxtil e o número de camadas.

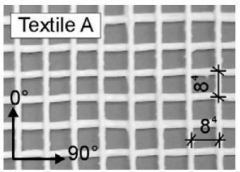
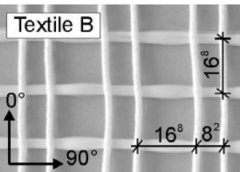

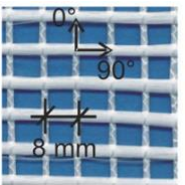
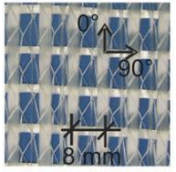
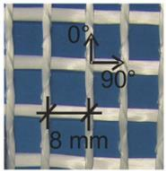
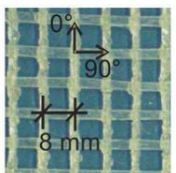
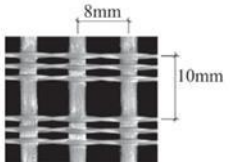
$$k = \frac{F_{uts}}{F_t} \quad \text{Equação 8}$$

Pelo fato do comportamento do TRC carregado ser influenciado pelas propriedades de adesão do reforço têxtil à matriz, os fatores de eficiência para o dimensionamento de TRC são coeficientes importantes a serem considerados (HEGGER; SCHNEIDER; KULAS, 2010).

O Quadro 3 apresenta os valores utilizados pela bibliografia para obter a relação de resistência do têxtil com o TRC.

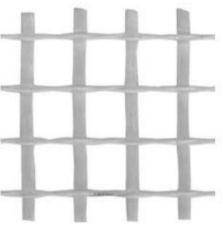
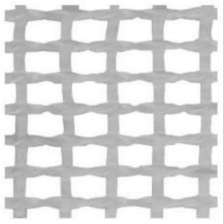
Quadro 3 – Valores de  $k_1$  relacionados na bibliografia para têxtil de vidro AR

(continua)

Tipo do tecido	Imagem do têxtil	Área (mm <sup>2</sup> /m)	tex	$\sigma_t$	$\sigma_{fil}$	$\sigma_{tu}$	direção	$k_1$	Referências
				(MPa)					
Pilar		108	2400	-	1700	489	urdidura	0,288	Hegger, Schneider e Kulas (2010)
Pilar		108	2400	-	1700	1160	urdidura	0,682	
Pilar		107	2400	848	1120	470,4	urdidura	0,42	Hegger Zell e Voss (2008)
Pilar		105	2400	-	1808	460	urdidura	0,25	Hegger; Voss (2008)
Tricô		52,5	1200	-	2018	818	urdidura	0,40	
Pilar		52,5	1200	-	2018	550	urdidura	0,27	
Pilar		105	2400	-	1808	1200	urdidura	0,66	
Leno		65,3	1410	1192	-	971	urdidura	0,814	

Quadro 3 –Valores de  $k_1$  relacionados na bibliografia para têxtil de vidro AR

(conclusão)

Leno		51,17	2400	1596,87	2000	1283,82	urdidura	0,8	Rampini et al. (2019)
Leno		179,1	4800	972,32	2000	881,37	urdidura	0,91	

Em estudo realizado por Hegger et al. (2006a), em TRC com uma, duas e três camadas de têxtil, os autores observaram que a eficiência  $k_1$  é influenciada pela quantidade de camadas de reforço, sendo que o valor da eficiência diminui com o aumento da quantidade de camadas.

Hawkins et al. (2018) adotaram a Equação 6 e observaram que os valores de eficiência  $k_1$  dependem da taxa de reforço, uma vez que o valor alterou de 0,726 para 0,814, respectivamente, em corpo de prova de TRC com espessura de 30 mm e 15 mm, para a mesma quantidade de reforço. Consecutivamente, a resistência à tração obtida por ensaio de tração para um determinado cenário, não pode ser utilizada para taxas de reforço diferentes. Os autores complementam que a solução seria testar diferentes amostras com diferentes taxas, procurando o intervalo esperado para o projeto da solução estrutural.

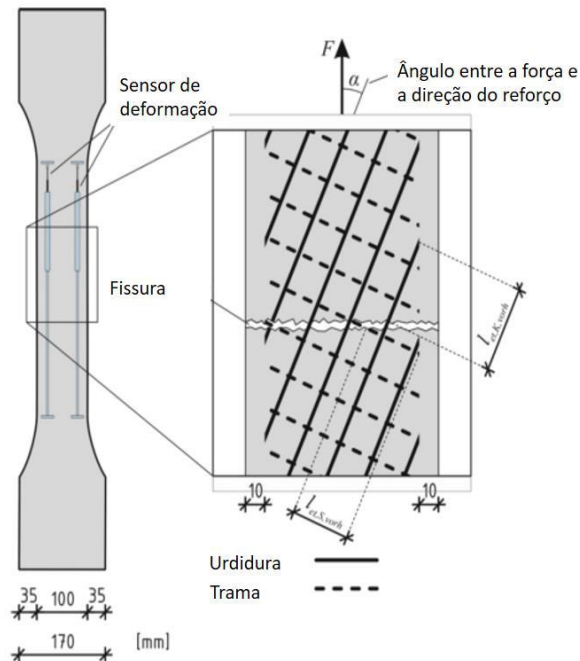
Quando em vigas de concreto reforçadas têxtil de carbono, Silva e Silva (2020) analisaram comparativamente o resultado do momento oriundo do modelo teóricos de dimensionamento, considerando o fator  $k_1 = 1$ , com resultados experimentais. E demonstram que o modelo teórico com o coeficiente utilizado, pode não representar o comportamento efetivo do compósito.

Outro efeito importante que influencia na resistência à tração do TRC é o alinhamento do têxtil em relação à direção da carga (KULAS, 2013). A posição do têxtil com desvio em relação ao carregamento pode levar a perdas de resistência à tração, sendo assim, tal variação deve ser considerada na determinação do momento



fletor, o ângulo formado entre a direção da carga e a posição do têxtil é demonstrada na Figura 19, definidos pelo ângulo  $\alpha$ .

Figura 19 – Orientação do reforço em relação à direção do carregamento



Fonte: Kulas (2013, p. 127)

Os efeitos do alinhamento do reforço com a perda de força são quantificados pelo fator  $k_{0,\alpha}$ , expresso pela Equação 9, esta determinação possui boa concordância com os resultados experimentais encontrados por Hegger, Zell e Voss (2008).

$$k_{0,\alpha} = 1 - \frac{\alpha}{90^\circ} \quad \text{Equação 9}$$

O fator  $k_2$  foi introduzido como uma medida da minoração da capacidade de carga do TRC como resultado de um carregamento biaxial, quando o têxtil é solicitado simultaneamente em ambas as orientações (VOSS, 2008).

As tensões de tração em dois eixos apresentam efeitos significativos sobre a rigidez do elemento, o que resulta em tensões de ruptura reduzidas. Segundo Voss (2008), a redução da tensão pode atingir 74% da capacidade de carga quando em sollicitação uniaxial. A Tabela 4 mostra os valores recomendados pelo autor.

Tabela 4 – coeficiente de carregamento biaxial –  $k_2$ 

Carregamento	$k_2$
Tração biaxial	0,74
Tração uniaxial	1,0

Fonte: (VOSS, 2008)

Para elementos submetidos a esforços de flexão, deve-se conhecer o estado limite último da peça, de acordo com os resultados do momento fletor último ( $M_u$ ), que é o produto da multiplicação da resistência à tração ( $F_{ctu}$ ), com o fator de carregamento obtido com a Equação 11 e com a distância do braço de alavanca interno ( $z$ ), como demonstra a Equação 10 (HEGGER; VOSS, 2008; HEGGER; SCHNEIDER; KULAS, 2010; HEGGER; WILL, 2016).

$$M_u = k_{fl,p} \times F_{ctu} \times z \quad \text{Equação 10}$$

Sendo:

$k_{fl,p}$ : Fator de carregamento à flexão (Equação 11)

Vidro AR (Têxtil do tipo pilar):  $k_{fl,p} = 1,0$

Vidro AR (Têxtil do tipo tricô):  $k_{fl,p} = 1,0 + 0,15\rho_l$  Equação 11

Carbono:  $k_{fl,p} = 1,0 + 0,4\rho_l$

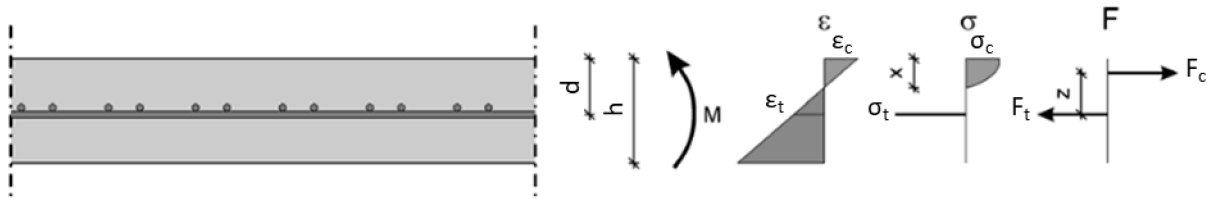
Sendo:

$\rho_l$ : Taxa de reforço longitudinal (%)

Para Voss (2008), este modelo de determinação do momento teórico pode ser considerado tanto para têxteis não impregnados como os com impregnação.

A distância do braço de alavanca interno na seção do elemento é a distância da concentração de carga à compressão até a posição do reforço, como ilustra a Figura 20 e pode ser determinada pela Equação 12 (SCHLADITZ et al., 2012).

Figura 20 – Distribuição das tensões e deformações na seção transversal do elemento estrutural



Fonte: Adaptado de Hegge, Schneider e Kulas (2010, p. 400)

$$z = d - \frac{\lambda \times x}{2} \quad \text{Equação 12}$$

Sendo:

$d$  = distância entre o banço comprimido até o centroide do reforço de tração.

A distância da linha neutra ( $x$ ) entre a parte mais comprimida da seção transversal é determinada pela Equação 13.

$$x = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{tu}} \times d \quad \text{Equação 13}$$

Por definição, a altura da zona comprimida deve ser atenuada para uma distribuição de tensão retangular, utilizando o valor  $\lambda$  como orienta Schladitz et al. (2012).

Quando a tensão de compressão do concreto é inferior a 50 MPa, a NBR 6118 (ABNT, 2014) e DIN 1045-1 (2008) recomendam considerar  $\lambda = 0,8$ . Entretanto, a NBR 6118 (ABNT, 2014) indica utilizar a Equação 14 na ocasião em que o concreto possua a tensão de compressão ( $\sigma_c$ ) superior a 50 MPa.

$$\lambda = 0,8 - \frac{\sigma_c - 50}{400} \quad \text{Equação 14}$$

Ao seguir estes procedimentos de dimensionamento, Hegger, Schneider e Kulas (2010) desenvolveram painéis de fachada com área de 12 m<sup>2</sup>, para uso como revestimento de um dos laboratórios do Instituto da Universidade de Aachen (RWTH).

Rempel, Kulas e Hegger (2015) comprovaram que o procedimento para determinação do momento fletor teórico se mostrou adequado aos resultados experimentais, e complementam que pode haver diferença de 5% de dispersão entre o momento fletor teórico e o experimental.

Este procedimento de modelagem foi adotado por Valeri, Ruiz e Muttoni (2018) no dimensionamento de uma viga com seção transversal do tipo “I” reforçada com 6 malhas de têxtil de carbono revestida com estireno butadieno posicionados no banzo tracionado. Os autores apontam que esta ferramenta numérica se torna muito útil para compreender a resistência máxima à flexão.

Hawkins et al. (2018) acrescenta que este modelo apresenta elevado grau de conservadorismo, pois cumpre de modo simples e seguro, soluções estruturais de TRC econômicas e sustentáveis.

### **2.6.2 Modelo II de dimensionamento à flexão**

Este modelo toma como base o método analítico de condições de equilíbrio de seção para avaliar a capacidade de força máxima do TRC. A avaliação da capacidade de flexão e o modo de ruptura do TRC podem ser divididas em três modos de falha, sendo a ruptura equilibrada, quando ocorre simultaneamente a ruptura do têxtil com o esmagamento do concreto; ruptura por compressão do concreto, esmagamento do concreto antes da ruptura do têxtil; e a ruptura por tração, falha do reforço antes do esmagamento do concreto (KAMANI; DOLATABADI; JEDDI, 2018).

Em elementos submetidos ao esforço de flexão, a taxa de reforço é calculada pelo equilíbrio de forças na seção da viga, juntamente com a compatibilidade de deformação. Essa relação de equilíbrio de forças foi relacionada nos trabalhos de Kamani; Dolatabadi; Jeddi (2018) e Kamani et al. (2019), os quais adotaram o método do balanço de cálculo normatizado para concreto reforçado com fibras poliméricas (FRP) pela ACI 440.1R.15, (2015).

Os cálculos analíticos conhecidos e consolidados do concreto armado, também se mostraram adequados a serem considerados para o projeto de elementos submetidos à flexão reforçadas com têxtil, desde que fatores de correção sejam considerados para otimizar a capacidade de flexão final do elemento (SCHUMANN et al., 2018).

Consiste que o uso de altas taxas de reforço em um elemento sob carregamento de flexão, pode ser conceituado com reforço excessivo, tendo a ruptura indicada pela deformação acentuada no banzo comprimido, acarretando o esmagamento do concreto. Por outro lado, quando se utiliza baixas taxas de reforço,

tem-se a situação chamada sub reforçada. Neste cenário, ocorre crescimento das fissuras e a falha se desenvolve por ruptura do reforço (ACI 440.1R.15, 2015).

A taxa de equilíbrio é uma função da geometria da viga, no entanto, para elementos de TRC, a propriedade de penetração da matriz por entre os feixes de fibras deve ser considerada, o que relaciona que a capacidade nominal de resistência de todas as fibras não pode ser utilizada (PELED; MOBASHER; BENTUR, 2017). Por consequência, Kamani, Dolatabadi e Jeddi, (2018) propuseram um índice de desempenho da fibra (FPI), que representa a eficiência das fibras no interior da matriz cimentícia. Os autores introduziram este índice no método analítico indicado pela norma ACI 440.1R.15 (2015), para elementos submetidas à flexão.

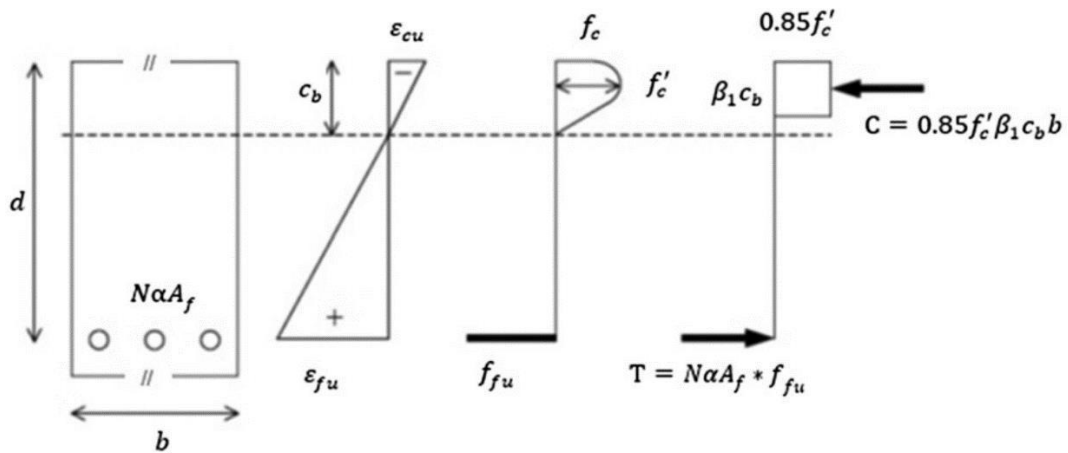
Considerando que o índice de desempenho da fibra, representado pelo símbolo  $\alpha$ , deve ser inferior a 1, consecutivamente, a área do reforço é minorada. Visto que o feixe de fibras é solicitado de modo diferencial. Desse modo, a fim de se obter a tensão resistente do reforço, frente a solicitação de tração, deve-se minorar a área do reforço (KAMANI; DOLATABADI; JEDDI, 2018).

Kamani et al. (2019) complementam que o índice FPI pode ser considerado, a fim de se obter o momento máximo potencial a ser alcançado pelo TRC.

Este índice foi simulado por Kamani, Dolatabadi e Jeddi, (2018), para reforço têxtil com fibras de carbono, por meio de cálculo da capacidade de flexão e relacionado com resultados experimentais. Os quais obtiveram índices de 0,21 e 0,5, respectivamente, para têxtil de carbono sem e com impregnação de resina epóxi.

A distribuição de tensão e deformação, bem como as forças transversais para a seção transversal na situação em equilíbrio de esforço, pode ser relacionada de modo análogo a uma seção FRP, conforme demonstra a Figura 21.

Figura 21 – Esquema de representação da seção transversal com balanço das forças



Fonte: Kamani et al. (2019, p. 583)

Com base na suposição de deformação uniforme durante a solicitação de flexão, a deformação nas áreas de compressão ( $\epsilon_{cu}$ ) e tração ( $\epsilon_{fu}$ ) pode ser considerada de forma linear, como demonstra a Equação 15. Com esta equação, também é possível determinar distância entre o banzo comprimido com a linha neutra em situação de equilíbrio das forças ( $c_b$ )

Para que haja a máxima contribuição do concreto na situação de compressão, a norma ACI 440.1R.15 (2015) recomenda considerar o valor de 0,003 mm/mm para a deformação do concreto.

$$\frac{\epsilon_{cu}}{c_b} = \frac{\epsilon_{fu}}{d - c_b} \quad \text{Equação 15}$$

Para que haja situação de equilíbrio das forças, tanto as forças de compressão como de tração devem se anular, conforme demonstrado na Equação 16, para confirmação de equilíbrio de vigas em TRC, já considerando o fator FPI e o número de fios.

$$N_b \alpha A_f \times f_{fu} = 0,85 \times f'_c \times b \times \beta_1 \times c_b \quad \text{Equação 16}$$

Sendo:

$N_b$  = número de fios em situação de equilíbrio

$f'_c$  = tensão de compressão da matriz em situação de equilíbrio (MPa)

$f_{fu}$  = tensão máxima de tração do fio (MPa)

$\beta_1$  = constante tomada como 0,65 para a resistência do concreto superior a 28 MPa (ACI 440.1R.15, 2015).

No cenário onde o reforço é excessivo, ou seja, super reforçado, superior à taxa em situação de equilíbrio, o momento fletor máximo [ $M_{n(over)}$ ] pode ser calculado com a Equação 17, esta circunstância ocorre sempre que a distância entre o banzo comprimido até a linha neutro ( $c$ ) é maior que a distância entre o banzo comprimido com a linha neutra na situação de equilíbrio das forças [ $c > c_b$ ].

$$M_{n(over)} = N\alpha A_f \times \varepsilon_f E_f \left( d - \frac{\beta_1 \times c}{2} \right) \quad \text{Equação 17}$$

Sendo:

$N$  = número de fios

$\alpha$  = índice de desempenho da fibra (FPI)

$A_f$  = área do fio ( $\text{mm}^2$ )

$\varepsilon_f$  = Deformação do fio ( $\text{mm/mm}$ )

$E_f$  = Módulo de elasticidade do fio (MPa)

$d$  = distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração (mm).

$c$  = Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra (mm).

A posição da linha neutra, a fim de confirmar o cenário de equilíbrio dos esforços, pode ser determinada pela Equação 18, para o cenário de super reforçado.

$$0,85 \times f_c \times b \times \beta_1 \times c^2 + N\alpha A_f \times E_f \times \varepsilon_{cu} \times c - N\alpha A_f \times E_f \times \varepsilon_{cu} \times d = 0 \quad \text{Equação 18}$$

Ao passo que, na situação em que ( $c < c_b$ ), o elemento submetido ao esforço de flexão, é considerado sub reforçado. Consecutivamente o valor do momento fletor máximo [ $M_{n(under)}$ ] deve ser calculado utilizando a Equação 19.

$$M_{n(under)} = N\alpha A_f \times f_{fu} \left( d - \frac{c}{3} \right) \quad \text{Equação 19}$$

Na situação de sub-reforçado, a profundidade da linha neutra deve ser determinada com a Equação 20.

$$0,85 \times \frac{f_c}{\varepsilon_{cu}} \times \varepsilon_{fu} \times b \times \beta_1 \times c^2 + N\alpha A_f \times f_{fu} \times c - N\alpha A_f \times f_{fu} \times d = 0 \quad \text{Equação 20}$$

Além dos elementos estruturais satisfazerem o estado limite último (ELU), determinado pelo momento último do elemento, o estado limite de serviço (ELS),

estabelecido pelo valor limite do deslocamento também deve ser atendido. Para tanto, a ACI 440.1R.15 (2015) assume a relação em  $l/240$  quando sob carregamento, sendo  $L$ , a distância entre apoio.

Silva e Silva (2020) contribuem ao afirmar que o deslocamento do TRC pode ser relacionado o valor limite estabelecido pela ABNT NBR 6118:2014, no qual o elemento estrutural deve compreender o mesmo deslocamento máximo tratado pela ACI 440.1R.15 (2015).

No entanto, pôr o têxtil possuir comportamento frágil, e perda de rigidez por escorregamento do reforço na matriz, conseqüentemente, a carga máxima do TRC é atingida com níveis de deslocamento superiores quando comparado com reforço metálico (SILVA; SILVA, 2020).



### 3 MATERIAIS E MÉTODO

Neste capítulo apresenta-se o procedimento experimental desenvolvido neste trabalho, no que tange ao alcance do objetivo proposto. O estudo está organizado no contexto recomendado por Kulas (2013), para isso algumas limitações foram estabelecidas, considerando as condições de contorno inerentes ao programa experimental. A seguir, são listadas algumas destas condições relevantes.

As condições ambientais, temperatura e umidade foram monitoradas, porém não controladas devido à carência de uma câmara de exposição ambiental específica para contemplar a moldagem das amostras, e o armazenamento dos moldes das amostras de concreto.

Para confecção das amostras de concreto têxtil, foi eleito um tipo de cimento, geralmente empregado em elementos pré-fabricados, determinados tipos de agregados miúdos, bem como um tipo de adição mineral e um tipo de aditivo, tendo em vista a aplicação de materiais comumente utilizados na região da realização do trabalho.

Os reforços utilizados neste trabalho, foram limitados em dois tipos de têxtil de vidro AR, tendo em vista, a indicação de uso, pela empresa fabricante, para elementos na construção civil.

Não foram determinadas as variações dimensionais das amostras de concreto têxtil, tampouco as posições finais do têxtil no interior da matriz, após o processo de concretagem.

Sendo assim, o trabalho está disposto em etapas, a primeira etapa abrange a caracterização dos materiais, com o intuito de avaliar as características físicas e mecânicas do reforço e da matriz cimentícia. Na etapa II foi realizada a caracterização mecânica do TRC, em amostras de menor escala, quanto ao comportamento à tração e à flexão dos compósitos reforçados com os têxteis de fibra de vidro AR.

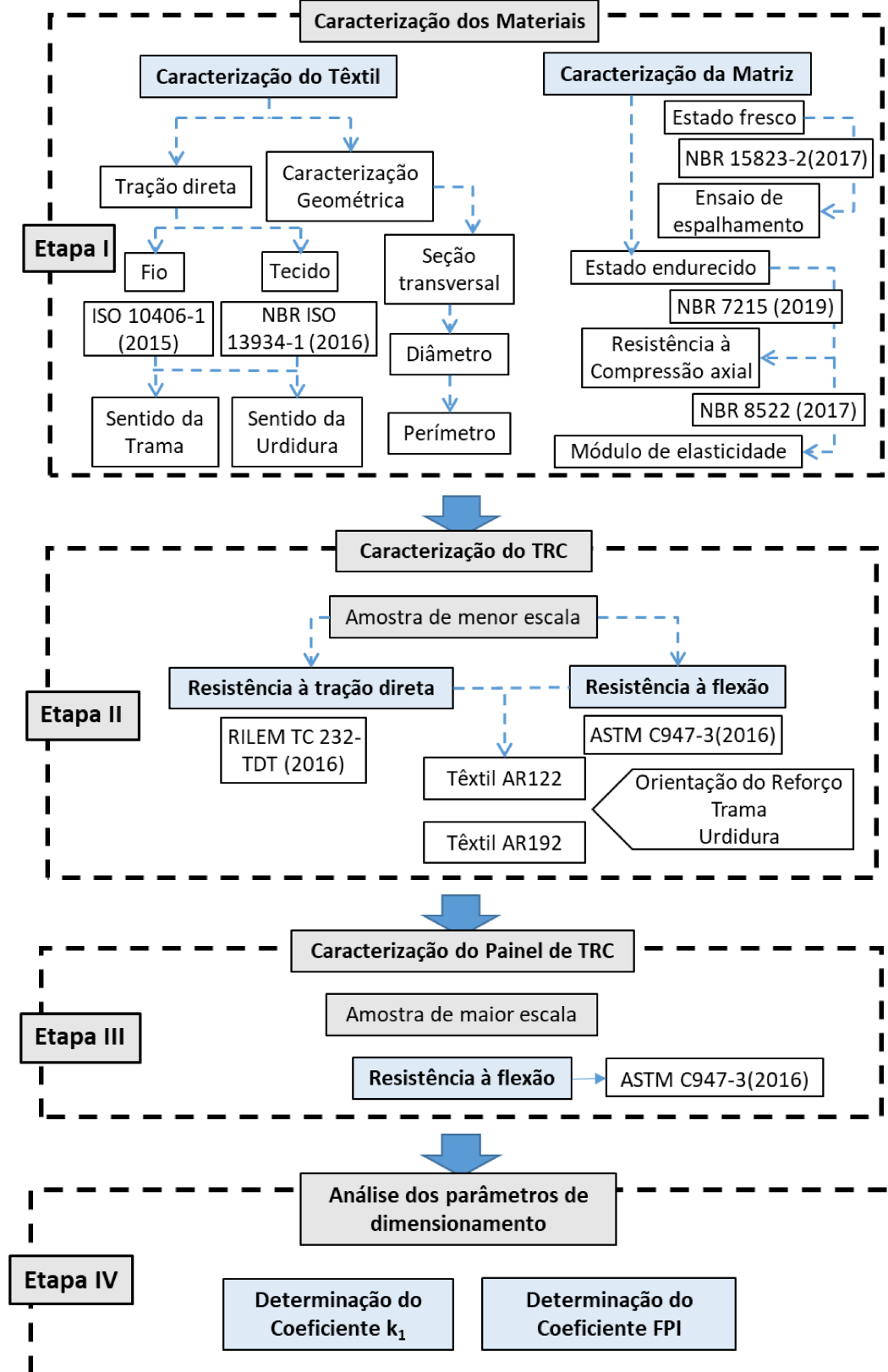
Na etapa III, tendo como base os resultados das etapas anteriores, foram moldadas amostras de maior escala, denominadas como painel, a fim de compreender o comportamento à flexão, com reforço do têxtil que apresentou melhor comportamento mecânico nas etapas anteriores, quando situações dimensionais próximas às aplicadas em condições reais de uso.

Na etapa IV, em posse dos resultados das etapas anteriores, determinou-se os coeficientes de eficiência do têxtil, a fim de subsidiar os modelos de dimensionamento

analíticos à flexão apresentados no capítulo 2.5. Além de relacionar os resultados dos modelos analíticos, com os resultados experimentais à flexão, a fim de validar os resultados teórico.

O fluxograma apresentado na Figura 22 ilustra a estratégia das etapas do programa experimental adotado nesta pesquisa.

Figura 22 – Fluxograma do programa experimental adotado



A execução e descrição das etapas desenvolvidas foram detalhadas nos subcapítulos apresentados na sequência.

### 3.1 FATORES FIXOS E VARIÁVEIS

Os fatores fixos empregados neste trabalho estão relacionados a matriz, visto que foi adotado apenas um traço para a moldagem dos corpos de prova de concreto têxtil.

Em relação as análises com os corpos de prova de menor escala, a espessura foi considerada como fator fixo.

Os fatores variáveis estão relacionados a tipologia do têxtil, pois foram adotados dois modelos de têxtil, além da quantidade de camadas de têxtil e a idade de cura da matriz.

Nos corpos de prova de maior escala, a espessura foi considerada como fator variável, visto que foram analisadas painéis com espessuras de 20 e 30 mm.


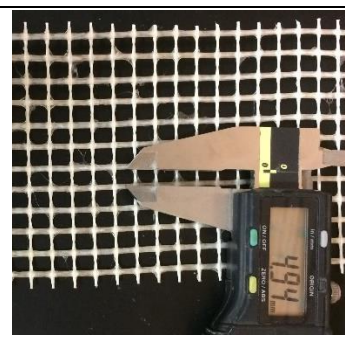
### 3.2 MATERIAIS

Para o desenvolvimento do trabalho, foram utilizados materiais disponíveis no mercado brasileiro, os quais são listados a seguir.

#### **3.2.1 Reforço têxtil**

Neste estudo foram utilizadas duas diferentes geometrias de reforço têxtil produzidos com fibra de vidro AR, o AR122 e o AR192, fabricadas pela empresa brasileira Texiglass Indústria e Comércio de Têxtil. Todos os têxteis, segundo o fabricante, são revestidos com resina acrílica sem função estrutural, com intuito apenas de aglomerar os filamentos, evitando que a tecelagem se desfaça. O Quadro 4 apresenta as características físicas dos têxteis empregados neste estudo.

Quadro 4 – Propriedades dos tecidos fornecidos pelo fabricante

Denominação do fabricante	AR122	AR192
Massa por área	122 g/m <sup>2</sup>	192 g/m <sup>2</sup>
Número de fios na urdidura	0,9 fios/cm	1,5 fios/cm
Número de fios na trama	1,0 fios/cm	1,5 fios/cm
Densidade linear (finura)	640 tex	640 tex
Teor de resina acrílica	14 %	13 %
Abertura da malha	10 x 10 mm	5 x 5 mm
Carga de ruptura teórica (urdidura)	200 N/cm	290 N/cm
Carga de ruptura teórica (trama)	220 N/cm	290 N/cm
Imagem do têxtil		

Fonte: Texiglass Industria e Comércio de Têxtil (2018)

Foram empregados estes dois tipos de têxteis por serem encontrados e fabricados no mercado nacional. Neste trabalho é utilizada a denominação AR122 e AR192, como designação para cada tipo de reforço.

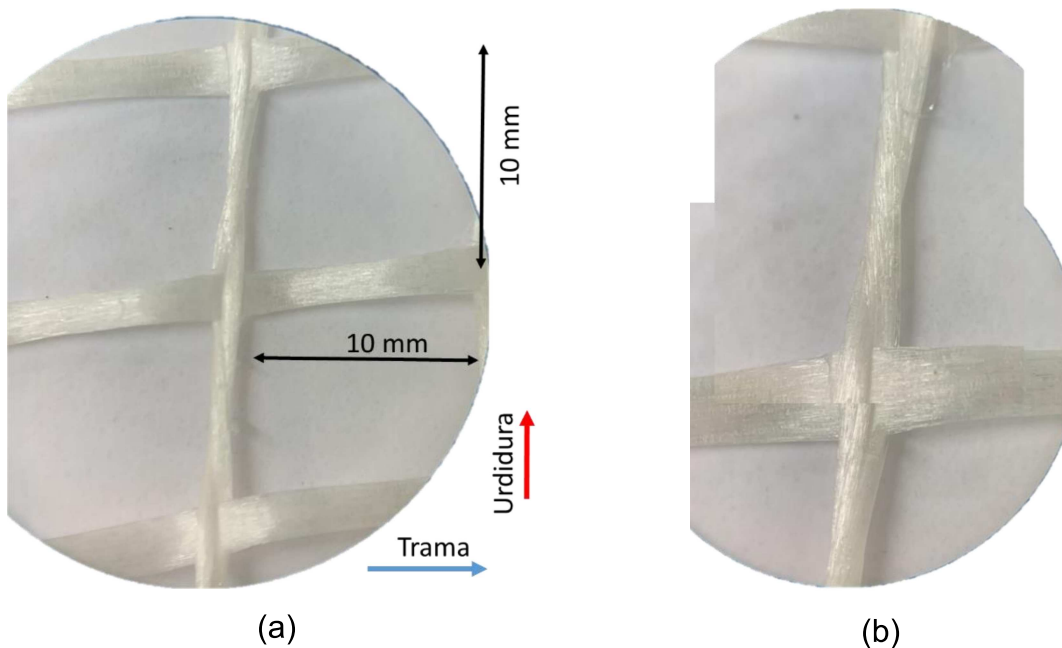
Ambos os têxteis utilizados como reforço são fabricados com dois conjuntos de fios entrelaçados perpendicularmente, os quais cruzam-se com ângulo de 90°, sendo os fios longitudinais, ao longo do comprimento do tecido, denominados urdidura, torcidos cruzando o fio da trama, o qual está orientado na largura do tecido. Este tipo de execução adotado nos tecidos utilizados neste trabalho é denominado leno, ou giro inglês. Nesta tipologia são dois conjuntos de filamentos na direção da urdidura, os quais são torcidos e enlaçados por entre os fios da trama, não há qualquer costura ou cola para garantir a posição dos fios.

Como caracterização da área dos fios, segundo procedimento descrito por Weiland et al. (2007), pode-se tomar como base a Equação 4, como quociente da área da seção transversal ( $A_t$ ) de um fio de têxtil, é função da finura (tex) com densidade ( $\rho$ ) do vidro AR, segundo Hawkins et al. (2018), considerada em 2780 kg/m<sup>3</sup>. Como

ambos os têxteis utilizados possuem a mesma finura, 640 tex, a área total do fio, tanto na orientação da trama como na urdidura, é de 0,23 mm<sup>2</sup>.

A Figura 23a apresenta a distância entre os fios da trama e da urdidura, em ampliação de 10x, que forma a malha de 10 x 10 mm do tecido AR122, ainda assim é exposto as direções da trama e da urdidura. O modo de fabricação do tipo giro inglês deste tecido é possível de ser visualizado na Figura 23b, com ampliação de 20x.

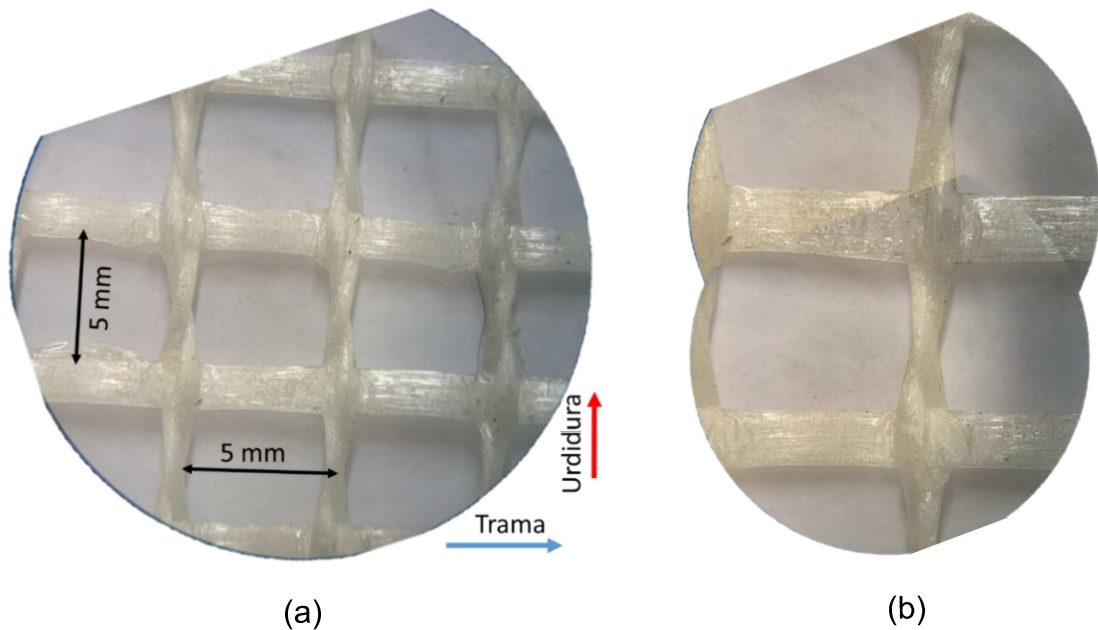
Figura 23 – (a) Configuração da malha do tecido AR122, (b) detalhe de fabricação



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 24a apresenta o têxtil denominado neste trabalho como AR192 com ampliação de 10x, cuja distância entre fios formam a malha de 5 x 5 mm e expõem a direção da trama e da urdidura. A forma de fabricação do tipo giro inglês é exposta na Figura 24b com ampliação de 20x.

Figura 24 – (a) Configuração da malha do tecido AR192, (b) detalhe de fabricação



Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.2.2 Cimento

Foi utilizado, nesta pesquisa, o cimento Portland de alta resistência inicial CPV-ARI. A escolha deste material se deu por conter pouca quantidade de adições e apresentar um teor elevado de  $C_3S$  e, conseqüentemente, maior disponibilidade de CH disponível para as reações pozolânicas. Além disso, a utilização desse cimento permitiu a contribuição isolada da pozolana na mistura.

### 3.2.3 Sílica ativa

A sílica ativa utilizada é proveniente da produção de silício metálico, do tipo não densificada e apresenta coloração cinza clara, produzida pela empresa Dow Corning, as características físicas e químicas informadas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Características físicas e químicas da sílica ativa

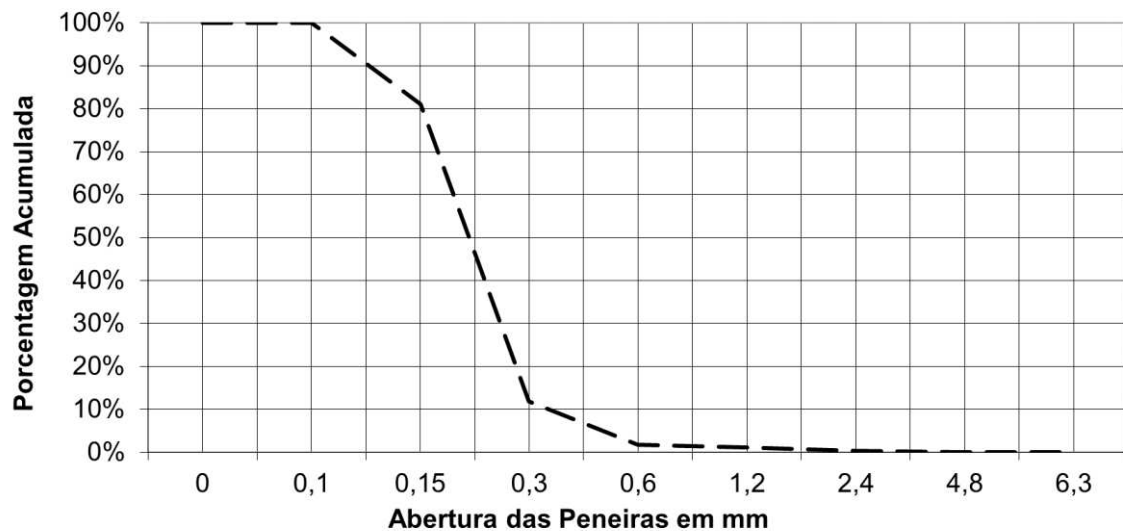
Características físicas	Teores	Características Químicas	Teores (%)
Umidade (%)	2	SiO <sub>2</sub>	88,43
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,22	Na <sub>2</sub> O	2,786
Densidade aparente	0,375	K <sub>2</sub> O	0,658
pH	10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,316
Área específica B.E.T (m <sup>2</sup> /kg)	20.000	CaO	0,286
Estado físico	Sólido	MgO	0,122
Diâmetro médio (µm)	0,4	TiO <sub>2</sub>	0,091
Perda ao fogo (%)	6	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,015

Fonte: Down Corning

### 3.2.4 Agregado miúdo

O agregado miúdo empregado nesta pesquisa para produção da matriz, foi a areia natural de origem quartzosa isenta de material orgânico. A Figura 25 apresenta a composição granulométrica do agregado utilizado e a Tabela 6 apresenta as propriedades físicas.

Figura 25 – Análise granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Elaborada pelo autor



Tabela 6 – Propriedades físicas do agregado miúdo

Propriedade	Valor
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,56
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,50
Índice de volume vazios (%)	41
Módulo de finura	0,96
Dimensão máxima característica (mm)	0,6

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.2.5 Aditivo superplastificante

Utilizou-se o aditivo superplastificante à base de policarboxilato MC-Powerflow 4000, da marca MC-Bauchemie, cujas propriedades são fornecidas pelo fabricante e apresentadas na Tabela 7. O percentual de uso do aditivo foi quantificado sobre a massa de cimento, conforme proporções necessárias para atingir o espalhamento de 600 mm, valor compatível ao preenchimento da matriz na forma e cobrimento do reforço.

Tabela 7 – Propriedades do aditivo superplastificante

Característica	Valor
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,12
Estado	Líquido
Cor	Marrom

Fonte: MC-Bauchemie

## 3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental deste trabalho tem suas etapas apresentadas nos itens que seguem.

### 3.3.1 Composição da matriz

As composições dos materiais para a produção das matrizes seguiram as recomendações apresentadas na revisão bibliográfica.

Neste estudo, se restringiu a um tipo de matriz, cuja proporção dos materiais seguiu o empregado por Ortolan, Mancio e Tutikian (2016), os quais empregaram misturas com substituições parciais do cimento, em massa, em até 10% de sílica ativa. Para esta proporção de substituição parcial do cimento, os autores obtiveram valores de pH aos 91 dias de 12,62 e concentração de 14,222 mMol/l de hidróxido de cálcio.

Foi adotado este traço com a intenção de reduzir o pH, a fim de potencializar a preservação da capacidade mecânica do TRC reforçado com têxtil de vidro AR, visto que valores de pH inferiores a 12,7, foi observado no estudo de Butler, Mechtcherine e Hempel (2010) menor deterioração durante o período de estudo.

A mistura dos materiais empregadas neste trabalho se com substituição parcial do cimento por sílica ativa em massa, as proporções unitárias dos respectivos materiais são apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 – Proporção unitária da matriz

Material	Proporção
Cimento	0,93
Sílica Ativa	0,067
Areia	2,1
Relação a/c	0,4
Aditivo	1,35%

Fonte: Elaborada pelo autor

O emprego de 1,35% de aditivo superplastificante em relação à fração de cimento possibilitou alcançar valores de espalhamento superiores a 600 mm, como demonstra a Figura 26. Sendo o valor apresentado na Figura 26 em 645 mm de espalhamento como resultado do ensaio de espalhamento, conforme procedimento descrito pela norma NBR 15823-2 (ABNT, 2017).

Figura 26 – Espalhamento obtido com a proporção dos materiais empregados



Fonte: Elaborada pelo autor

A produção da matriz utilizado para moldagem dos corpos de prova foi realizada em laboratório, com materiais dosados em massa. Para produção dos painéis e dos corpos de prova para caracterização da matriz, a mistura dos materiais foi realizada em misturador planetário, enquanto, para a produção dos corpos de prova com menores dimensões, utilizou-se misturador de eixo horizontal.

Após moldagem, os corpos de prova de matriz foram desformados 24 horas e logo após armazenadas em sala de cura a uma temperatura de  $23 \pm 2$  °C e umidade relativa do ar de 99%, conforme indica a NBR 5738 (ABNT, 2018), até o momento do ensaio.

Os corpos de prova para os ensaios de resistência à tração e flexão do TRC, a desforma se deu após 48 horas e encaminhadas ao armazenamento em sala de cura conforme indica a NBR 5738 (ABNT, 2018).

### 3.3.2 Etapa 1– Caracterização dos materiais

#### 3.3.2.1 Caracterização da matriz

A matriz cimentícia foi caracterizada no estado endurecido, quanto a resistência à compressão axial e ao módulo de elasticidade, nas idades de 7, 28 e 91 dias de cura. Para tanto, foram moldados 24 corpos de prova cilíndricos com diâmetro 50 mm e altura de 100 mm.

Para determinação da resistência à compressão, seguiu-se o procedimento descrito na NBR 7215 (ABNT, 2019) e utilizou-se de 3 corpos de prova por idade de ensaio.

O comportamento mecânico do módulo de elasticidade foi obtido nas referidas idades, seguindo o procedimento de ensaio descrito na NBR 8522 (ABNT, 2017), conforme metodologia A de ensaio, onde a tensão limite inferior de compressão é fixada em 0,5 MPa. Para tal, contou-se com 5 corpos de prova cilíndricos por idade. As dimensões dos corpos de prova adotados neste estudo seguiram a recomendação de Brockmann (2007).

Ambas as caracterizações mecânicas foram realizadas no laboratório de segurança estrutural do Instituto Itt Performance, na Unisinos, contou-se com o equipamento eletromecânico prensa com dispositivo servo-hidráulico da marca Emic/Instron com capacidade de carga de 2000 kN.

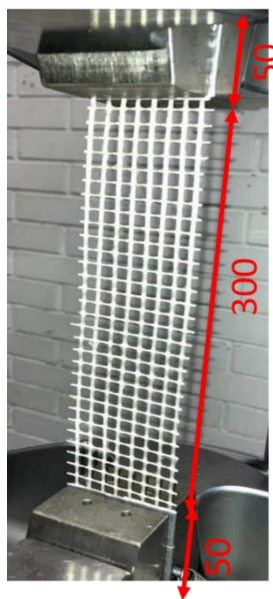
### 3.3.2.2 Caracterização do têxtil

Para alcançar um dos objetivos desta pesquisa, fez-se necessário caracterizar os têxteis empregados quanto seus comportamentos mecânicos e quanto suas geometrias, para ambas as direções, urdidura e a trama.

Para caracterização da resistência à tração dos têxteis, utilizou-se o procedimento de ensaio descrito na NBR ISO 13934-1 (ABNT, 2016), cujo método descreve o ensaio para determinação da resistência à tração de materiais têxteis.

Para tanto, adotou-se a quantidade de 10 amostras para cada tipo de têxtil, sendo 5 para cada orientação do fio. As dimensões de 50 mm de largura e 400 mm de comprimento, sendo necessário para fixação do corpo de prova nas garras do equipamento de ensaio o comprimento de 50 mm. Permitindo o comprimento de 300 mm entre as garras de fixação (RAMPINI et al., 2019). O ensaio consiste em aplicar o esforço de tração a uma taxa de deslocamento de 100 mm/min. A Figura 27 apresenta as dimensões do corpo prova fixação junto ao equipamento de ensaio. O ensaio foi conduzido em máquina universal de ensaios da marca MTS Landmark, localizada no laboratório de ensaios mecânicos, na Unisinos e o deslocamento foi determinado pelo próprio equipamento de ensaio.

Figura 27 – Amostra de tecido no ensaio de tração



Fonte: Elaborada pelo autor

A determinação da resistência à tração dos fios isolados foi realizado por procedimento recomendado por Williams Portal et al. (2016), o qual caracterizou-se a resistência e a deformação em ambas os sentidos, tanto na trama como na urdidura.

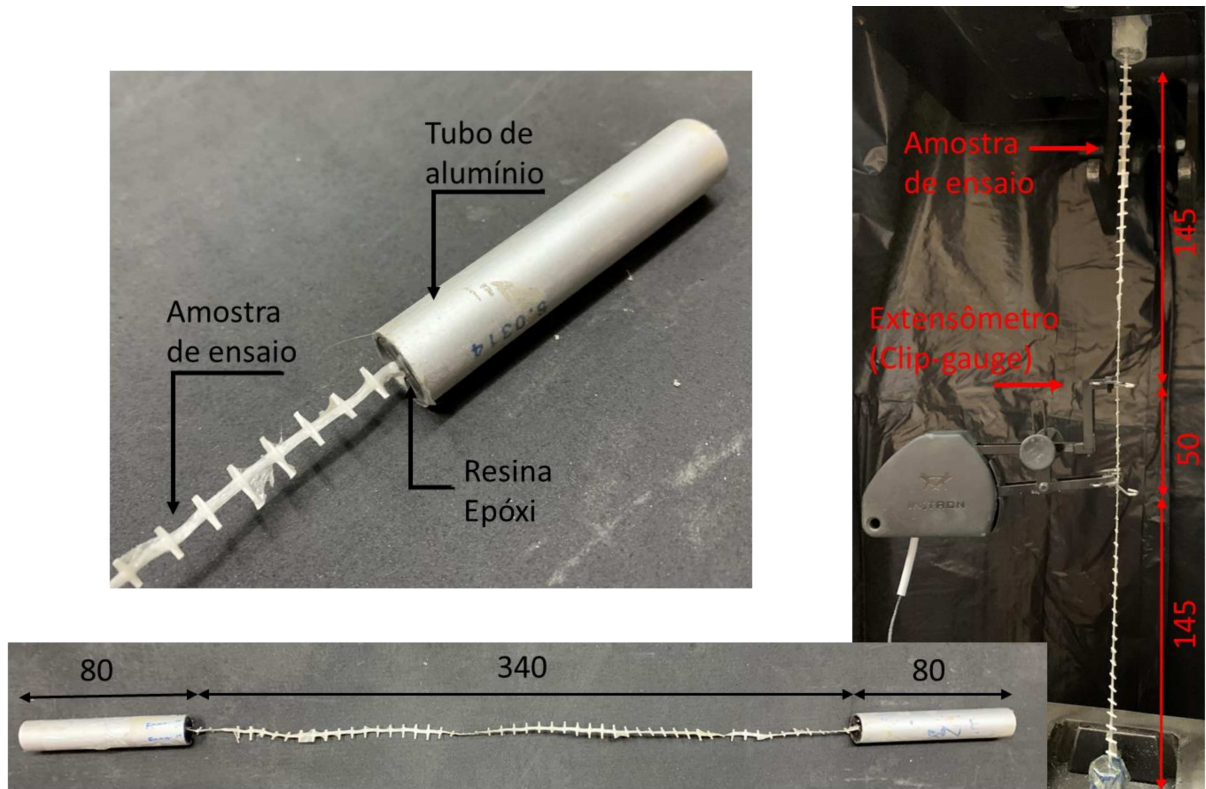
Para isto, foram amostrados 5 corpos de prova com as dimensões apresentados na Figura 28, com comprimento total de 500 mm, sendo o comprimento de ancoragem de 80 mm em cada lado da amostra, como recomenda Hawkins et al. (2018). Nestas regiões de ancoragem, foram acoplados elementos metálicos que auxiliam na conexão da amostra ao equipamento de ensaio.

Foram utilizados tubos de alumínio para ancoragem da amostra junto ao equipamento de ensaio, com comprimento de 80 mm, diâmetro externo de 15 mm e interno de 12 mm. O interior dos tubos foi limpo com acetona para posterior preenchimento com resina epóxi.

A taxa de aplicação do carregamento no ensaio foi constante em 1,0% de deformação por minuto e o tempo de ensaio não poderia exceder a 5 minutos (ISO 10406-1, 2015).

A deformação dos corpos de prova foi determinada através de equipamento eletrônico de medição, extensômetro do tipo *clip-gauge*, com abertura inicial de 50 mm, como apresenta a Figura 28.

Figura 28 – Geometria e layout da amostra do ensaio de tração



Fonte: Elaborada pelo autor

O procedimento de ensaio foi realizado em uma prensa universal eletromecânica da marca Emic/Instron, com capacidade de carga de 300kN, localizada no laboratório de segurança estrutural do Instituto itt Performance, na Unisinos.

Com os resultados obtidos no ensaio de tração do fio, foi possível alcançar o módulo de elasticidade e a deformação final. O módulo de elasticidade foi obtido pela Equação 21, sendo os valores da diferença entre cargas e deformação de 20% e 50% da força de ruptura (WILLIAMS PORTAL et al., 2016).

$$E = \frac{\Delta F}{\Delta \varepsilon \times A}$$

Equação 21

Sendo:

$\Delta F$ : diferença entre as forças de tração em 20% e 50% da força máxima (N)

$\Delta \varepsilon$ : é a diferença entre as deformações em  $\Delta F$

A: área da seção transversal da amostra (mm<sup>2</sup>)

A deformação final ( $\varepsilon_u$ ) foi obtida a partir do cálculo apresentado na Equação 22, relacionando com a capacidade de carregamento máxima ( $F_t$ ) antes da ruptura da amostra com o módulo de elasticidade ( $E$ ) e a área a seção transversal ( $A_t$ ).

$$\varepsilon_u = \frac{F_t}{E \times A_t} \quad \text{Equação 22}$$

Para a caracterização geométrica da seção transversal dos fios dos têxteis, foram determinados o perímetro dos fios e o diâmetro dos filamentos. Para isto, contou-se com o auxílio de imagens obtidas com um microscópio óptico digital Zeiss, modelo *Smart Zoom 5*. Estas determinações foram realizadas no instituto itt Fuse, na Unisinos. Em posse das imagens e dimensões obtidas no microscópio, com auxílio do *software* Autocad®, calculou-se o perímetro dos fios.

### **3.3.3 Etapa 2– Caracterização do concreto têxtil**

#### **3.3.3.1 Corpos de prova**

Para a análise de comportamento mecânico dos reforços no interior da matriz cimentícia, tomou-se como distinção diferentes quantidades de camadas de têxtil e direção de posicionamento dos têxteis AR122 e AR192. Para tanto, o Quadro 6 apresenta as distinções das tipologias dos corpos de provas analisados, bem como a nomenclatura adotado para os exemplares ensaiados quanto ao comportamento mecânico à tração direta e flexão.

Destaca-se que as análises mecânicas foram realizadas nas idades de 7 dias, 28 dias e 91 dias de cura das amostras, sendo que, em cada idade, utilizou-se a quantidade de 4 corpos de prova, totalizando 12 exemplares para cada ensaio.

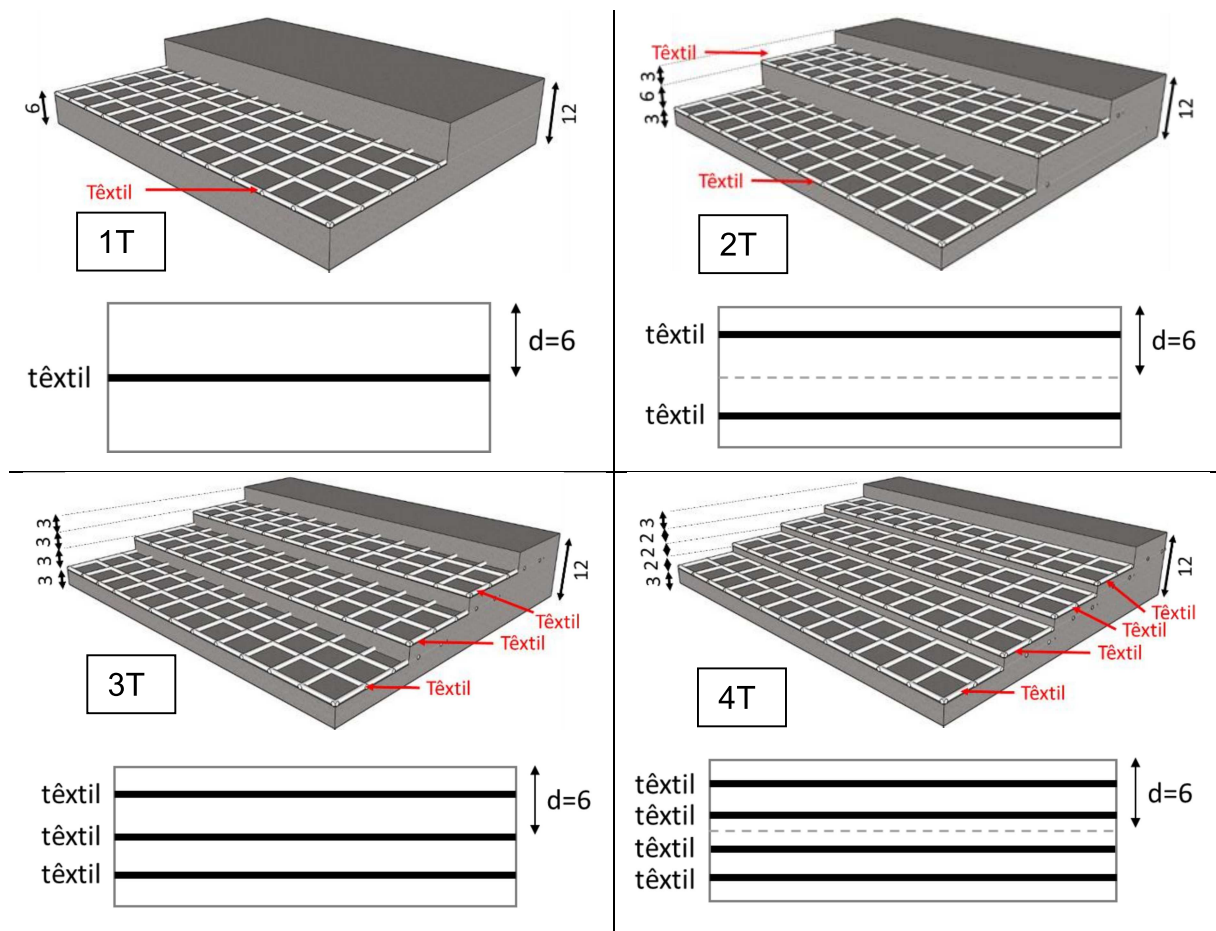
Quadro 6 – Quantidade e distinções dos corpos de prova de resistência à tração direta

Nomenclatura do corpo de prova	Tipo de têxtil	Camadas de têxtil	Direção do têxtil	Quantidade de corpos de prova	Número total de fios (ensaio)
122 1T T	AR 122	1	Trama	12	10 (flexão)
122 1T U			Urdidura	12	6 (tração)
122 2T T		2	Trama	12	20 (flexão)
122 2T U			Urdidura	12	12 (tração)
192 1T T	AR 192	1	Trama	12	15 (flexão)
192 1T U			Urdidura	12	9 (tração)
192 2T T		2	Trama	12	30 (flexão)
192 2T U			Urdidura	12	18 (tração)
192 3T T		3	Trama	4	45 (flexão)
192 3T U			Urdidura	4	27 (tração)
192 4T T		4	Trama	4	60 (flexão)
192 4T U			Urdidura	4	36 (tração)

A quantidade de corpos de prova se enquadra como estabelecido por Schütze, Lorenz e Curbach (2015), sendo a quantidade entre 10 a 20 corpos de prova. As posições e camadas do reforço no interior da matriz são ilustradas na Figura 29.



Figura 29 – Posicionamento das camadas 1T, 2T, 3T e 4T do reforço no interior da matriz, medida em mm



Na tipologia das amostras 1T, há apenas uma camada de tecido posicionada no centro da espessura da matriz, ou seja, com cobertura de 6 mm em ambas as faces, enquanto, na distinção 2T, são duas camadas de reforço, posicionadas próximas às superfícies, mantendo o cobertura de 3 mm, tanto da borda superior quando da inferior, afastadas entre si em 6 mm.

Importante destacar que se definiu a posição do reforço na distinção 1T a fim de manter a mesma distância do centroide do reforço à borda superior dos corpos de prova analisados, assim como as recomendações dos estudos realizados por Colombo et al. (2013), Vlach et al. (2016) e Rampini et al. (2019). A posição 2T seguiu a disposições empregada nos trabalhos por Colombo et al. (2013), Haik; Adiel Sasi; Peled (2017) e Hawkins et al. (2018).

A fim de reproduzir o estudo desenvolvido por Du et al. (2017), com o intuito de extrapolar os resultados e alcançar maior caracterização do comportamento mecânico do compósito, produziu-se amostras para verificação da resistência à tração e flexão

com 3 e 4 camadas de têxtil AR192, respectivamente denominadas como 3T e 4T. Restringiu-se a apenas o têxtil AR192, devido o mesmo apresentar resultados mecânicos superiores ao têxtil AR122.

As descrições dos procedimentos de ensaio de tração direta e flexão, assim como as respectivas geometrias dos corpos de prova, são detalhadas nos itens que seguem.

#### 3.3.3.2 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova ocorreu em camadas de concreto em fôrma metálica estanque, com dimensões compatíveis aos corpos de prova dos ensaios de tração e flexão, respectivamente na Figura 30a e Figura 31a. A disposição da matriz ocorreu em camadas, com quantidade de matriz suficiente para cada espessura de cobertura do têxtil, para isto, utilizou-se réguas metálicas, demonstradas na Figura 30b, Figura 30c, Figura 31b e Figura 31c, para que pudesse garantir o posicionamento do reforço, assim como a espessura da camada de matriz.

Manteve-se, em todos os corpos de prova, a espessura de 3 mm, para o cobertura do reforço com a superfície externa do concreto.

Figura 30 – Fôrma para moldagem dos corpos de prova do ensaio de Tração, (a) fôrma; (b) fôrma com a régua posiciona, (c) detalhe da régua

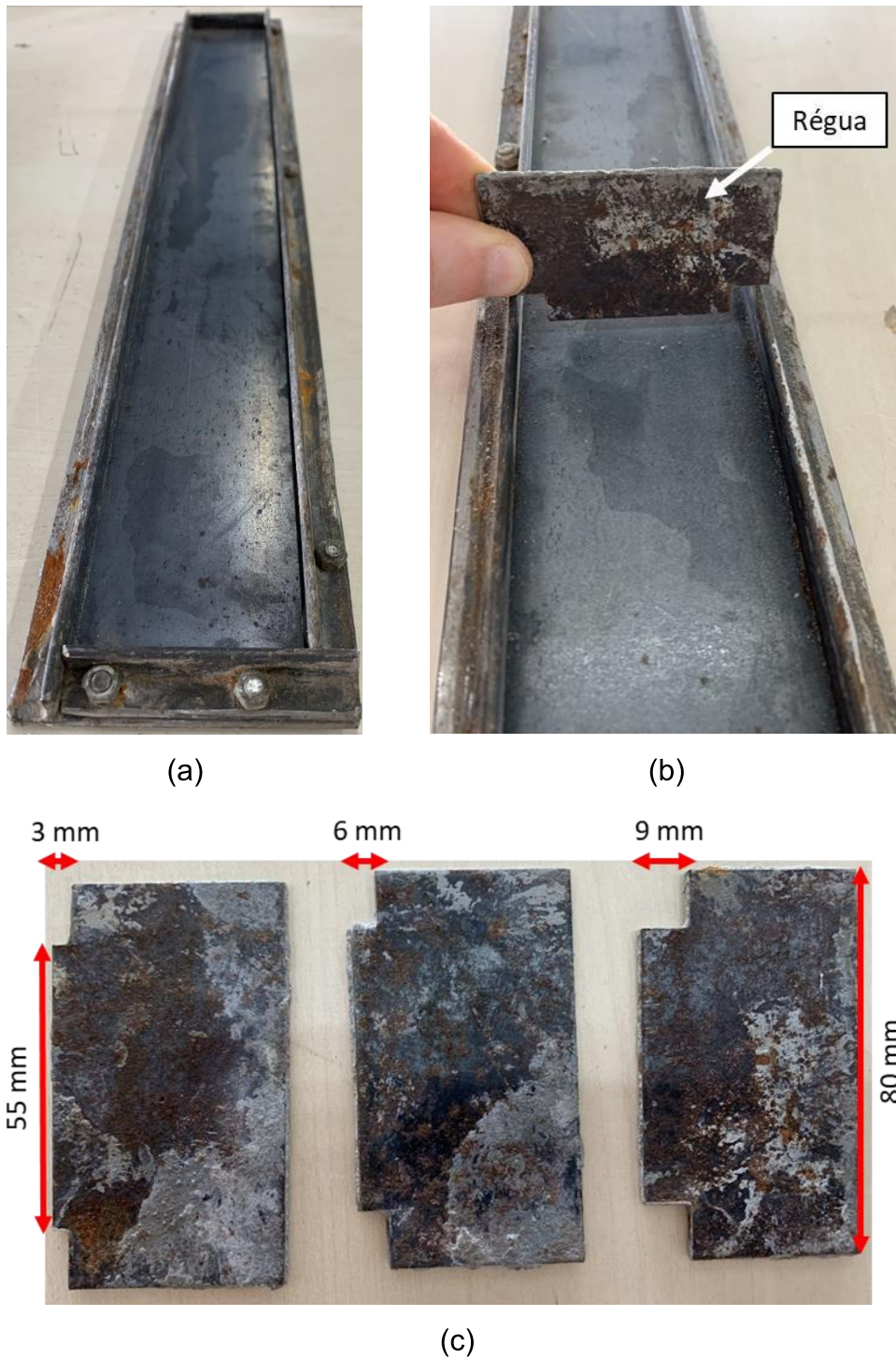
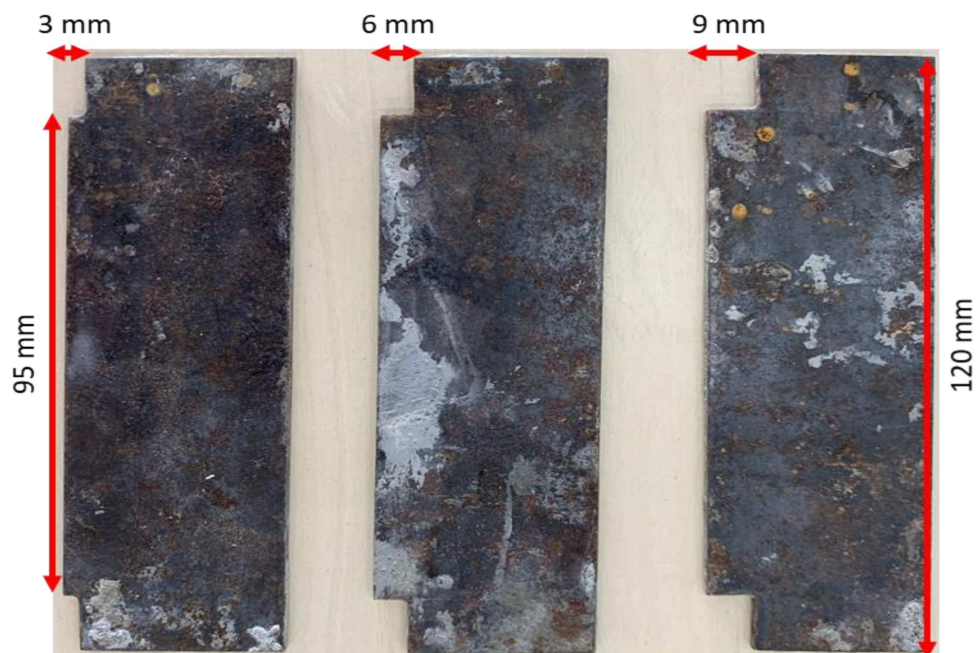


Figura 31 – Fôrma para moldagem dos corpos de prova do ensaio de Flexão, (a) fôrma; (b) fôrma com a régua posiciona, (c) detalhe da régua



(a)

(b)



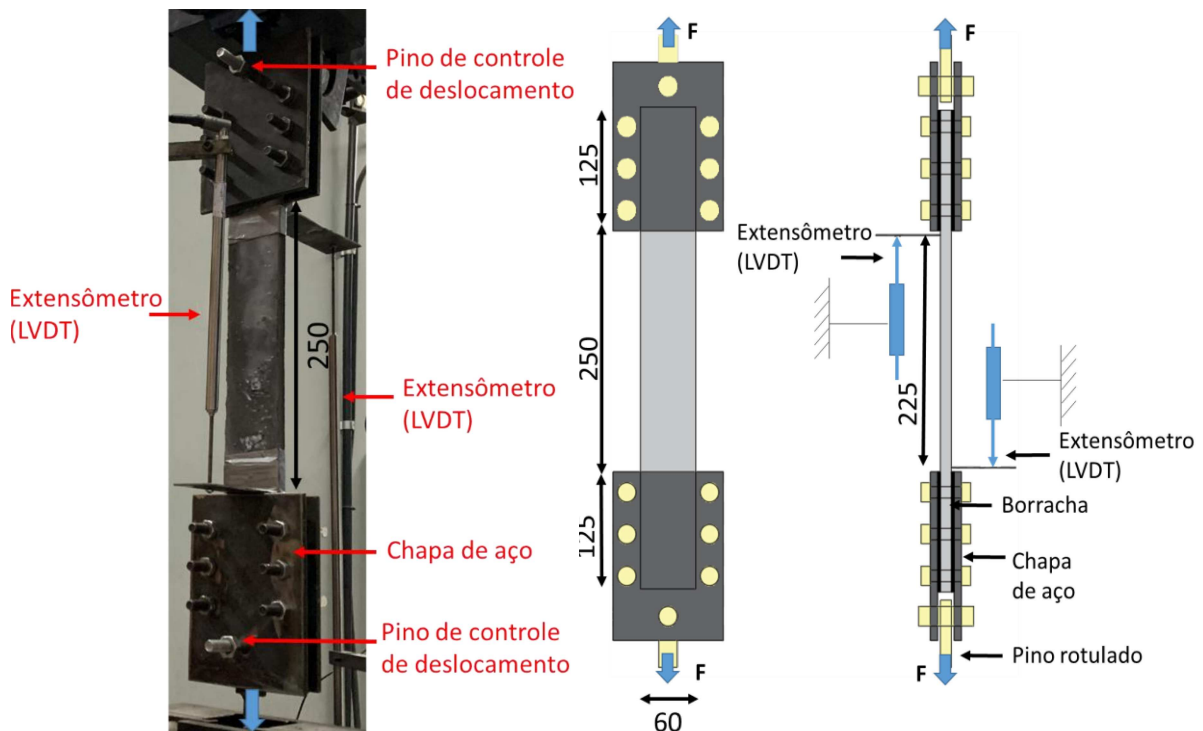
(c)

### 3.3.3.3 Resistência à tração direta

A fim de alcançar os objetivos de analisar o potencial estrutural dos têxteis produzidos no Brasil, analisou-se o comportamento em conjunto da matriz cimentícia reforçada com as fibras de vidro AR.

Para a determinação da resistência à tração direta seguiu-se a recomendação RILEM TC 232-TDT: *test methods and design of textile reinforced concrete* (RILEM, 2016). Os exemplares de ensaio possuem as dimensões de 500 mm de comprimento, largura de 60 mm e espessura de 12 mm. A Figura 32 apresenta a geometria do corpo de prova, assim como o esquema de ensaio e o aparato utilizada para acoplar o corpo de prova no equipamento de ensaio.

Figura 32 – Configuração do ensaio de tração direta, unidade em mm



Cada extremidade da amostra, no comprimento de 125 mm, foi fixada no aparato de ensaio, permitindo o comprimento livre de 250 mm. Utilizou-se placas de fixação em aço para aplicação da carga, com borracha, de espessura de 5 mm, na superfície em contato com a amostra para melhor prender o corpo de prova e minimizar a pressão lateral gerada pela placa de aço (SCHÜTZE; LORENZ; CURBACH, 2015). A pressão lateral exercida pelas placas foi gerada pelo aperto dos seis parafusos em cada extremidade, no entanto, o nível de pressão não foi padrão em cada corpo de prova, visto que, não foi quantificado o torque em cada parafuso.

O carregamento do corpo de prova foi aplicado nos pinos rotulados de cada chapa metálica, fixado na máquina de ensaio pela pressão gerada pelas garras

pneumáticas. Em conformidade com a recomendação de Kong et al. (2017), o procedimento de ensaio seguiu a taxa de carregamento de 1 mm/min até a ruptura do corpo de prova.

Os ensaios foram conduzidos no laboratório de segurança estrutural do Instituto Itt Performance, na Unisinos, contou-se com o equipamento eletromecânico prensa com dispositivo servo-hidráulico da marca Emic/Instron com capacidade de carga 300 kN.

A deformação específica longitudinal de cada amostra foi determinada pela divisão da diferença nas leituras de dois dispositivos LVDT (*Linear Variable Differential Transformer* ou Transformador Diferencial Variável Linear), com capacidade leitura de 250 mm, fixados um em cada lado da amostra, pela distância de 225 mm. A adoção pela fixação e posição dos LVDT nas amostras se deu por limitação de equipamento.

Nestas amostras, foram analisadas a influência da quantidade de camadas de reforço no interior da matriz, além da direção do reforço, obtendo como resposta a localização das fissuras, a resistência à tração direta necessária para formar a primeira fissura e a resistência máxima, bem como as respectivas deformações, logo, foi possível organizar os resultados em curvas da tensão *versus* deformação.

Importante destacar que a tensão foi calculada por duas formas, como indica Schütze, Lorenz e Curbach (2015): pela área da matriz, sendo a tensão de tração do compósito ( $\sigma_{cu}$ ); e pela área do reforço, sendo a tensão de tração do reforço ( $\sigma_{tu}$ ).

Quanto a determinação das deformações, estas não foram medidas diretamente, uma vez que a extensão pode incluir qualquer deformação das placas de fixação e das inserções de borracha, sendo assim, foi necessário retirar qualquer espúrio ou ruído na deformação que possa surgir ao longo dos ensaios.

Como registrado por Contamine; Si Larbi; Hamelin (2011) e Contamine, Junes e Si Larbi (2014), pode ocorrer fissura próximo à placa de fixação da amostra, desenvolvendo divergências na efetividade da medição da deformação do corpo de prova, visto que a fissura está fora da zona de medição.

E caso a ruptura do corpo de prova ocorra fora do comprimento de medição, o ensaio não pode ser considerado válido para a determinação da deformação (RILEM, 2016).

### 3.3.3.4 Resistência à tração na flexão

Os ensaios de resistência à flexão foram conduzidos em corpos de prova com dimensões recomendadas por Vlach et al. (2018), sendo 100 mm de largura, 360 mm de comprimento e 12 mm de espessura.

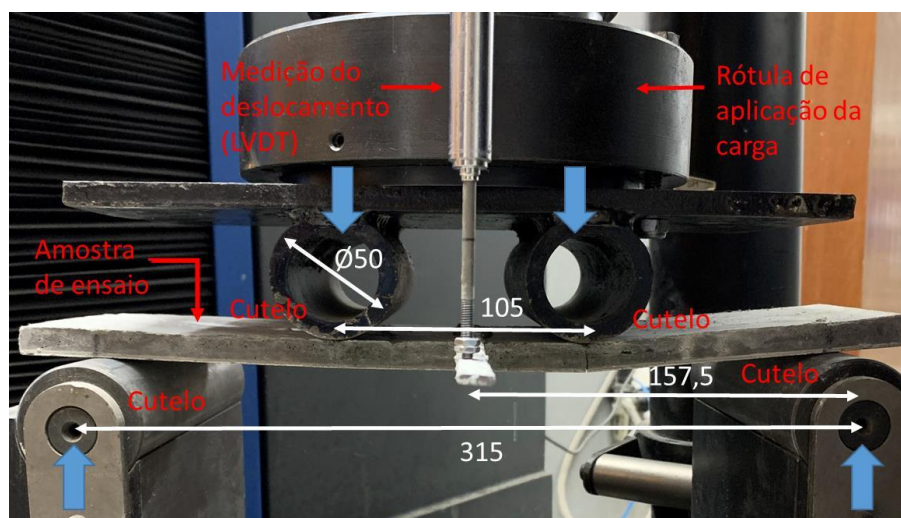
O procedimento de ensaio foi realizado no laboratório de segurança estrutural do instituto itt Performance, na Unisinos, no equipamento eletromecânico prensa com dispositivo servo-hidráulico da marca Emic/Instron, com capacidade de carga 300 kN.

O ensaio foi realizado pelo método dos 4 pontos, como sugerido por Vlach et al. (2018) e Hawkins et al. (2018), com procedimento especificado pela ASTM C947-3:2016, com taxa de carregamento controlada de 2,0 mm/min, sendo o deslocamento do equipamento e não da amostra.

O deslocamento da amostra foi registrado com auxílio de um dispositivo do tipo LVDT com capacidade de 250 mm, posicionado perpendicularmente a amostra e fixado no centro do corpo de prova, determinando assim o deslocamento transversal do exemplar.

Neste procedimento, registraram-se as cargas suficientes para desenvolver à flexão dos corpos de prova e deslocamento até sua ruptura, assim como a carga suficiente para gerar a primeira fissura e o valor do deslocamento neste instante de carregamento. A Figura 33 apresenta o esquema da configuração do ensaio de flexão.

Figura 33 – Configuração do ensaio de flexão, unidades em mm



A configuração do ensaio consiste em apoiar a amostra em dois cutelos, com diâmetros de 50 mm, afastados em um vão de 315 mm e aplicar o carregamento através de outros dois cutelos, com o mesmo diâmetro, posicionados na parte superior no terço médio central do corpo de prova, distantes 105 mm entre si, fixados em uma rótula.

### 3.3.3.5 Análise visual dos fios após ruptura

Para a avaliação da configuração de ruptura dos fios, após o ensaio de tração, empregou-se um microscópio SMZ-168, da marca Motic, com ampliação de até 50x, localizado no laboratório itt Performance, da UNISINOS.

### 3.3.4 Etapa 3 – Caracterização do painel

Em posse dos parâmetros de dimensionamento analíticos obtidos na etapa 2, produziu-se painéis com dimensões de 500 mm de largura e 1000 mm de comprimento, com espessura de 30 e 20 mm. As amostras analisadas ao comportamento à flexão são dispostas no Quadro 7.

Quadro 7 – Quantidade e distinções dos corpos de prova de resistência à tração direta

Nomenclatura do corpo de prova	Camadas de tecido	Direção do reforço	Espessura do corpo de prova (mm)	Número de fios por camada
2T T 20	2 camadas	Trama	20	75
2T U 20	2 camadas	Urdidura	20	
3T T 20	3 camadas	Trama	20	
2T T 30	2 camadas	Trama	30	

Como o têxtil AR192 apresentou melhor resultado como reforça na matriz cimentícia em relação ao tecido AR122, adotou-se por analisar e caracterizar painéis reforçados apenas com o tecido AR192.

Como estabelecido por Peled (2018) e Gries et al., (2006), o módulo de elasticidade do fio, para inserção como reforço à matriz cimentícia, deve possuir valor superior ao módulo de elasticidade da matriz. Logo, como o módulo de elasticidade



verificado no ensaio de tração direta para o fio AR192 no sentido da urdidura apresentou valor ligeiramente superior ao da matriz cimentícia, o seu uso como reforço não foi considerado no estudo.

Entretanto, por motivos de caracterização e comparação das resistências à flexão para ambas as direções do tecido AR192, adotou-se duas camadas como exemplares de comparação.

O estudo dirigido aos painéis, além de determinar de modo comparativo a resistência à flexão entre as camadas de reforço e a espessura da matriz, possibilitou validar os parâmetros adotados no modelo teórico de dimensionamento do painel.

A definição das espessuras analisadas, foi com base nos estudos realizados por Hegger, Schneider e Kulas (2010), Rempel e Hegger (2015), Mueller et al. (2016) Hegger et al. (2017) e Valeri et al. (2020), que respectivamente estabeleceram em seus estudo do comportamento à flexão em painéis com espessura 20, 30, 45 e 60 mm.

Além do mais, um dos usos indicados do TRC é em painéis isolantes do tipo sanduíche, sendo composto por duas placas de TRC com núcleo em material isolante, nos realizados por Vervloet et al. (2020), Bui Thi Thanh et al. (2020) e Colombo, Colombo e Di Prisco (2019), os autores analisaram a potencial inserção de painéis de TRC nas respectivas espessuras, 22, 15 e 12 mm.

Em virtude de os modelos analíticos de dimensionamento utilizados adotarem como um dos parâmetros a distância do banzo comprimido até a centroide do reforço à tração, procurou-se posicionar as camadas de reforço em situação máxima de afastamento do banzo comprimido, mantendo 3 mm de cobrimento da superfície externa e entre camadas.

O posicionamento do reforço junto à face mais tracionada e mantendo o espaçamento entre camadas de 3 mm pode garantir um aumento da carga de flexão final (SCHUMANN et al., 2018).

Os detalhes do posicionamento do reforço para as amostras com espessura de 20 mm são ilustrados na Figura 34. Na Figura 35 é apresentada a posição das camadas de reforço para os exemplares com espessura de 30 mm.

Figura 34 – Posicionamento das camadas do reforço no interior da matriz para os painéis com 20 mm de espessura (a) duas camadas 2T, (b) três camadas 3T

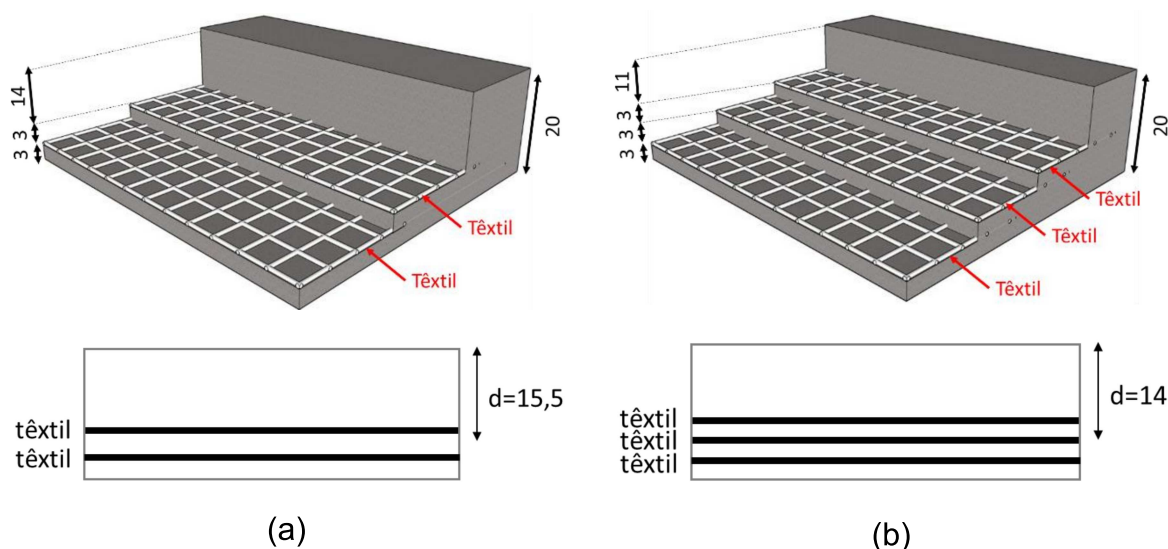
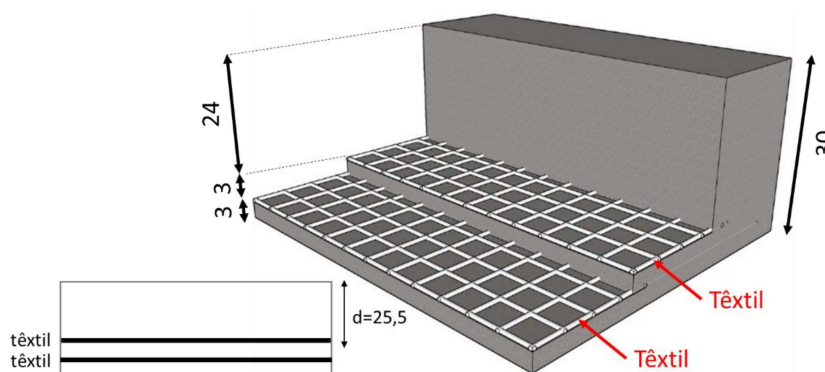


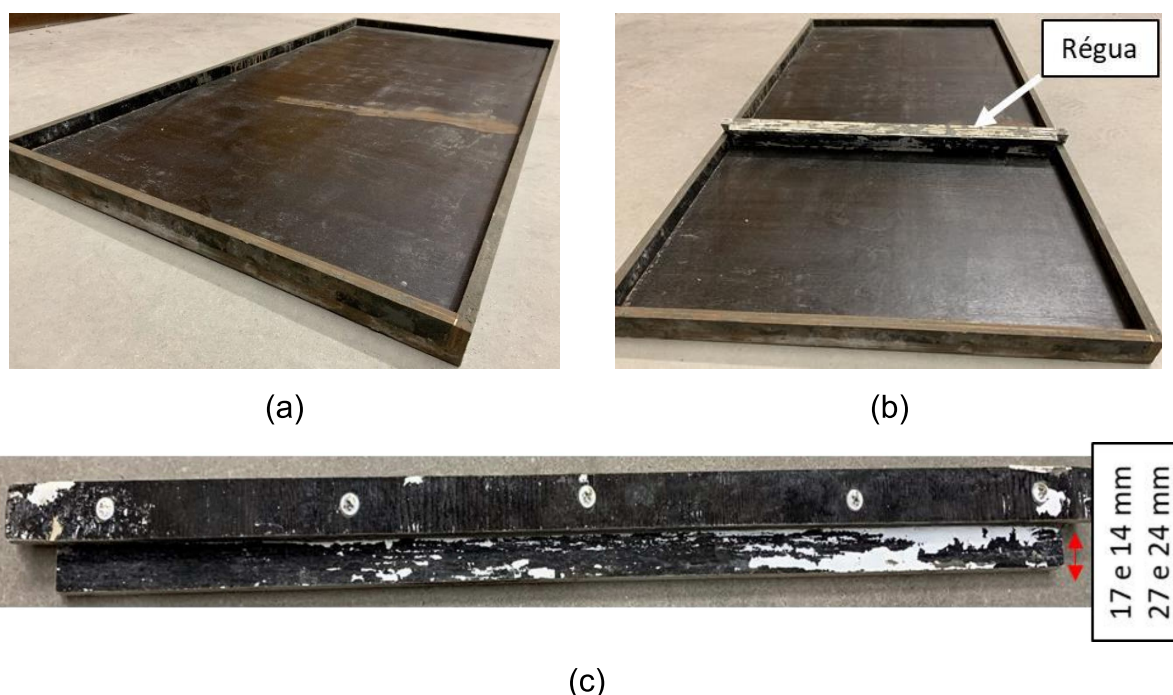
Figura 35 – Posicionamento das camadas 2T do reforço no interior da matriz com 30 mm (2T T 30)



Para a análise dos parâmetros e processos de dimensionamento, foram moldados dois corpos da prova para cada tipo de análise, mantendo as características da matriz utilizada na etapa 2.

A moldagem dos corpos de prova se deu em camadas, com quantidade de concreto suficiente para ocupar as espessuras de cobertura de cada reforço. As fôrmas utilizadas foram de madeira compensada resinada, compatíveis com as dimensões dos corpos de prova, como demonstra a Figura 36a, totalmente estanque. Para garantir o posicionamento do têxtil no interior da matriz e limitar a espessura das camadas de concreto, além de auxiliar no adensamento do concreto, contou-se com o auxílio de réguas com espessuras variáveis, conforme posição do reforço, como expõem a Figura 36b e Figura 36c.

Figura 36 – Fôrma para moldagem dos painéis, (a) fôrma; (b) fôrma com a régua posicionada, (c) detalhe da régua



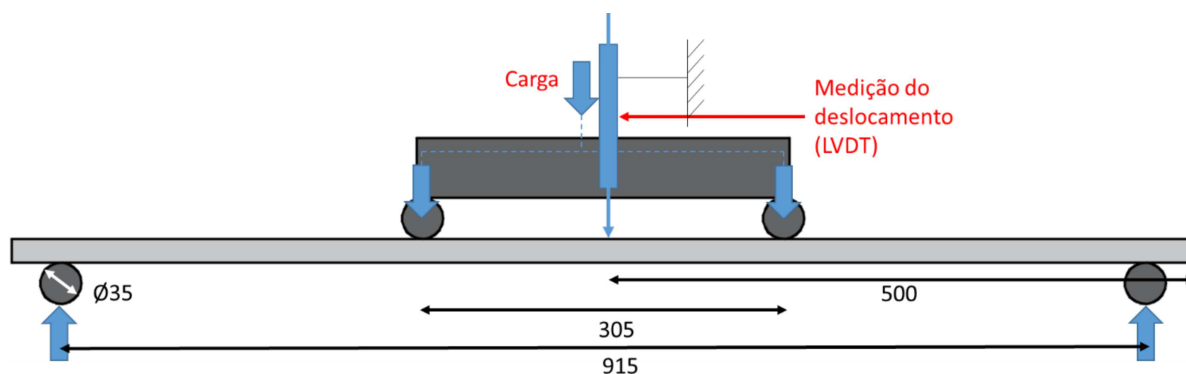
A avaliação experimental à flexão ocorreu na idade de 28 dias de cura da matriz, e foi conduzido no laboratório de segurança estrutural do instituto itt Performance, na Unisinos, no equipamento eletromecânico prensa com dispositivo servo-hidráulico da marca Emic/Instron, com capacidade de carga 300 kN.

O ensaio foi realizado pelo método dos 4 pontos, conforme procedimento especificado pela norma ASTM C947-3:2016, com taxa de carregamento controlada de 2,0 mm/min, o avanço do ensaio ocorreu com deslocamento do equipamento e não da amostra. Contudo, entende-se que não há expressivas variações entre os deslocamentos do equipamento para com o da amostra que pudesse comprometer a realização do ensaio.

O deslocamento do corpo de prova foi registrado com auxílio de um dispositivo do tipo LVDT com capacidade de 200, posicionado perpendicularmente à amostra e fixado no centro do exemplar ensaiado, determinando o deslocamento transversal.

A configuração do ensaio de flexão nos painéis é detalhada na Figura 37, o qual consiste no apoio do corpo de prova em dois cutelos com diâmetro de 35 mm, afastados 915 mm entre si. A carga de ensaio foi aplicada no terço médio através de dois cutelos, de mesmo diâmetro, distantes entre si em 305mm, posicionados na face superior da amostra de ensaio.

Figura 37 – Configuração do ensaio de flexão dos painéis, medidas em mm.



Ao fim desta etapa, foi possível comparar os resultados encontrados nos modelos de dimensionamento analíticos I e II, com os encontrados nas análises experimentais desta etapa.

### 3.3.5 Etapa 4 - Análises dos parâmetros de dimensionamento

Com as caracterizações dos materiais isolados obtidas na etapa 1 e com os resultados das resistências à tração e flexão do TRC de menor escala, alcançados na etapa 2, juntamente com os resultados do comportamento à flexão dos painéis realizados na etapa 3, foi possível obter informações e parâmetros para dimensionamento do concreto têxtil, seguindo os modelos analíticos I e II.

Os modelos considerados neste estudo resultam em valores potenciais teóricos de momento fletor máximo passíveis de serem obtidos no concreto têxtil.

Tendo em visto que o modelo I considera parâmetros de resistência à tração direta para fio isolado e do TRC, com os valores determinados nos ensaios realizados nas etapas 1 e 2, este modelo de dimensionamento foi possível de ser adotado.

Em posse dos resultados da tensão de tração do concreto têxtil e do fio, foi possível encontrar o coeficiente de eficiência  $k_1$ , valor que relaciona a redução no desempenho do fio quando em situação de reforço na matriz cimentícia. Este fator de eficiência é um parâmetro necessário para determinação do momento fletor máximo teórico, conforme modelo I de dimensionamento analítico, apresentado no item 2.6.1.

Como o modelo II relaciona os valores de resistência dos materiais e deformação dos materiais isolados e do compósito reforçado com o têxtil, e com as informações obtidas nas etapas 1 e 2, foi possível a adoção deste procedimento de dimensionamento.

Em propriedade das informações oriundas do ensaio de tração direta do fio e compressão do concreto, tais como as respectivas características de deformação e carga, assim como os produtos do ensaio de flexão do TRC, foi possível a aplicação do modelo II de dimensionamento analítico, apresentado no item 2.6.1, para determinação do momento fletor máximo teórico.

Para validação dos resultados de momento fletor teóricos obtidos como resultados do modelo II, relacionou-se estes valores com o momento fletor último encontrado nos ensaios de flexão, sendo possível determinar o fator de eficiência FPI.

Por fim, a fim de validar os resultados e os parâmetros adotados nos modelos teóricos de dimensionamento, os resultados experimentais à flexão do painel, obtidos na etapa 3, forma relacionados com os resultados teóricos.

Tento em vista que os modelos teóricos resultam no momento fletor máximo, logo, utilizou-se a Equação 23 para determinar a força máxima teórica e relacionar os resultados experimentais da força máxima obtidos nos ensaios com os teóricos.

$$F_{max} = \frac{6M_n}{l} \quad \text{Equação 23}$$

Sendo:

$M_n$  = Momento fletor último

$l$  = distância entre apoios, 915 mm para os corpos de prova de painel e 315 mm para os corpos de prova de menor escala.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados e as análises de cada tipologia de amostra estudada neste trabalho. São apresentados os resultados isolados da matriz e do reforço, após os resultados da inserção do reforço na matriz.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MATRIZ

Os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade da matriz cimentícia, conforme as idades de estudo. Na Tabela 8 são apresentados os valores individuais da resistência à compressão dos dois corpos de prova de cada idade, assim como o valor potencial considerado no estudo.

Tabela 8 – Resultados de resistência à compressão conforme idade de cura

7 dias		28 dias		91 dias	
Individual (MPa)	Potencial (MPa)	Individual (MPa)	Potencial (MPa)	Individual (MPa)	Potencial (MPa)
50,5	50,5	60,3	60,3	64,4	68,2
49,8		56,6		68,2	

Observou-se o avanço da resistência conforme evolução da hidratação dos compósitos e que a idade de 91 dias apresentou o maior valor.

Como os resultados potenciais da resistência à compressão do concreto aos 28 dias e 91 dias foram, respectivamente, de 60,3 MPa e 68,2 Mpa. De acordo com Hawkins et al. (2018) e Kamani et al. (2019), a matriz cimentícia apresentou resistência adequada para uso como concreto têxtil.

Já aos 7 dias de cura do concreto o valor potencial de 50,5 Mpa, também foi considerado adequado para uso como matriz de concreto têxtil, pois o mesmo alcançou valor superior as 47,2 MPa utilizado por Hawkins et al. (2018).

Os valores de módulo de elasticidade obtidos para os corpos de prova, bem como os valores potenciais, são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados de módulo de elasticidade conforme idade de cura

7 dias		28 dias		91 dias	
Individual (GPa)	Potencial (GPa)	Individual (GPa)	Potencial (GPa)	Individual (GPa)	Potencial (GPa)
29,0		31,5		32,3	
27,4	30,2	31,5	33,4	31,5	32,2
30,2		33,4		31,5	

O resultado aos 28 dias de cura atingiu o valor potencial do módulo de elasticidade, sendo maior em relação às demais idades analisadas. Nessa idade, o módulo de elasticidade potencial foi de 33,4 GPa, resultado que corrobora com os valores adotados por Silva e Silva (2020) e Valeri, Fernández Ruiz e Muttoni (2020). A pequena queda que ocorreu para os 91 dias pode ter sido consequência de alguma variação de ensaio.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO TÊXTIL

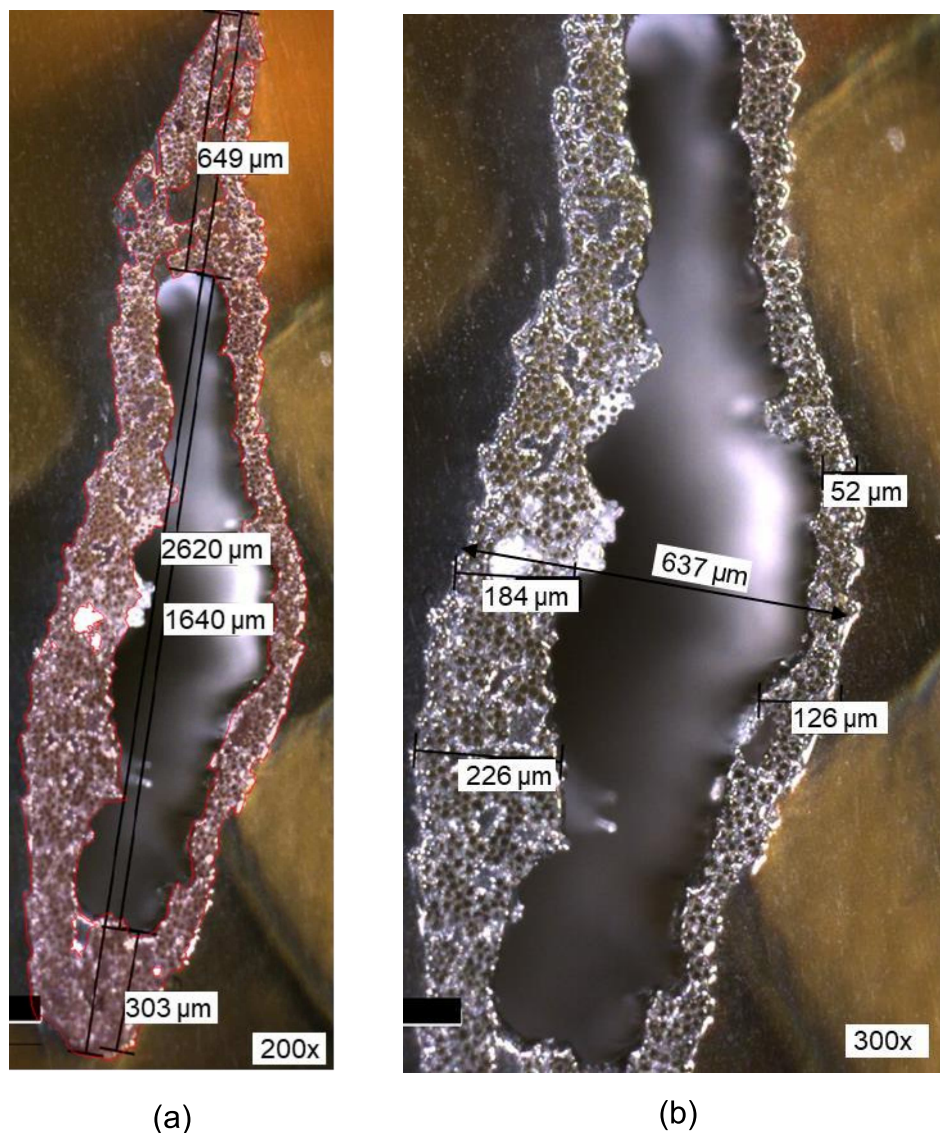
Os resultados da caracterização do reforço têxtil, tanto do comportamento mecânico quanto da geometria, são apresentados nos itens seguintes.

### 4.2.1 Têxtil AR 122

#### 4.2.1.1 Caracterização geométrica

Os resultados da caracterização geométrica da seção transversal dos fios do têxtil AR122 nas direções da trama e urdidura, obtidos por imagens microscópicas são apresentados a seguir. A Figura 38 expõe as imagens com magnificação de 200x e 300x o fio na direção da trama, bem como as cotas das dimensões longitudinal e transversal.

Figura 38 – Seção transversal do fio na direção da trama do têxtil AR122, (a) cotas longitudinais e (b) cotas transversais



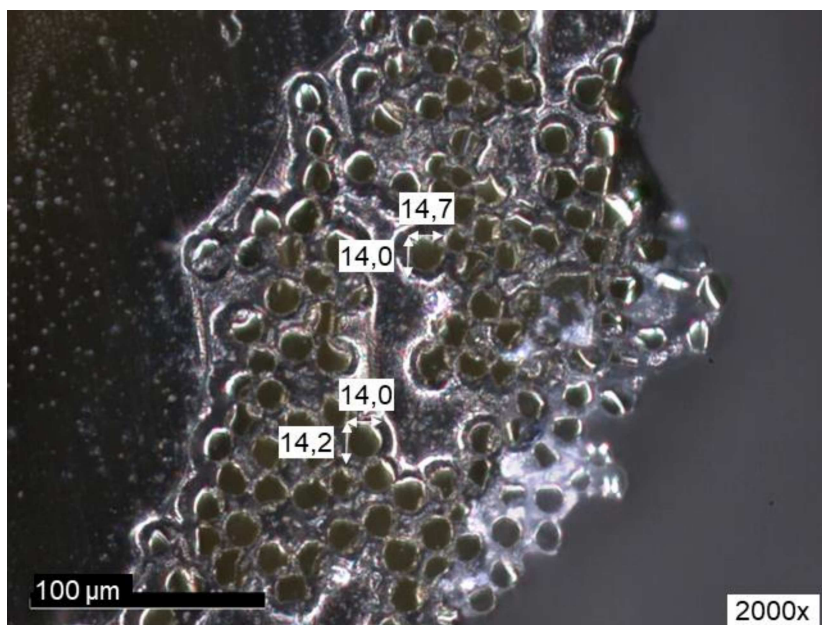
Foram observadas a geometria da trama que pode ser relacionada a forma elíptica, pois as dimensões obtidas foram, 2620  $\mu\text{m}$  no sentido do comprimento e largura de 637  $\mu\text{m}$ , sendo o comprimento 4,11 vezes maior que a largura. É destaque ainda, uma região vazia no interior do fio sem filamentos, formada na produção do têxtil.

Como exposto na marcação em vermelho apresentada na Figura 38a, com o auxílio do software *Autocad*®, foi quantificado o perímetro externo de 6,176 mm.

A Figura 39 expõe com magnificação de 2000x, os filamentos na orientação da trama, assim como as cotas do diâmetro.



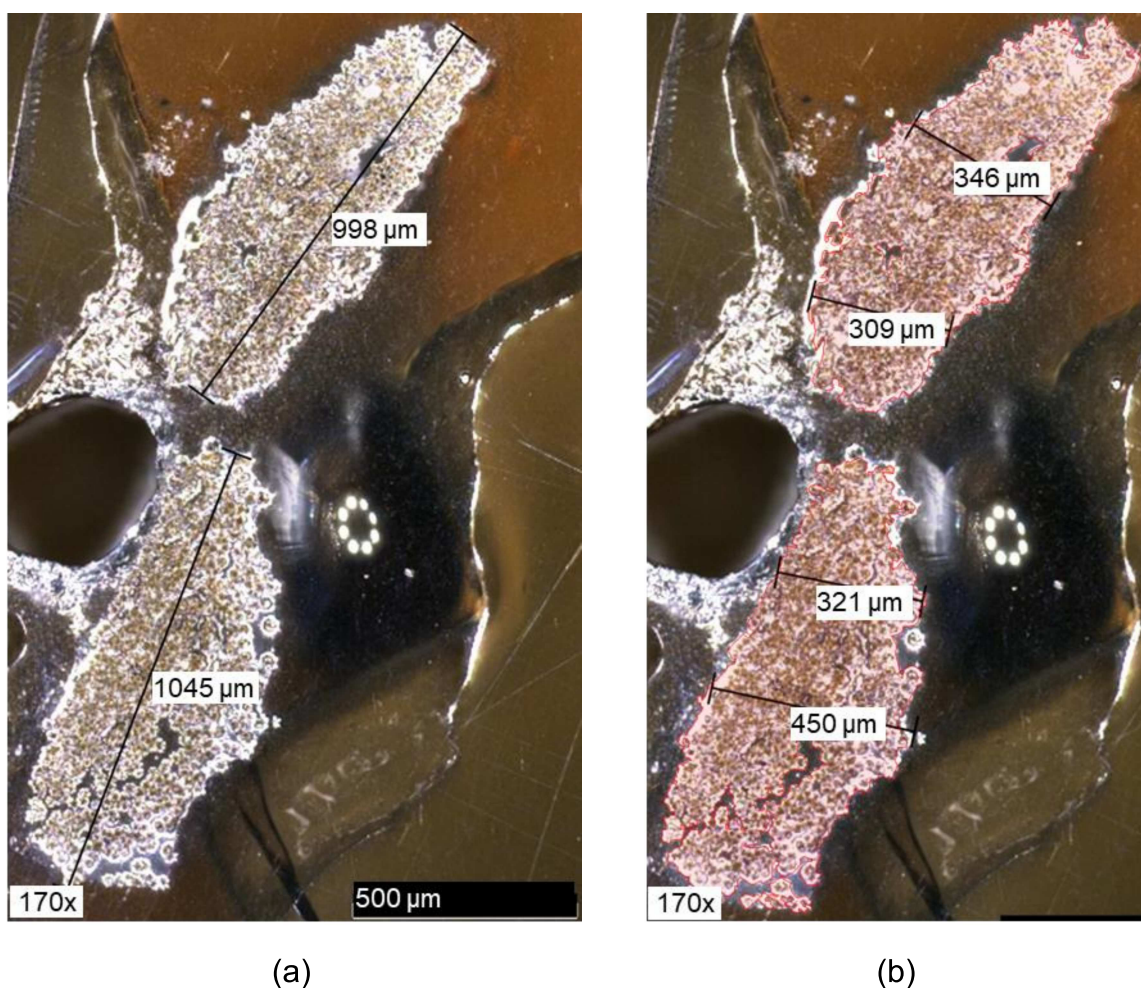
Figura 39 – Visualização e dimensões dos filamentos da trama, unidade em  $\mu\text{m}$



Na direção da trama, os filamentos possuem diâmetro médio de 14,2  $\mu\text{m}$ . O que segundo recomendação de Rempel e Hegger (2015), o diâmetro do filamento de vidro AR deve possuir diâmetro 14  $\mu\text{m}$ , logo, o material analisado atende o recomendado.

Com ampliação de 170x, a Figura 40 expõe a seção transversal do fio na direção da urdidura, e demonstra ainda as dimensões longitudinais e transversais.

Figura 40 – Seção transversal do fio na direção da urdidura do têxtil AR122, (a) cotas longitudinais e (b) cotas transversais



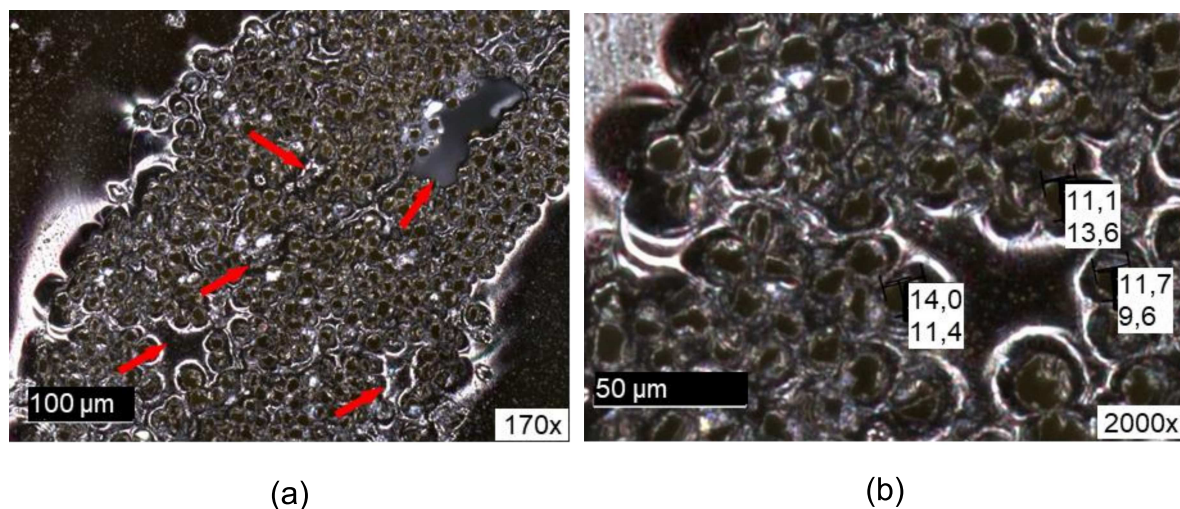
Como os fios da urdidura são torcidos cruzando o fio da trama, nesta direção foi constatado dois agrupamentos de filamentos com comprimentos médios de 1045  $\mu\text{m}$  e 998  $\mu\text{m}$  (Figura 40a) e largura (Figura 40b) média individual é de 385,5  $\mu\text{m}$  e 327,5  $\mu\text{m}$ .

Como o comprimento é 2,7 vezes e 3,04 vezes maior que a largura, respectivamente, o que pôde ser caracterizado de modo análogo a geometria mais esférica quando comparado com a direção da trama.

O perímetro quantificado com auxílio do software *Autocad*® para cada fio foi de 4,811 mm e 3,978 mm.

Como verificado na direção da trama, na direção da urdidura também foi observado diversas regiões no interior do fio sem filamentos, as quais são demonstradas na Figura 41 e indicados nas setas vermelhos, expostos na Figura 41a.

Figura 41 – Magnificação dos filamentos da urdidura, (a) indicação dos vazios (b) dimensões dos filamentos, unidade em  $\mu\text{m}$



Foram verificados que os filamentos possuem diâmetro médio de  $11,9 \mu\text{m}$ , sendo inferiores ao diâmetro recomendado por Rempel e Hegger (2015). Segundo os autores, a diâmetro do filamento de vidro AR para ser empregado como reforço têxtil não deve ser inferior a  $14 \mu\text{m}$ . No entanto, segundo o fabricante, os filamentos utilizados para na urdidura são similares aos empregados na direção da trama, sendo assim, esta variação pode ser devido a dificuldades na determinação dos valores.

Em decorrência da existência de vazios no interior dos fios na direção da trama e da urdidura, não foi possível determinar a área do fio. Consecutivamente, entende-se que a área de  $0,23 \text{ mm}^2$ , obtida com informações do fabricante, pode ser considerada a área efetiva do feixe de filamentos.

#### 4.2.1.2 Caracterização mecânica do fio

A resistência à tração direta nos sentidos da trama e urdidura, assim como o módulo de elasticidade e a deformação última para o reforço AR122, são apresentados na Tabela 10. Importante destacar que se adotou a área dos fios de  $0,23 \text{ mm}^2$ , para ambos os sentidos, para determinação da tensão de tração.

Tabela 10 – Características mecânicas do fio do têxtil AR122 em ambas as direções

Direção do têxtil	Amostra	Força de ruptura (N)	Tensão de ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação final	
					mm/mm	(%)
Trama	1	224,50	976,1	80,85	0,01207	1,207
	2	231,50	1006,5	86,25	0,01167	1,167
	3	224,30	975,2	73,36	0,01329	1,329
	4	197,70	859,6	76,88	0,01118	1,118
	5	127,30	553,5	77,74	0,00712	0,712
	<b>Média</b>	<b>201,06</b>	<b>874,2</b>	<b>79,02</b>	<b>0,01107</b>	<b>1,107</b>
	<b>Máxima</b>	<b>231,50</b>	<b>1006,5</b>	<b>86,25</b>	<b>0,01329</b>	<b>1,329</b>
	<b>Desvio padrão</b>	<b>43,21</b>	<b>187,9</b>	<b>4,85</b>	-	-
Urdidura	1	132,40	575,6	50,07	0,01150	1,150
	2	203,00	882,6	65,54	0,01347	1,347
	3	221,40	962,6	42,72	0,02253	2,253
	4	167,50	728,3	46,65	0,01561	1,561
	5	186,90	812,6	35,86	0,02266	2,266
	<b>Média</b>	<b>182,24</b>	<b>792,3</b>	<b>48,17</b>	<b>0,01715</b>	<b>1,715</b>
	<b>Máxima</b>	<b>221,40</b>	<b>962,6</b>	<b>65,54</b>	<b>0,02266</b>	<b>2,266</b>
	<b>Desvio padrão</b>	<b>34,23</b>	<b>148,8</b>	<b>11,05</b>	-	-

Os resultados de tração dos fios para a direção da trama, atingiram a tensão de ruptura média de 874,2 MPa e potencial de 1006,5 MPa, valores inferiores aos 2500 MPa, informados por Peled, Bentur e Mobasher (2017), para filamento de vidro AR. Contudo, o módulo de elasticidade médio e máximo são superiores aos 70 GPa informados pelos autores, os quais são respectivamente, 79,02 GPa e 86,25 GPa.

Quanto a deformação final, as amostras analisadas apresentaram deformação final média de 1,107% e máxima de 1,329%. Valores inferiores ao preconizado por Peled, Bentur e Mobasher (2017), que estabelecem a deformação final de 3,6% para filamentos de vidro AR.

Para a direção da urdidura, os resultados de tensão de ruptura média à tração foram de 789,74 MPa e potencial de 962,61 MPa, inferiores a 2500 MPa, indicado pelos autores Peled, Bentur e Mobasher (2017), para filamento de vidro AR. O módulo de elasticidade teve valor médio de 47,86 GPa, enquanto o valor máximo alcançou

65,54 GPa, ambos os valores inferiores aos 70 GPa indicados pelos autores. A deformação final dos exemplares analisados também apresentou valores inferiores aos 3,5%, indicados pelos autores, sendo a deformação final média em 1,72% e a máxima em 2,26%.

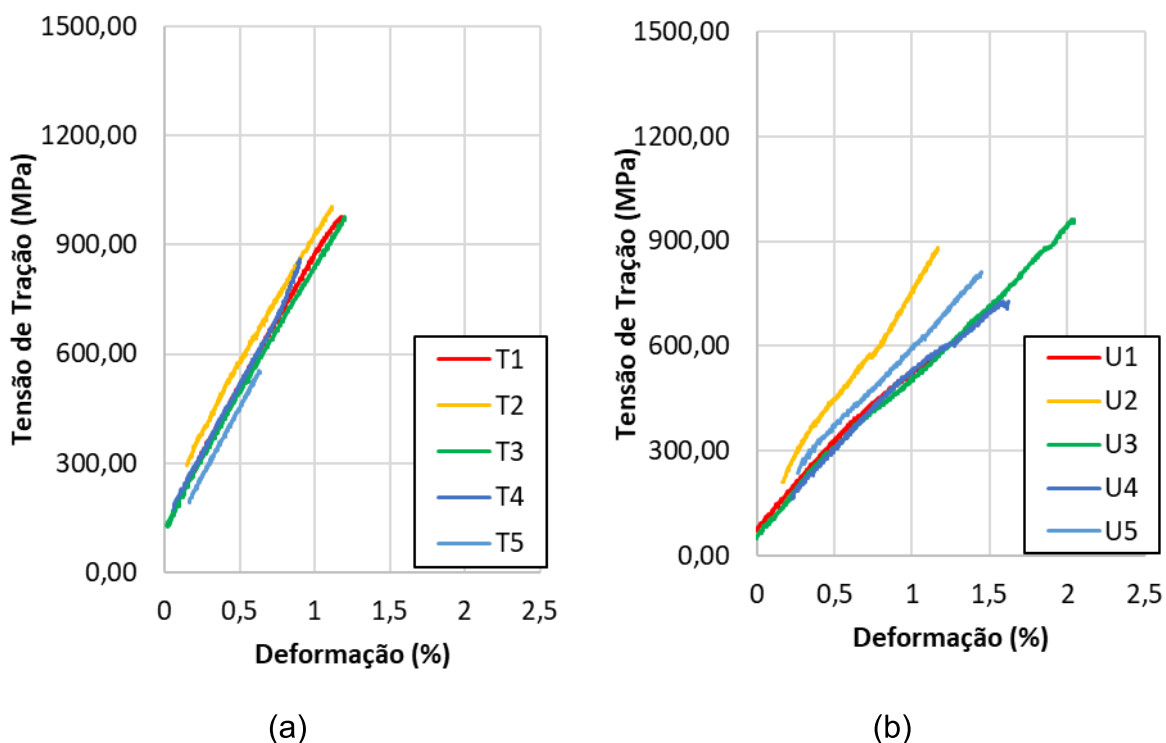
É possível relacionar os resultados entre direções, haja visto que os resultados das amostras na direção da trama apresentaram valores de resistência e módulo de elasticidade mais satisfatórios frente aos do sentido da urdidura, além do mais, a trama possui menor deformação.

Importante destacar que o módulo de elasticidade da matriz cimentícia utilizada neste estudo possui valor inferior ao do têxtil AR122, para ambas as direções. Segundo Peled (2018), os têxteis, por apresentarem módulo de elasticidade superiores à matriz, proporcionam comportamento satisfatório para potencial inserção como reforço à matriz cimentícia.

Ao serem relacionados os valores obtidos no ensaio de tração para o têxtil AR122 com a resistência à tração do filamento de vidro AR, considera por Peled, Bentur e Mobasher (2017) em 2500 MPa, observa-se redução na eficiência fio, uma vez que a resistência máxima do fio na direção da trama e urdidura, foram respectivamente, 40,2% e 38,5% inferiores à resistência do filamento. De acordo com Valeri, Fernández Ruiz e Muttoni (2020), ocorre diminuição no desempenho do fio por deficiências na ligação e interação entre filamentos.

Na Figura 42 são apresentados gráficos da tensão de tração *versus* deformação, para melhor visualização do comportamento mecânico dos fios.

Figura 42 – Comportamento mecânico à tração individual dos fios nas direções: (a) trama e (b) urdidura



Conforme observado nos diagramas tensão *versus* deformação dos corpos de prova, o comportamento dos fios são do tipo frágil-elástico, pois a falha ocorreu quando a tensão máxima do material foi atingida, e não foram observados sinais de escoamento (HAWKINS et al., 2018). Os resultados dos diagramas na direção da trama apresentaram semelhanças com os obtidos no estudo de Williams Portal et al. (2016), pois as geometrias e modo do fabricação dos fios são semelhantes.

A não existência de filamentos torcidos na trama provocou no fio uma livre movimentação entre os filamentos, resultando em um comportamento totalmente linear, consecutivamente, o módulo de elasticidade e resistência à tração foram superiores.

Isto se deve a questão dos fios da urdidura estarem torcidos, o que segundo Hawkins et al. (2018), podem ter prejudicado a capacidade suporte de carga, aumentando a deformação e reduzido o módulo de elasticidade.

As configurações de ruptura dos corpos de prova, na direção da trama e urdidura, após ensaios de tração são apresentadas na Figura 43 e Figura 44, respectivamente.

Figura 43 – Estado de ruptura dos corpos de prova após ensaio na direção da trama

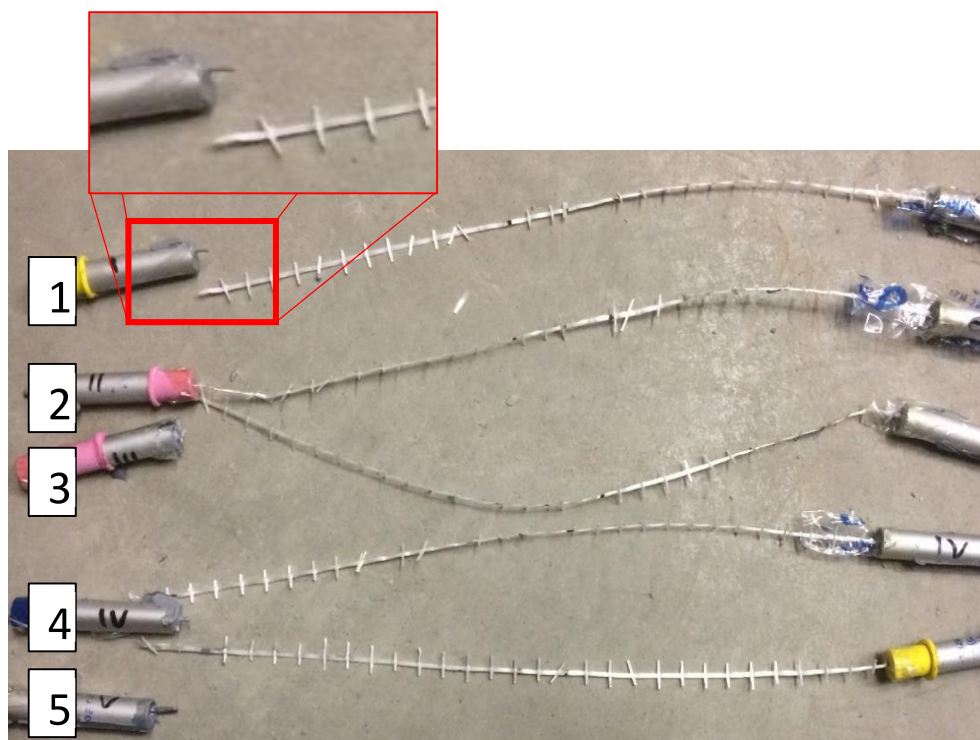


Figura 44 – Estado de ruptura dos corpos de prova após ensaio na direção da urdidura



Nas amostras na direção da trama, a falha ocorreu na interface entre o fio e a ancoragem, local de acúmulo de tensões, como também observado nos estudo de Hawkins et al. (2018). Além do mais, nesta região pode ter surgido alguma diferença de linearidade do corpo de prova, e que pode ter contribuído na ruptura no ponto de fixação.

Por outro lado, no sentido da urdidura, a ruptura do fio ocorreu no centro do vão do corpo de prova, próximo ao local de fixação do *clip-gauge*, fator que pode ter contribuído à falha.

É possível considerar, ao observar a forma de ruptura dos fios na direção da urdidura, que apenas um dos conjuntos de filamentos alcançou a ruptura, o que indica o esforço de tração pode ser solicitado os fios de modo desigual.

Importante destacar a influência do *clip-gauge* na configuração da ruptura do fio, pois suspeita-se que a massa do equipamento de medição possa ter contribuído para o desalinhamento do fio, o que pode ter prejudicado seu desempenho.

A fim de complementar a caracterização mecânica do têxtil, o comportamento mecânico à tração do têxtil em um conjunto de fios foi verificado, sendo seus resultados apresentados no item a seguir.

#### 4.2.1.3 Caracterização mecânica do têxtil

O comportamento mecânico dos têxteis analisados quanto a resistência à tração direta, para o têxtil AR122, é apresentado na Tabela 11, são indicados os valores máximos de cada corpo de prova para ambas as direções do reforço, bem como o alongamento máximo.

Importante destacar que cada corpo de prova possuía a quantidade de 6 fios, sendo a área de cada fio de  $0,23 \text{ mm}^2$ , totalizando a área  $1,38 \text{ mm}^2$ . Sendo assim a tensão foi calculada pela divisão da força máxima com a área total dos fios (COLOMBO et al., 2013).



Tabela 11 – Características mecânicas do têxtil AR122

Amostra	Sentido da Trama			Sentido da Urdidura		
	Carga máxima	Tensão máxima	Alongamento máximo	Carga máxima	Tensão máxima	Alongamento máximo
	(N)	(MPa)	(%)	(N)	(MPa)	(%)
1	1498	1086	3,1	1242	900	3,3
2	1540	1116	3,1	1312	951	3,0
3	1542	1117	3,9	1099	796	2,9
4	1549	1122	3,6	1147	831	2,8
5	1422	1030	3,3	1297	940	2,9
<b>Média</b>	<b>1510</b>	<b>1094</b>	<b>3,4</b>	<b>1219</b>	<b>884</b>	<b>3,0</b>
<b>Máxima</b>	<b>1549</b>	<b>1122</b>	<b>3,9</b>	<b>1312</b>	<b>951</b>	<b>3,3</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>53</b>	<b>39</b>	<b>0,3</b>	<b>93</b>	<b>68</b>	<b>0,2</b>

É possível observar que na direção da trama, a resistência média à tração foi de 1094 MPa, ao passo que, na direção da urdidura, a resistência média alcançou o valor de 884 MPa. Assim, caracteriza-se uma diferença de 19,19% entre os valores médios de resistência à tração. A resistência superior na direção da trama em relação à urdidura foi confirmada conforme os resultados apresentados pelo fabricante, pois a direção da trama possui resistência teórica superior.

No estudo desenvolvido Rampini et al. (2019), para tecidos planos do tipo leno impregnados com resina estireno butadieno, o sentido da urdidura apresentou maior resistência em 6,3%. Por outro lado, os resultados de Zani et al. (2019) corroboram com os resultados obtidos nos ensaios, pois para têxtil do tipo leno sem impregnação, a trama atingiu no estudo dos autores, a tensão de tração de 61,9% maior em relação a urdidura.

Este comportamento pode ser entendido pela configuração de fabricação, pois os fios da urdidura estão em forma de laço por entre os fios da trama, logo estes fios não são totalmente retos, há, portanto, um desvio de alinhamento. Esta forma do têxtil, pode ter prejudicado a resistência à tração para o sentido da urdidura, uma vez que as áreas dos reforços são iguais (COLOMBO, 2015).

Quando os fios da urdidura foram solicitados, houve uma tendência de alinhamento, o que pode ter gerado tensões de cisalhamento entre os fios da trama, concentrando as tensões na região de contorno entre as direções. Enquanto que, na

direção da trama, os fios são solicitados livremente, e a ruptura ocorreu por alongamento dos filamentos, o que pode ter refletido no maior alongamento (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

## 4.2.2 Têxtil AR 192

### 4.2.2.1 Caracterização geométrica

A caracterização geométrica dos fios do têxtil AR192 é apresentada em imagens ampliadas obtidas com auxílio de microscópio digital. A Figura 45 demonstra a imagem de topo do têxtil com magnificação de 40x, juntamente com as cotas da largura do fio da trama e urdidura.

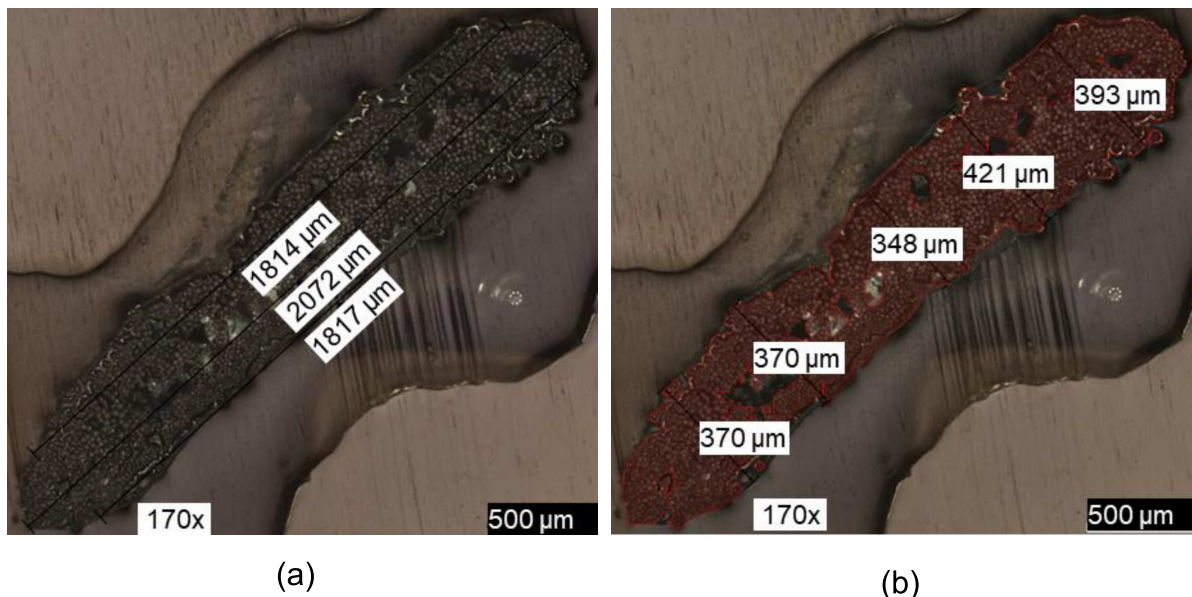
Figura 45 – Vista geral do têxtil AR192, ampliação de 40x



Na direção da trama, o fio tem largura de 1735 µm, na direção da urdidura o fio possui variação no valor da largura. No centro da malha formada entre os fios da trama a largura é de 781 µm. A largura da trama se mantém sem alteração de dimensão, o que não foi observado na direção da urdidura, pois ao se aproximar da região de contato com a trama, o fio apresenta aumento da largura.

Na direção da trama, a Figura 46 apresenta a seção transversal do fio com ampliação de 130x as dimensões.

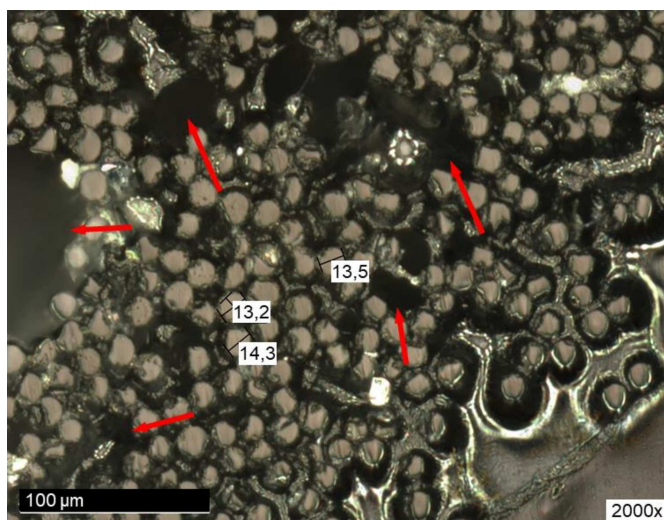
Figura 46 – Seção transversal do fio na direção da trama do têxtil AR192, (a) cotas longitudinais e (b) cotas transversais



O fio na direção da trama foi determinado o comprimento médio de 1901 μm e largura média de 382,2 μm, sendo a diferença de 4,79 vezes, o que possibilitou relacionar seção transversal de forma análoga a uma geometria elíptica. O perímetro foi quantificado com auxílio do software *Autocad*® em 6,773 mm.

Com magnificação de 2000x, no fio da trama, foi possível verificar o diâmetro dos filamentos, como demonstrado na Figura 47.

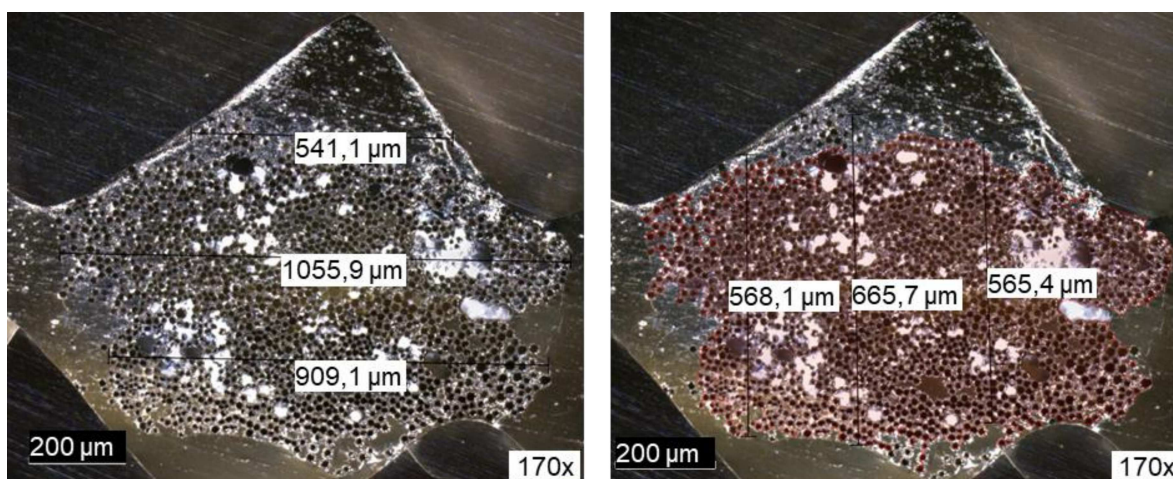
Figura 47 – Magnificação dos filamentos da trama, indicação dos vazios e dimensões dos filamentos, unidade em  $\mu\text{m}$



Foi observado a existência de algumas regiões com vazios por entre os filamentos, estes indicados pelas setas vermelhas. O diâmetro médio dos filamentos foi quantificado em  $13,6 \mu\text{m}$ . Conforme recomendação de Rempel e Hegger (2015), o diâmetro do filamento utilizado para compor o fio da trama é ligeiramente inferior ao diâmetro de  $14 \mu\text{m}$ , no entanto, é possível indicar atendimento, visto que esta variação pode ter sido ocasionada pela dificuldade na precisão da medição.

A análise da seção transversal do fio na direção da urdidura foi exposta na Figura 48, a qual expõe as dimensões da seção transversal do fio em corte na região central entre os fios da trama.

Figura 48 – Seção transversal do fio na direção da urdidura do têxtil AR192, (a) cotas longitudinais e (b) cotas transversais



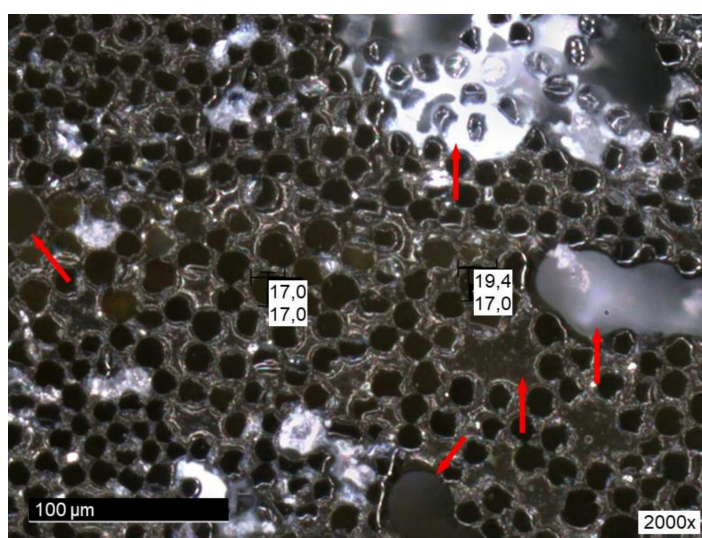
Cotas longitudinais

Cotas transversais

O fio na direção da urdidura foi quantificado os valores médios de 835,36  $\mu\text{m}$  para o comprimento e largura de 599,73  $\mu\text{m}$ . Se observou que, a geometria do fio se aproxima de uma esfera, pois a largura é 1,39 vezes inferior ao comprimento. O perímetro foi quantificado com auxílio do software *Autocad*® em 5,442 mm.

A Figura 49 ilustra imagem da seção transversal do fio na direção da urdidura com magnificação de 2000x, sendo possível identificar o diâmetro dos filamentos.

Figura 49 – Magnificação dos filamentos da urdidura, indicação dos vazios e dimensões dos filamentos, unidade em  $\mu\text{m}$



Observa-se o diâmetro médio dos filamentos em 17,6  $\mu\text{m}$ . Dessa vez, tem-se o atendimento ao diâmetro mínimo trazido por Rempel e Hegger (2015), pois o filamento possui diâmetro superior a 14  $\mu\text{m}$ .

Foi destacado pelas setas vermelhas espaços vazios em regiões entre os filamentos, não ocupados por filamentos. Por este motivo, mesmo com a exclusão de alguns destes, a quantificação da área da seção transversal não foi possível de ser quantificada com auxílio do software *Autocad*®. Sendo assim, admite-se que a área de 0,23  $\text{mm}^2$ , determinada com informações do fabricante, compreende as características do fio.

#### 4.2.2.2 Caracterização mecânica do fio

Os resultados do comportamento mecânico dos corpos de prova, no sentido da trama e urdidura, frente à solicitação de tração direta são apresentados na Tabela 12,

onde são reunidos os valores médios e máximo, o módulo de elasticidade e a deformação final, além do desvio padrão.

Tabela 12 – Características mecânicas do fio na direção da trama e urdidura

Direção do têxtil	Amostra	Força de ruptura (N)	Tensão de ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação final	
					mm/mm	(%)
Trama	1	301,2	1309,6	74,88	0,01749	1,749
	2	290,4	1262,6	86,84	0,01454	1,454
	3	319,3	1388,3	75,97	0,01827	1,827
	4	247,9	1077,8	78,41	0,01375	1,375
	5	276,3	1201,3	89,36	0,01344	1,344
	<b>Média</b>	<b>287,02</b>	<b>1247,9</b>	<b>81,09</b>	<b>0,01550</b>	<b>1,550</b>
	<b>Máxima</b>	<b>319,30</b>	<b>1388,3</b>	<b>89,36</b>	<b>0,01827</b>	<b>1,827</b>
	<b>Desvio padrão</b>	<b>26,00</b>	<b>117,1</b>	<b>6,59</b>	-	-
Urdidura	1	125,70	546,5	39,98	0,01367	1,367
	2	200,20	870,4	40,63	0,02143	2,143
	3	221,60	963,5	38,78	0,02485	2,485
	4	170,50	741,3	33,18	0,02234	2,234
	5	148,40	645,2	33,73	0,01913	1,913
	<b>Média</b>	<b>173,28</b>	<b>753,4</b>	<b>37,26</b>	<b>0,02028</b>	<b>2,028</b>
	<b>Máxima</b>	<b>221,60</b>	<b>963,7</b>	<b>40,63</b>	<b>0,02485</b>	<b>2,485</b>
	<b>Desvio padrão</b>	<b>38,57</b>	<b>167,69</b>	<b>3,54</b>	-	-

Os resultados expostos na Tabela 12 destacaram que a tensão média de ruptura à tração do fio da trama foi de 1247,9 MPa e a máxima de 1388,3 MPa. O módulo de elasticidade médio foi de 81,09 GPa e o máximo de 89,36 GPa. Enquanto, na direção da urdidura, a resistência à tração média foi 753,4 MPa e a máxima, 963,5 MPa, respectivamente foram 60,37% e 69,4% inferiores aos valores na direção da trama. Quanto ao módulo de elasticidade, a direção da urdidura atingiu valor médio de 37,26 GPa e máximo de 40,63 GPa, consecutivamente, foram 54,05% e 54,53%, respectivamente, inferiores aos valores na orientação da trama.

A mesma relação de eficiência do fio para com o filamento observado no têxtil AR122 pode ser realizada para o têxtil AR192. Pois foi observado prejuízo de 50,08%

em relação a resistência à tração média do fio com o filamento na direção da trama e 69,86% na direção da urdidura, considerando o valor da tensão de tração do filamento em 2500 MPa. De acordo com as considerações de Hawkins et al. (2018) e Rampini et al. (2019), que pontuam que possa haver prejuízos de resistência quando considerado a resistência do fio em relação a resistência do filamento e que esta redução deve ser considerada nos modelos de dimensionamento.

Destaca-se que a matriz utilizada neste trabalho atingiu módulo de elasticidade em 33,4 GPa, sendo 10,36% inferior ao obtido para o fio na direção da urdidura e 58,81% inferior à orientação da trama. Em consequência, o uso do têxtil no sentido da urdidura, como reforço em matriz cimentícia, pode resultar no compósito com maior ductilidade e menor resistência à tração, quando comparado ao têxtil com módulo de elasticidade superior ao da matriz, conforme preconiza Peled (2018).

Como o módulo de elasticidade na direção da trama atingiu valor superior ao valor de 70 GPa recomendado por Peled, Bentur e Mobasher (2017), segundo Gries et al. (2006), possibilita o uso como reforço têxtil em matriz cimentícia.

Ao comparar os resultados do têxtil AR192 entre o têxtil AR122, no sentido da urdidura, em relação aos valores médios da resistência à tração e do módulo de elasticidades, o têxtil AR192 apresentou valores 4,92% e 22,65% menores que o têxtil AR122. Conforme Colombo (2015) e Peled, Bentur e Mobasher (2017), a variação de eficiência pode ser resultado da diferença de espaçamentos entre fios, pois o têxtil AR192 possui menor espaçamento entre fios que o fio AR122, e consecutivamente há maior ângulo de dobra, o que pode resultar em menor eficiência mecânica.

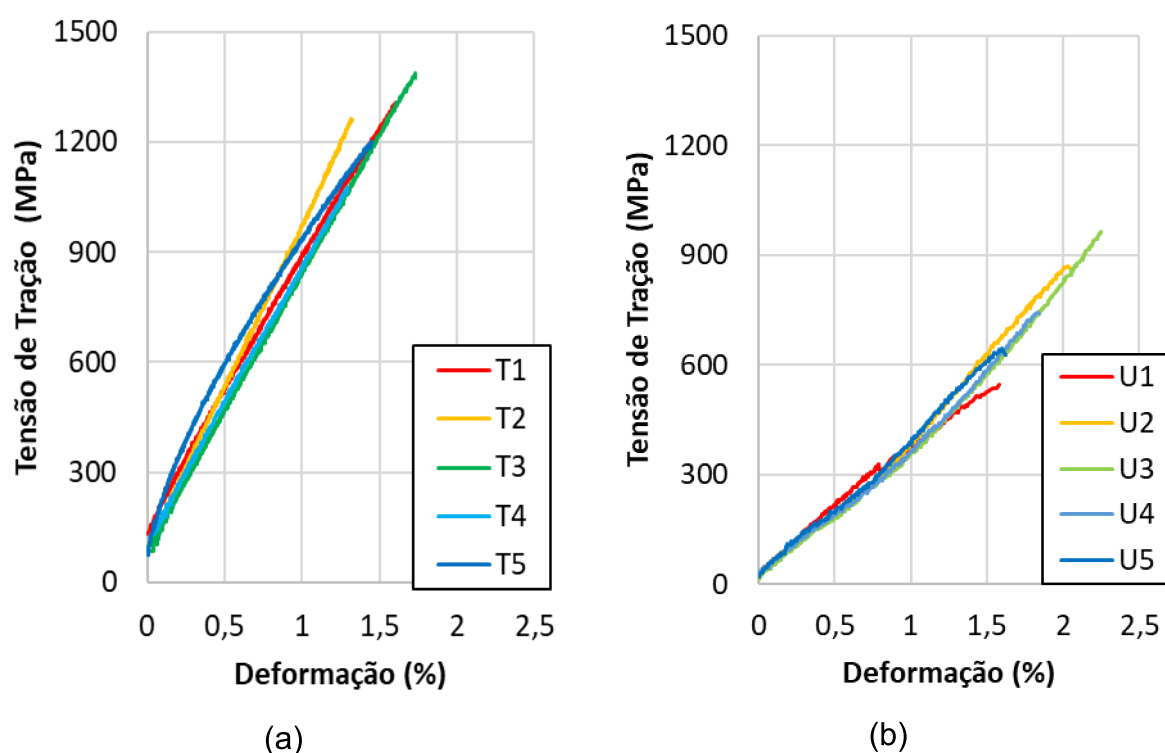
O mesmo aconteceu com a orientação da trama, pois o têxtil AR192 apresentou maior tensão de tração e maior módulo de elasticidade em relação ao têxtil AR122, respectivamente em 29,9% e 2,62%. Mesmo possuindo as mesmas quantidades de filamentos, a variação de resistência entre os têxteis pode ter sido influenciada pelo modo de fabricação. Segundo Haik, Sasi e Peled (2017), a proximidade dos fios da urdidura podem ter favorecido para o melhor agrupamento dos filamentos, resultando em uma solicitação à tração mais uniforme.

Em todas as amostras analisadas, a deformação final alcançou valor inferior a 3,6%, estabelecido por Peled; Bentur; Mobasher (2017). Os resultados dos exemplares na direção da trama atingiram a deformação final média em 1,549% e deformação final máxima, em 1,827%. Em contrapartida, na direção da urdidura, a deformação final média e máxima foram mais pronunciadas, respectivamente, em

2,0282% e 2,285%. Valores de deformação que se aproximam aos resultados de 1,91% para têxtil na direção da trama com gramatura de 210 g/m<sup>2</sup>, obtidos por Williams Portal et al. (2016), para o fio na direção da trama, em um têxtil do tipo leno.

O comportamento mecânico dos corpos de prova ao longo do ensaio, foram organizados nos diagramas de tensão *versus* deformação, no sentido da trama e urdidura, apresentados na Figura 50.

Figura 50 – Comportamento mecânico à tração das amostras AR192 na direção: (a) Trama e (b) Urdidura



Denota-se que o comportamento mecânico dos corpos de prova, em ambos os sentidos, apresentou ruptura do tipo frágil no regime elástico, o que caracteriza a atuação frágil-elástica do material. De acordo com Hawkins et al. (2018), os corpos de prova não manifestaram ponto de escoamento, tendo a falha ocorrida ao alcançar a tensão máxima de tração.

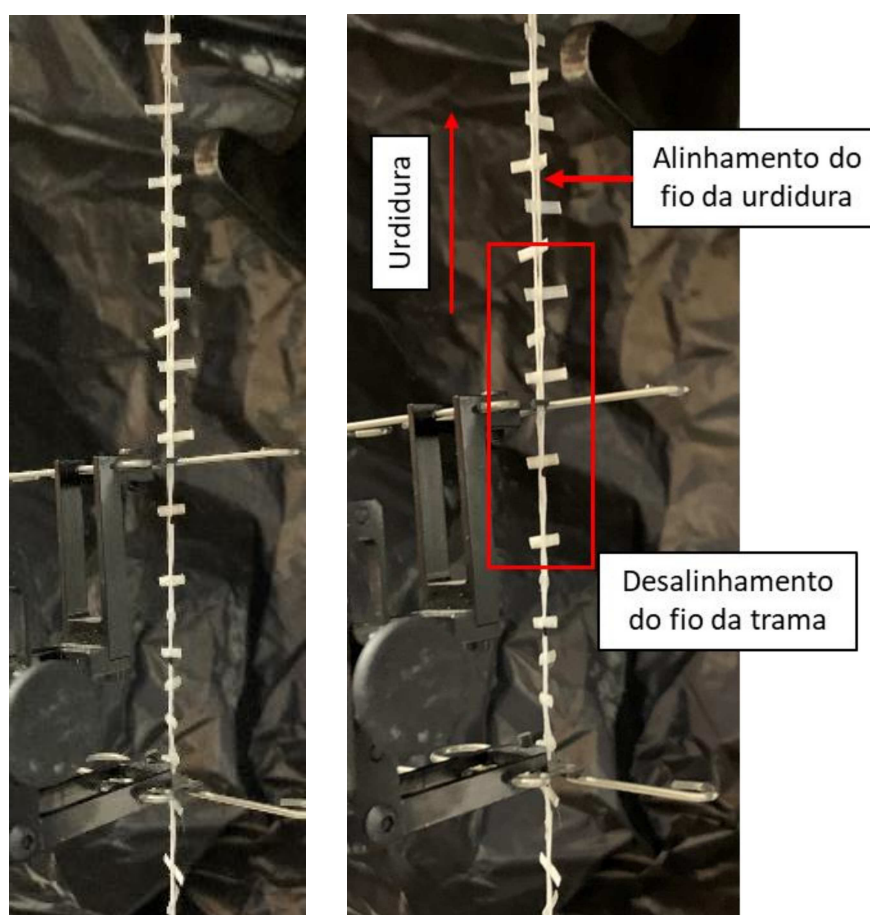
Os diagramas tensão *versus* deformação obtidos para os corpos de prova na direção da trama apresentaram similaridade com o comportamento à tração entre as amostras analisadas e, tiveram comportamentos correlatos aos obtidos por Williams Portal et al. (2016), visto que as geometrias do têxtil eram próximas.

No entanto, foi possível destacar que as deformações obtidas com os corpos de prova na direção da urdidura foram superiores às atingidas na direção da trama.



Este comportamento também pode ser relacionado com o método de fabricação do têxtil. Conforme Peled, Bentur e Mobasher (2017), como os fios na direção da urdidura são torcidos e ondulados entre o fio da trama pode ter ocorrido que os fios da urdidura se alinharam pelo esforço de tração, o que pode ter resultado em maiores valores de alongamento, quando comparado ao sentido da trama. Além do mais, para Hawkins et al. (2018), o menor módulo de elasticidade obtido na direção da urdidura, em comparação aos fios da trama pode ter sido consequência do maior alongamento do fio. O alinhamento dos fios da urdidura foi observado durante o ensaio de tração, como demonstrado na Figura 51.

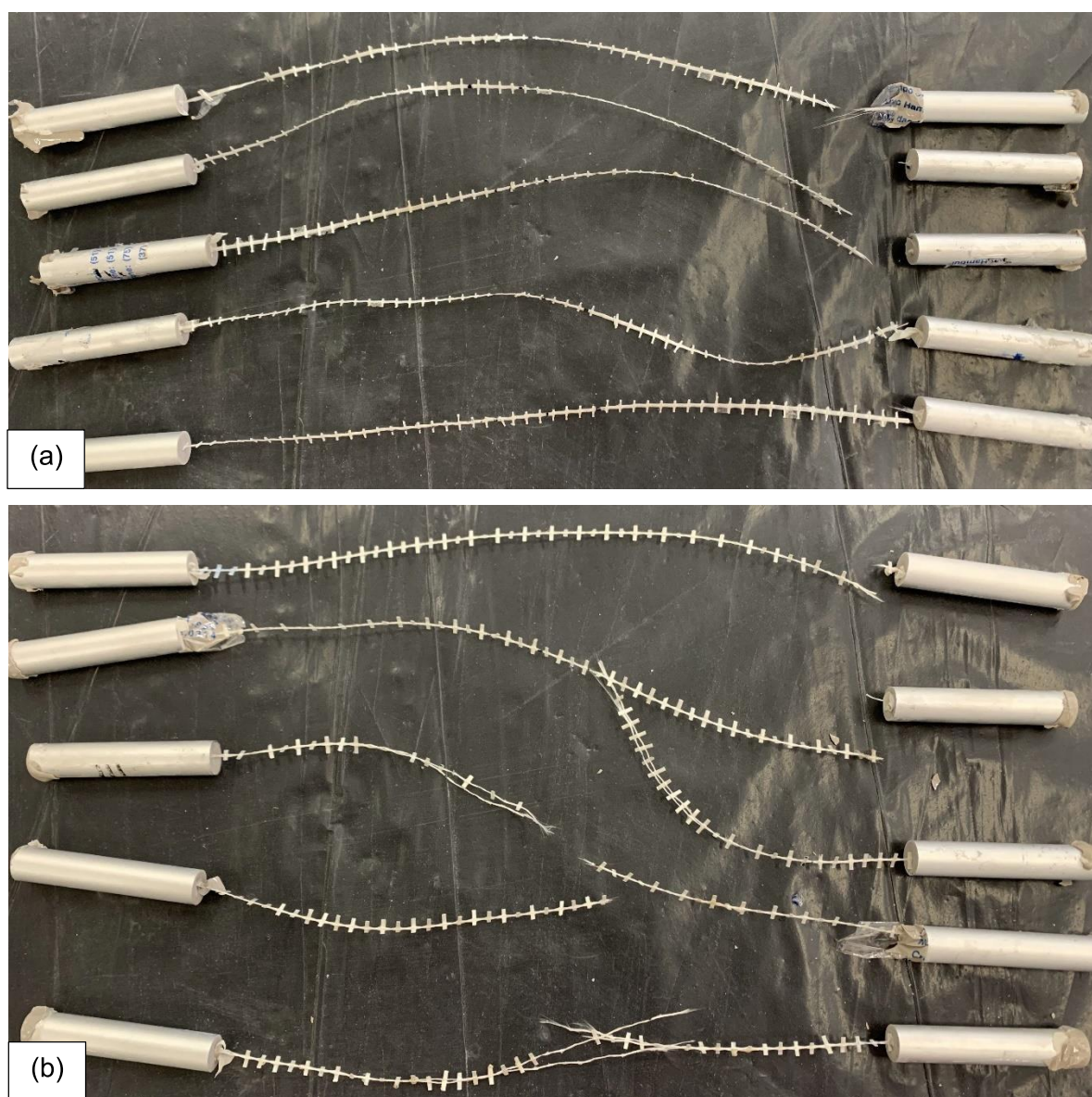
Figura 51 – Alinhamento dos fios da urdidura



A ocorrência do alinhamento dos fios da urdidura ocorreu à medida que o fio foi alongado, a configuração ondulada em laço por entre os fios da trama foi perdida, o que resultou no desalinhamento dos fios perpendiculares.

O aspecto após ruptura das amostras frente às solicitações de tração é exposto na Figura 52.

Figura 52 – Estado de ruptura nas amostras AR192, após ensaio de tração dos fios na direção (a) trama e (b) urdidura



Conforme Hawkins et al. (2018), ruptura de todas os corpos de prova na direção da trama ocorreu na interface entre o fio e a ancoragem, em consequência de ser o local de acúmulo de tensões. Além do mais, pode ter havido algum desvio de linearidade do fio na região de fixação, o que pode ter favorecido a ruptura neste ponto.

No entanto, de modo geral os corpos de prova no sentido da urdidura, a ruptura ocorreu no centro do comprimento do corpo de prova, este comportamento pode sido potencializado pela fixação do *clip gauge*, como também observado no têxtil AR122.

O *clip-gauge*, como suposto no têxtil AR122, também pode ter contribuído para na configuração da ruptura do fio, uma vez que a massa do *clip-gauge* pode ter desalinhado do fio e prejudicado seu desempenho.

A análise da caracterização mecânica é complementada com ensaio em corpos de prova de têxtil com a atuação em conjunto dos fios, e os resultados são apresentados no item a seguir.

#### 4.2.2.3 Caracterização mecânica do têxtil

O comportamento mecânico do têxtil AR192 quanto a resistência à tração direta, no sentido da trama e urdidura, é apresentada na Tabela 13, incluindo os valores máximos de cada corpo de prova, assim como o valor médio.

Como cada corpo de prova possuía a quantidade 8 fios, sendo a área individual de cada fio em 0,23 mm<sup>2</sup>, perfazendo a área total do trecho do têxtil analisado em 1,84 mm<sup>2</sup>, para ambos os sentidos. O valor da tensão foi calculada pela divisão da força máxima com a área total dos fios (COLOMBO et al., 2013).

Tabela 13 – Características mecânicas do têxtil AR192

Amostra	Sentido da Trama			Sentido da Urdidura		
	Carga máxima (N)	Tensão máxima (MPa)	Alongamento máximo (%)	Carga máxima (N)	Tensão máxima (MPa)	Alongamento máximo (%)
1	2908	1580	4,3	1595	867	2,9
2	2694	1464	3,7	1309	711	2,2
3	3305	1796	3,5	1549	842	3,1
4	2806	1525	3,9	1418	771	2,4
5	2915	1584	3,9	1546	840	2,8
<b>Média</b>	<b>2926</b>	<b>1590</b>	<b>3,8</b>	<b>1483</b>	<b>806</b>	<b>2,7</b>
<b>Máxima</b>	<b>3305</b>	<b>1796</b>	<b>4,3</b>	<b>1595</b>	<b>867</b>	<b>3,1</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>230</b>	<b>125</b>	<b>0,3</b>	<b>118</b>	<b>64</b>	<b>0,4</b>

A resistência à tração média na direção da trama foi 6,72% superior à resistência na tração para a direção da urdidura, respectivamente, e a tensão de tração na trama e na urdidura foram, 1590 MPa e 1483 MPa.

Os resultados da resistência à tração obtidos do ensaio contrariam as informações apresentadas pelo fabricante, pois conforme resistência teórica à ruptura, ambas as direções deveriam apresentar valores semelhantes, o que não foi observado nos resultados dos ensaios.

Os resultados dos corpos de prova do têxtil AR192 acompanharam a tendência dos resultados obtidos para o têxtil AR122, visto que ambos possuem o mesmo processo de produção, logo apresentaram o mesmo comportamento mecânico. No entanto, os resultados corroboraram com resultados alcançados por Zani et al. (2019), para têxtil do mesmo modo de fabricação e sem revestimento.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO TÊXTIL

#### 4.3.1 Têxtil AR122

##### 4.3.1.1 Resistência à tração direta

Os resultados dos ensaios de resistência à tração direta, nos corpos de prova de TRC reforçados com o têxtil AR122, são apresentados na Tabela 14. São apresentados os valores médios dos resultados da tensão crítica de fissuração e máxima do compósito, para as idades de 7, 28 e 91 dias, considerando os valores dos compósitos com uma e duas camadas de têxtil na orientação da trame e urdidura, as quais caracterizam as taxas de reforço 0,192% e 0,383%.

Os valores médios foram quantificados a partir dos resultados individuais considerados válidos, dado que alguns corpos de prova tiveram que ser desconsiderados, em virtude do escorregamento nos suportes metálicos, o que prejudicou a leitura das deformações longitudinais.

Tabela 14 – Resultados médios da resistência à tração direta do TRC com o têxtil

## AR122

Sentido do têxtil	Número de camadas	Idade do ensaio (dias)	$\sigma_{c,cr}$ (MPa)	$\sigma_{cu}$ (MPa)	$\sigma_{t,cr}$ (MPa)	$\sigma_{tu}$ (MPa)
Trama	1	7	2,13	2,46	1111,30	1283,48
	1	28	2,09	2,34	1090,43	1220,87
	1	91	2,85	3,11	1486,96	1622,61
	2	7	3,13	4,10	816,52	1069,57
	2	28	3,86	4,66	1006,96	1215,65
	2	91	2,87	3,37	748,70	879,13
Urdidura	1	7	2,53	2,53	1320,00	1320,00
	1	28	2,76	2,85	1440,00	1486,96
	1	91	4,46	4,46	2326,96	2326,96
	2	7	2,45	3,54	639,13	923,48
	2	28	2,17	3,54	566,09	923,48
	2	91	2,68	3,55	699,13	926,09

Legenda:  $\sigma_{c,cr}$  tensão crítica do compósito.  $\sigma_{cu}$  tensão máxima do compósito.  
 $\sigma_{t,cr}$  tensão crítica do reforço.  $\sigma_{tu}$  tensão máxima do reforço.

Os valores individuais dos respectivos corpos de prova estão dispostos no apêndice A.

Foi observado em algumas situações, aumento da tensão de tração máxima em relação a tensão de fissuração, o que segundo Peled (2016), houve a atuação do têxtil na promoção do aumento da tensão após a formação da primeira fissura.

Com relação a idade de cura da matriz, se observou ganhos inexpressíveis ou nulos de resistência máxima frente o avanço da idade de cura, nos períodos analisados, sendo assim, houve pouca influência da resistência ou dos processos de hidratação da matriz na resistência máxima à tração do compósito. Segundo Butler, Mechtcherine e Hempel (2010), foi possível destacar que, durante o período de 91 dias, os têxteis de vidro AR inseridos na matriz cimentícia, não sofreram prejuízos na resistência à tração que pudesse ser atribuído à deterioração do vidro AR causada pela deposição dos produtos de hidratação do cimento.

Por outro lado, ao se analisar a resistência crítica, a idade de cura da matriz pode ter influenciado no aumento da resistência, uma vez que a idade de 91 dias os valores de tensão crítica foram superiores às idades anteriores. Exceto na tipologia

com duas camadas de têxtil na orientação da trama, pois na idade de 28 dias a resistência crítica superou a obtida aos 91 dias. Como este comportamento não foi observado nos demais corpos de prova, entende-se que esta configuração de resultado não caracterizou a tendência observada nas demais tipologias analisadas, logo pode ser atrelada às limitações do procedimento de ensaio.

Ao relacionar os resultados das amostras com uma e duas camadas com reforço, para ambas as orientações do têxtil, foi percebido aumento no valor de resistência máxima com aumento da quantidade de camadas, como destacado por Colombo et al. (2013) e Du et al. (2017), quando considerada a resistência à tração do compósito. No entanto, quando considerada a área do reforço, se observou comportamento inverso, na situação em que a taxa de reforço é dobrada, a força não apresentou aumento na mesma proporção, o que acarretou a diminuição da tensão de tração, quando se considerou a área reforço ao invés da área da seção transversal do compósito.

O aumento da resistência à tração com a quantidade de duas camadas de reforço era esperado, pois conforme Silva e Silva (2020), nos elementos com duas camadas de têxtil, a formação da primeira fissura foi retardada, em decorrência do confinamento gerado pelas camadas de têxteis externas na porção central da matriz.

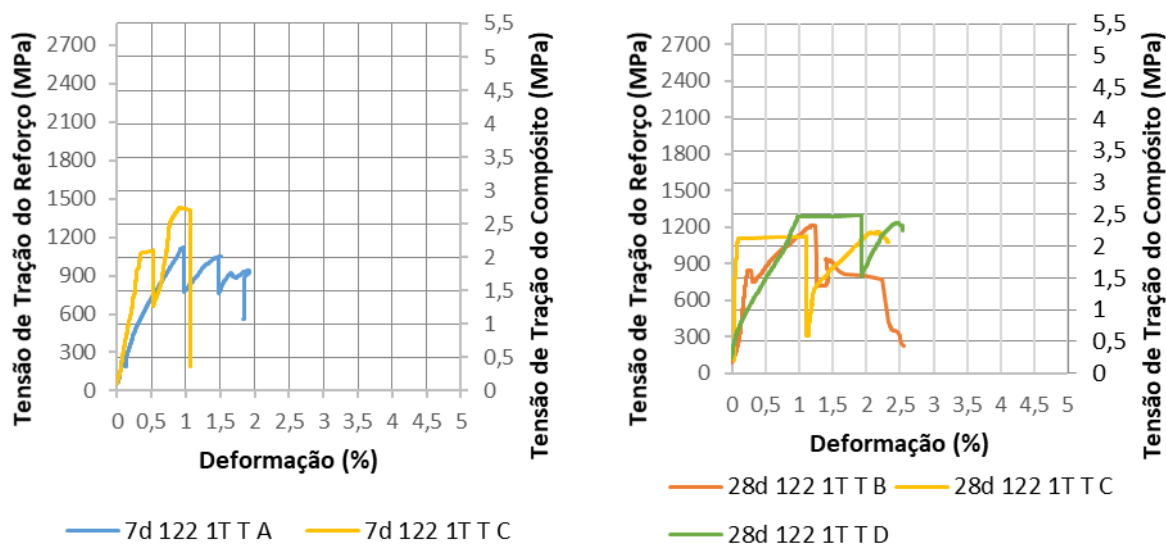
Ao se analisar a influência da orientação na resistência à tração máxima, se observou que a direção da trama apresentou valor superior à urdidura nas idades de 7 e 28 dias, respectivamente maior em 15,8% e 31,6%. No entanto, na idade de 91 dias, a direção da urdidura alcançou resistência superior à trama em 5,3%. Com isto, foi possível perceber o melhor desempenho à tração com a orientação da trama, o que corroborou com os estudos de Hegger et al. (2006) e Zani et al. (2019) e contrariou os estudos de Du et al. (2017) e Haik, Sasi e Peled (2017).

De acordo com Haik, Adiel Sasi e Peled (2017), a geometria do fio pode ter influenciado, uma vez que a trama possui geometria elíptica com maior área de contato com a matriz, ao contrário da urdidura, que possui geometria esférica, logo há menor superfície de contato com a matriz. Além do mais, tanto o fio como o têxtil, na direção da trama atingiram maiores resistências à tração quando comparada a direção da urdidura.

No que tange o comportamento mecânico dos corpos de prova, em conformidade com Hegger et al. (2006a), devido a tensão máxima ter atingido valor superior à tensão da primeira fissura, se observou a atuação do comportamento dúctil

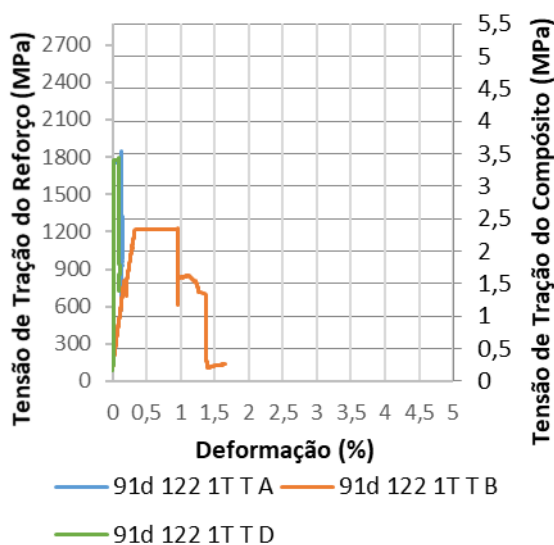
do compósito reforçado com o têxtil AR122, o qual pode ser elucidado com as configurações dos diagramas de deformação com variação da tensão de carregamento, dispostos na Figura 53 para os corpos de prova com uma camada de reforço na direção da trama, na Figura 54 para os com duas camadas de reforço com orientação na trama e na Figura 55 e Figura 56, respectivamente, os diagramas dos corpos de prova com uma e duas camadas com reforço na orientação da urdidura.

Figura 53 – Diagramas da tensão de tração *versus* deformação do TRC com uma camada de reforço AR122 na direção da trama nas idades (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias



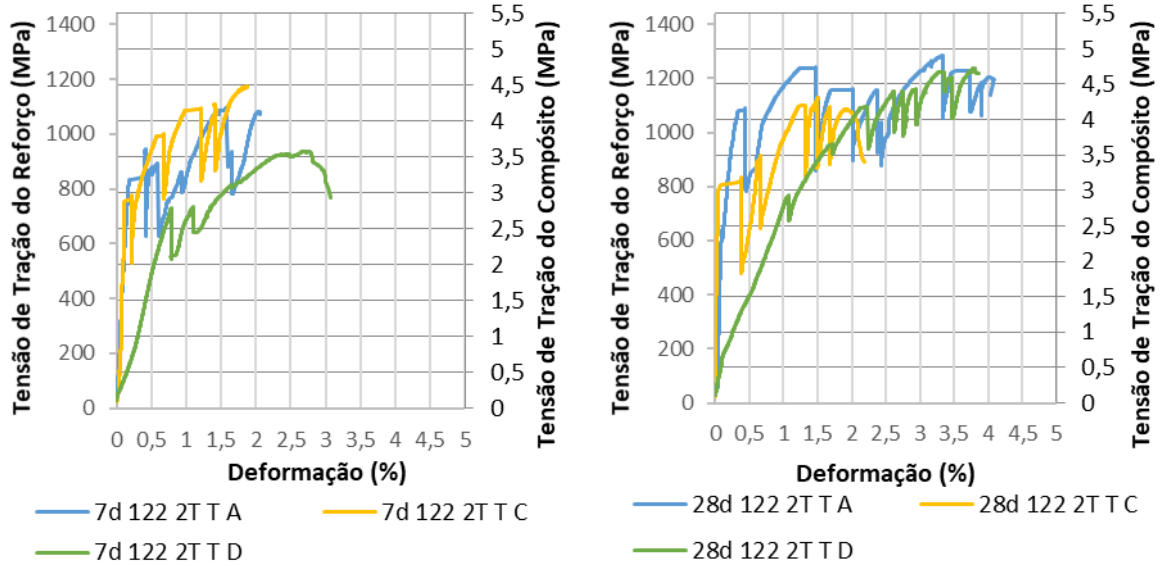
(a)

(b)



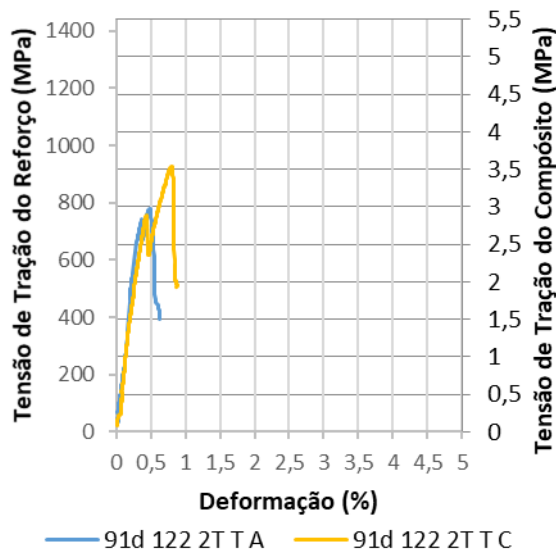
(c)

Figura 54 – Diagramas da tensão de tração *versus* deformação do TRC com duas camadas de reforço AR122 na direção da trama nas idades de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias



(a)

(b)



(c)



Figura 55 – Diagramas da tensão de tração *versus* deformação do TRC com uma camada de reforço AR122 na direção da urdidura nas idades de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias

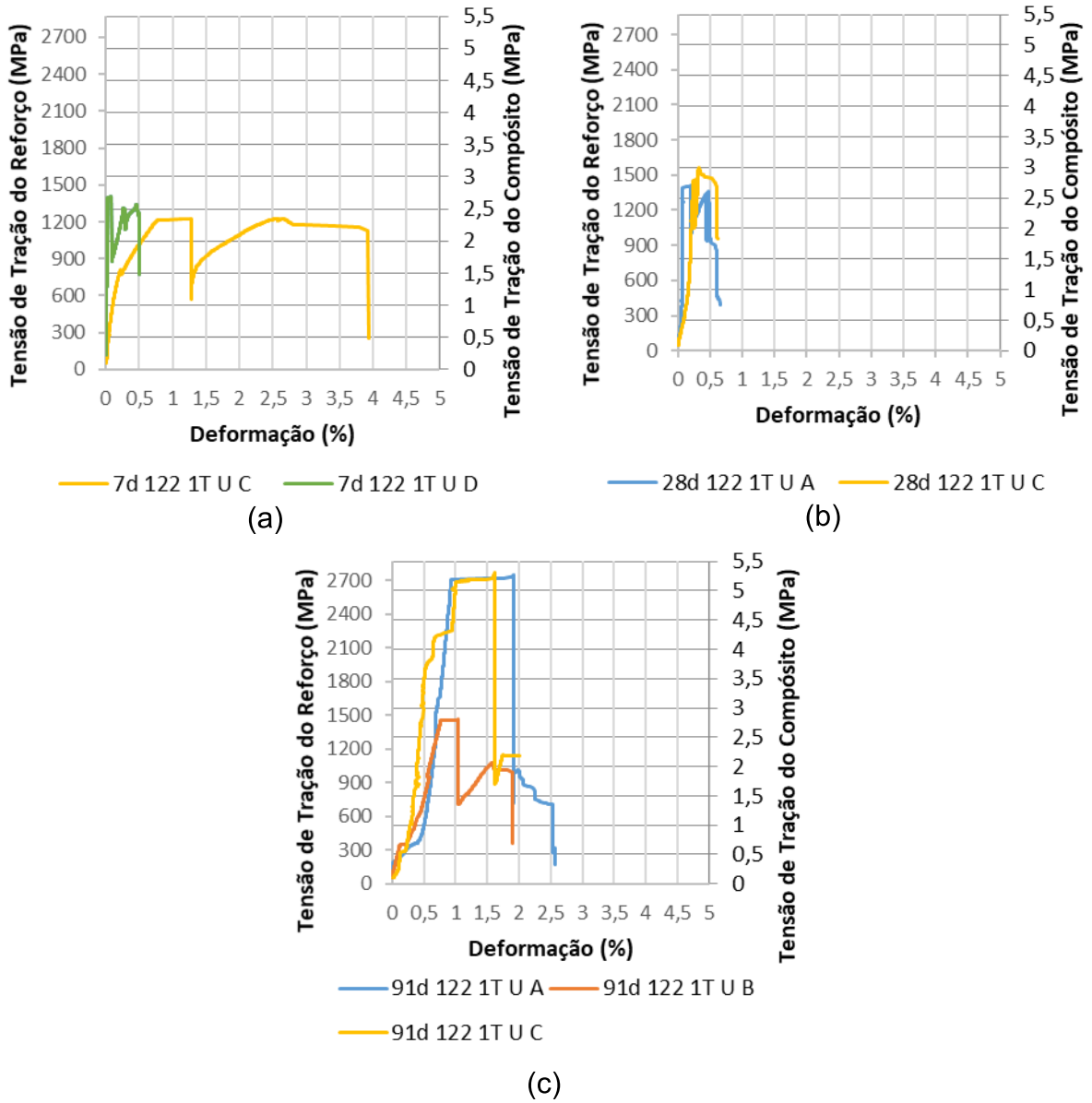
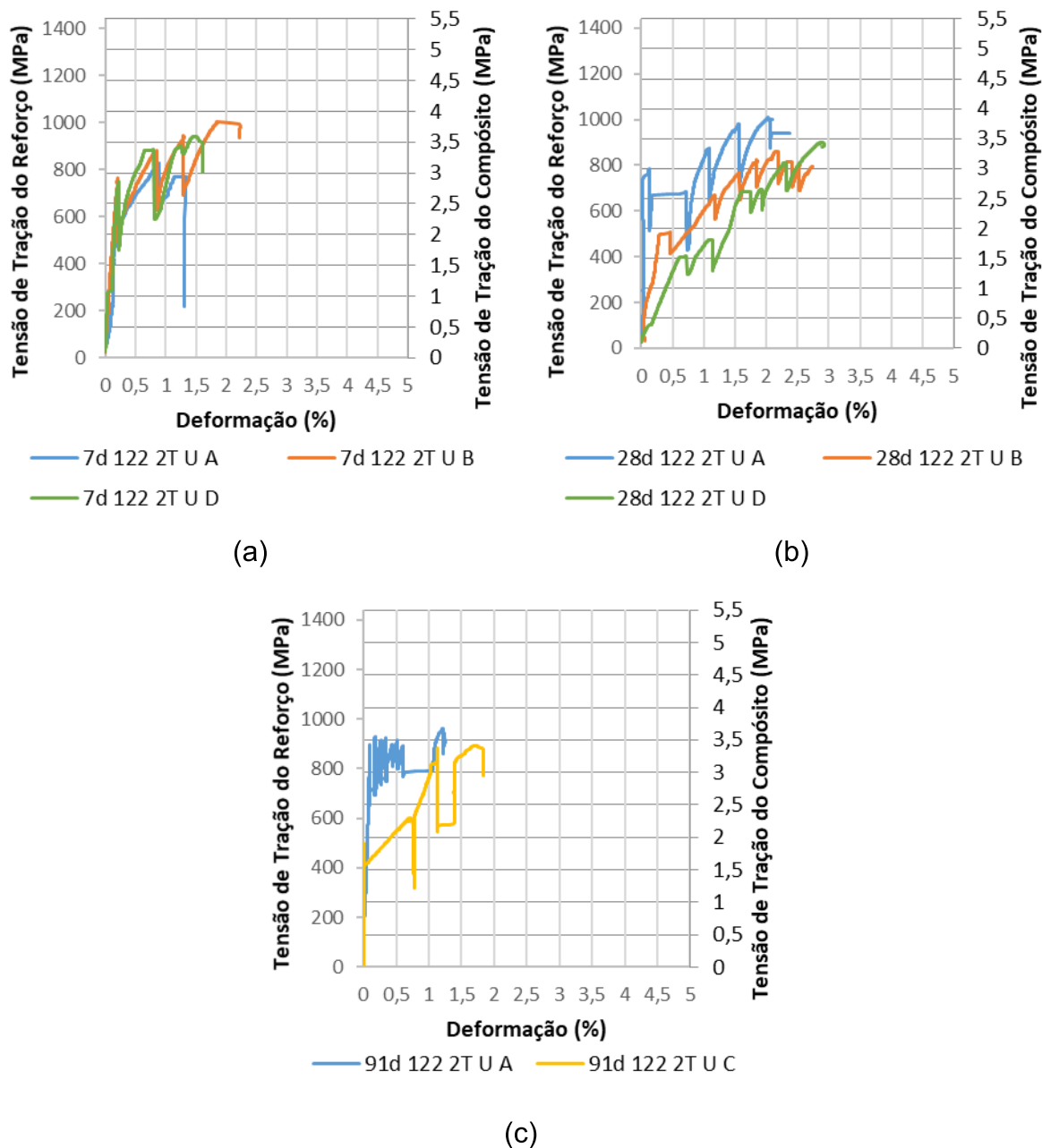


Figura 56 – Diagramas da tensão de tração *versus* deformação do TRC com duas camadas de reforço AR122 na direção da urdidura nas idades de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias



Os corpos de prova analisados apresentaram comportamento como esperado, pois segundo Peled (2016), houve formação de uma reta linear inicial que caracteriza o regime elástico, sem ocorrências de fissuras, com subsequente formação de fissura e rompimento do compósito.

O estágio pré-fissura, denominado como estágio I, de acordo com Peled (2016), neste estágio apenas a matriz exerce esforço de reação à solicitação de tração, foi

observado em todos os corpos de prova analisados. Com a formação da primeira fissura, o têxtil passou a ser solicitado.

Nos corpos de prova contendo apenas uma camada de reforço, em ambas as orientações do têxtil, foi possível indicar a tendência de formação de um segundo comportamento linear, após a formação da primeira fissura, que pode ser caracterizado como estágio 3, seguido pela falha do reforço. Ao se analisar de forma individual o comportamento mecânico dos corpos de prova, observou-se, em alguns corpos de prova com uma camada, que a tensão máxima ocorreu na formação da primeira fissura, o que caracterizou a tensão máxima como o valor da tensão crítica.

Por ter apresentado apenas uma queda brusca da carga com posterior aumento, nota-se que os 3 estágios distintos não foram observados em todas os corpos de prova com apenas uma camada de têxtil, houve apenas manifestação do estágio 1, zona não fissurada, e o estágio 3, zona de solicitação somente do reforço e posterior falha do têxtil.

Em geral, para os corpos de prova contendo uma camada de reforço na direção da trama e da urdidura, a quantidade de têxtil não apresentou capacidade de reforço, pois segundo Du et al. (2017), não apresentaram atuação nos três estágios distintos característicos do comportamento à tração do TRC. Sendo assim, conforme Zani et al. (2019), os resultados do comportamento mecânico foram considerados insuficientes, em razão de não representarem a lei constitutiva simplificada do concreto têxtil. Sinalizando com isto que as condições de contorno, a geometria do corpo de prova, bem como a quantidade do têxtil, de acordo com Silva e Silva (2020), não foram eficientes.

Além do mais, ao ser analisada a ocorrência de apenas uma fissura, observou-se que a liberação de energia com a formação da primeira fissura não permitiu a redistribuição das tensões entre a matriz e o têxtil, causando a ruptura do compósito. Esta situação é caracterizada por Colombo et al. (2013), com ductilidade desprezível.

Porém, ao serem analisados os diagramas dos corpos de prova com duas camadas de reforço, tanto na orientação da trama quanto na urdidura, foram observados a ocorrência dos 3 estágios distintos, de acordo com Butler, Mechtcherine e Hempel (2010) podem ser caracterizados como comportamento de TRC.

De modo geral, a formação das fissuras, pôde ser observada nos gráficos com quedas abruptas da tensão com aumento da deformação em patamar de carga razoavelmente constante. Este processo, em conformidade com Du et al. (2017),

ocorreu por efeitos da aderência do reforço com a matriz. Com a formação da fissura, o têxtil distribuiu a carga até que a tensão de fissuração da matriz fosse alcançada novamente, com a formação de uma nova fissura. A repetição deste processo terminou quando a distância entre fissuras sobrepôs a capacidade da matriz em suportar solicitação, o que resultou no alargamento das fissuras existentes sem formação de novas, com avanço da carga, juntamente com o deslocamento e até que ocorra a falha do têxtil. Neste estágio 3, foi possível relacionar de modo análogo ao efeito do módulo de elasticidade do têxtil.

Os resultados do comportamento dos corpos de prova analisadas nas idades de 7 e 28 dias foram considerados suficientes, dado que, conforme Peled, Mobasher e Bentur (2017), representam a lei constitutiva do concreto têxtil quando solicitado à tração. No entanto, os resultados dos corpos de prova na idade de 91 dias foram caracterizados como insatisfatórios, visto que não apresentaram comportamento característico de concreto têxtil. Como destacado por Zani et al. (2019), a variação pode ser conferida às limitações do ensaio e não ao comportamento isolado do corpo de prova.

Importante destacar que as diferenças nos valores de deformação entre os corpos de prova analisados, para as mesmas tipologias, podem não ter sido inerentes ao comportamento do compósito, e sim atribuída às limitações relativas a fixação da amostra com os suportes metálicos, como destacado por Zani et al. (2019).

A configuração da ruptura dos corpos de prova, bem como a formação das fissuras conforme orientação e quantidade do reforço, são passíveis de serem visualizadas na Figura 57 e Figura 58, respectivamente, para orientação da trama e urdidura.

Figura 57 – Aspecto final dos corpos de prova de TRC com têxtil AR122 na direção da trama após ensaio de tração conforme idade de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91

dias

AR122 1T T



(a)

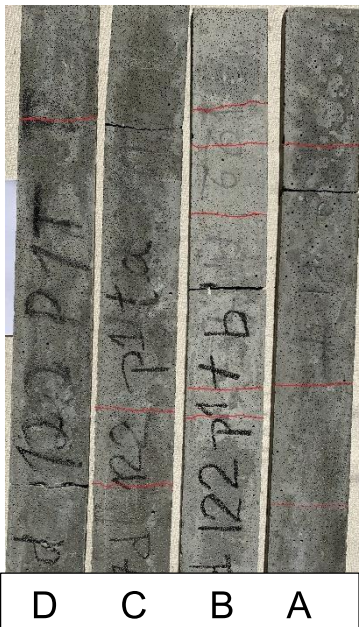


(b)



(c)

AR122 2T T



(a)



(b)



(c)

Figura 58 – Aspecto final dos corpos de prova de TRC com têxtil AR122 na direção da urdidura após ensaio de tração conforme idade de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91

dias

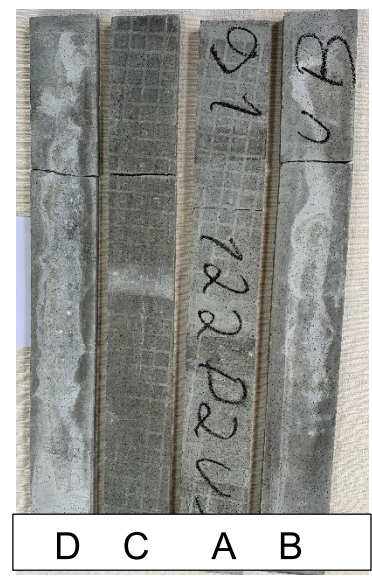
AR122 1T U



(a)



(b)



(c)

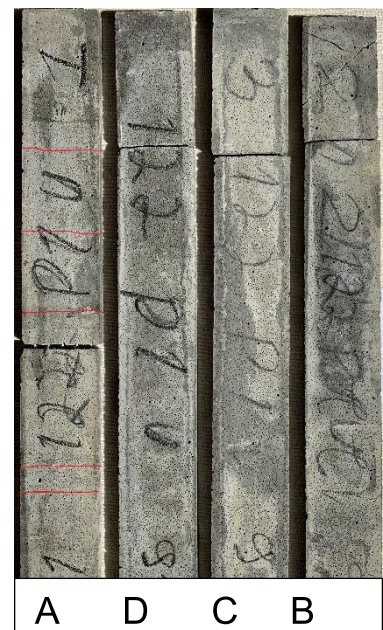
AR122 2T U



a)



b)



c)

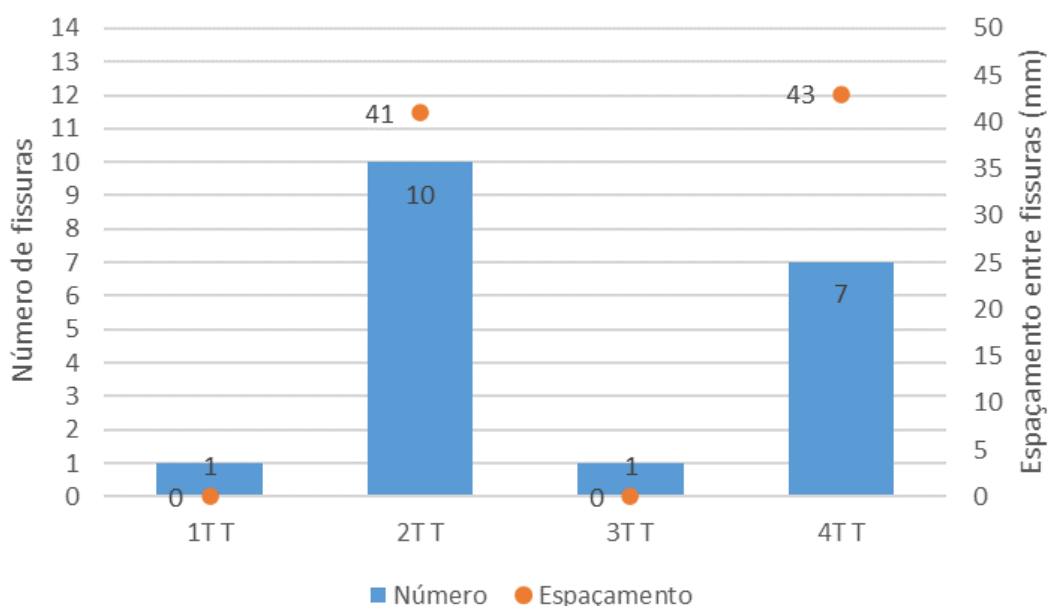
Ao se observar o aspecto final dos corpos de prova com uma camada de têxtil, não houve indícios de formação de múltiplas fissuras, como foi indicado nos diagramas de tensão vs deformação, além do mais, não foi possível distinguir

influência da idade ou orientação do têxtil no comportamento de fissuração, o que comprovou a atuação nos estágios 1 e 3 de ruptura, anteriormente destacados.

A falha dos corpos de prova na fissura próxima ao local de fixação nos suportes metálicos, aliado com a formação de apenas uma fissura, reforçou a consideração que os resultados da deformação não podem ser considerados satisfatórios, visto que não retrataram de modo exclusivo, o comportamento do corpo de prova (RILEM, 2016; ZANI et al., 2019).

A Figura 59 reuni as informações da quantidade e espaçamento das fissuras nos corpos de prova ensaiados aos 28 dias.

Figura 59 – Número de fissuras e espaçamentos entre fissuras



Os corpos de prova reforçados com duas camadas do têxtil AR122, foi possível destacar a ocorrência de múltiplas fissuras nos corpos de prova.

Em alguns corpos de prova, foi observado que a fissura crítica ocorreu na região próxima ao suporte metálico, após a formação das múltiplas fissuras espaçadas ao longo da região de medição da deformação, o que segundo Valeri, Fernández Ruiz e Muttoni (2020), são passível de ocorrência.

Em geral, como destacado por Du et al. (2017), houve um maior número de fissuras e com espaçamentos reduzidos com o aumento das camadas de têxteis. Além do mais, quando com duas camadas na direção da trama, foi observado maior formação de fissuras em relação ao têxtil na direção da urdidura.

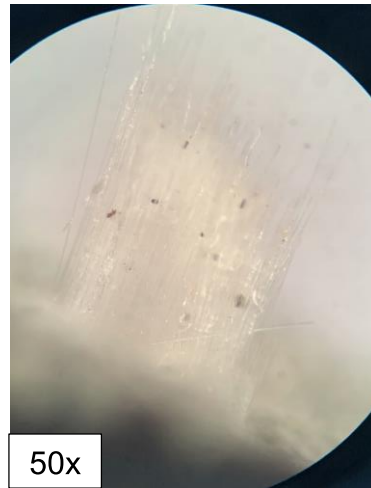
A fim de contribuir com o entendimento da configuração da falha do têxtil ocorrida no estágio 3, a Figura 60 e Figura 61 apresentam imagens ampliadas da ruptura do fio, conforme idade de ensaio e orientação das camadas de têxtil.

Figura 60 – Aspecto de ruptura dos fios de têxtil AR122 na orientação da trama após ensaio de tração conforme idade de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias

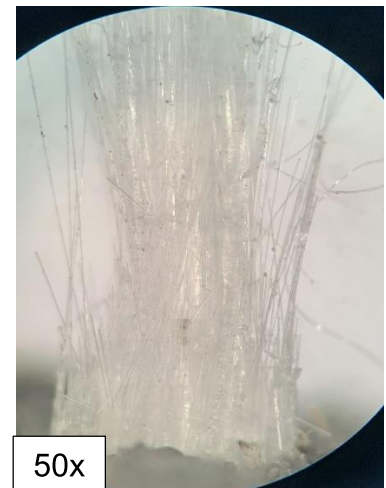
AR122 1T T



(a)



(b)



(c)

AR122 2T T



(a)



(b)

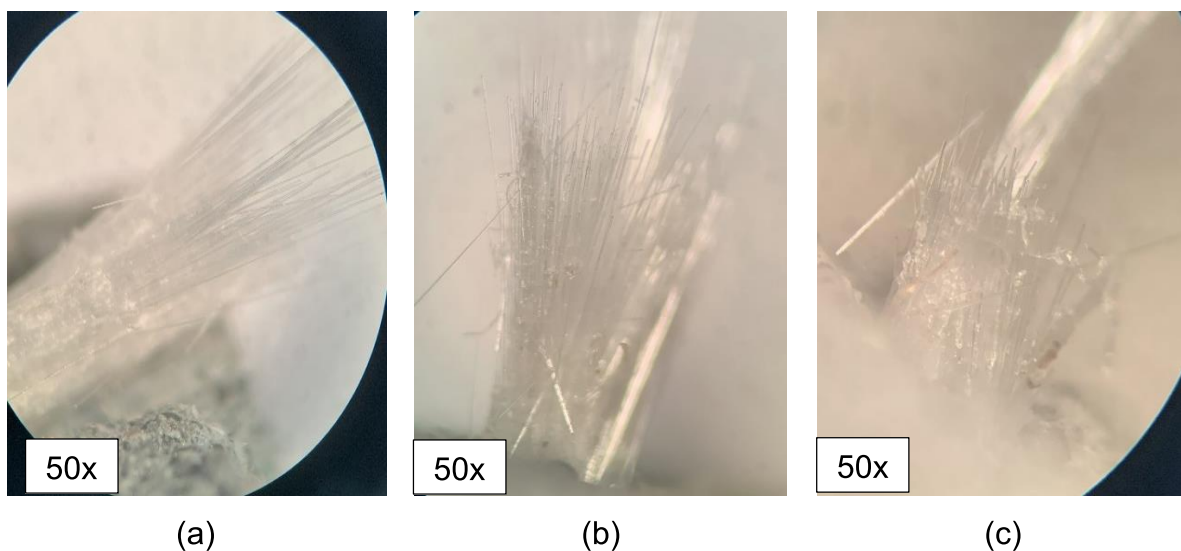


(c)

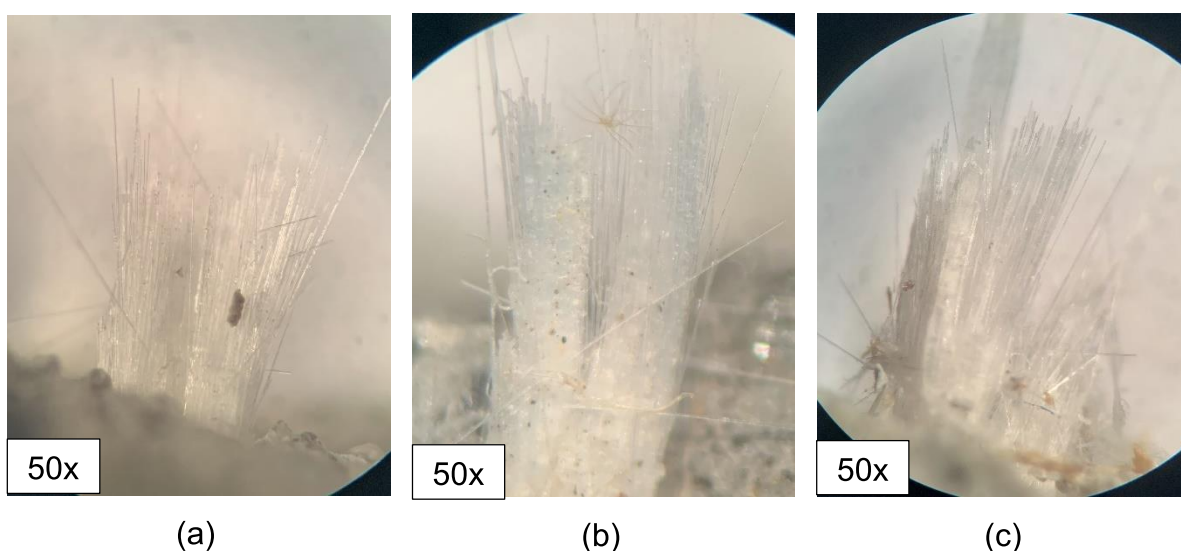


Figura 61 – Aspecto de ruptura dos fios de têxtil AR122 na orientação da urdidura após ensaio de tração conforme idade de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias

AR122 1T U



AR122 2T U



Com ampliação dos fios, foi observado a tendência de ruptura do têxtil com configuração do tipo telescópica, onde os filamentos externos romperam antes dos filamentos internos. Esse modo de ruptura do fio se assemelhou entre camadas de têxtil para ambas as orientações, trama e urdidura, independentemente da idade de ensaio. Essa mecanismo de falha, conforme Peled, Mobasher e Bentur (2017), caracterizou a forma de ruptura desejada para o concreto têxtil.

Ao atingir a carga máxima, de acordo com Peled (2016), os filamentos externos romperam, permanecendo os filamentos internos íntegros até a ruptura total, que

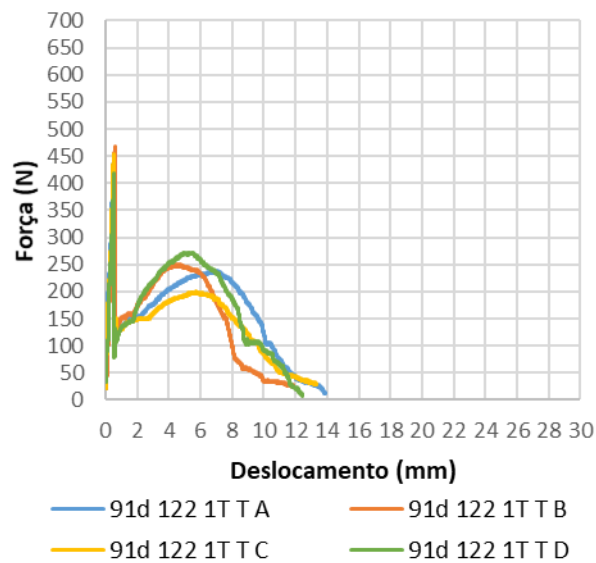
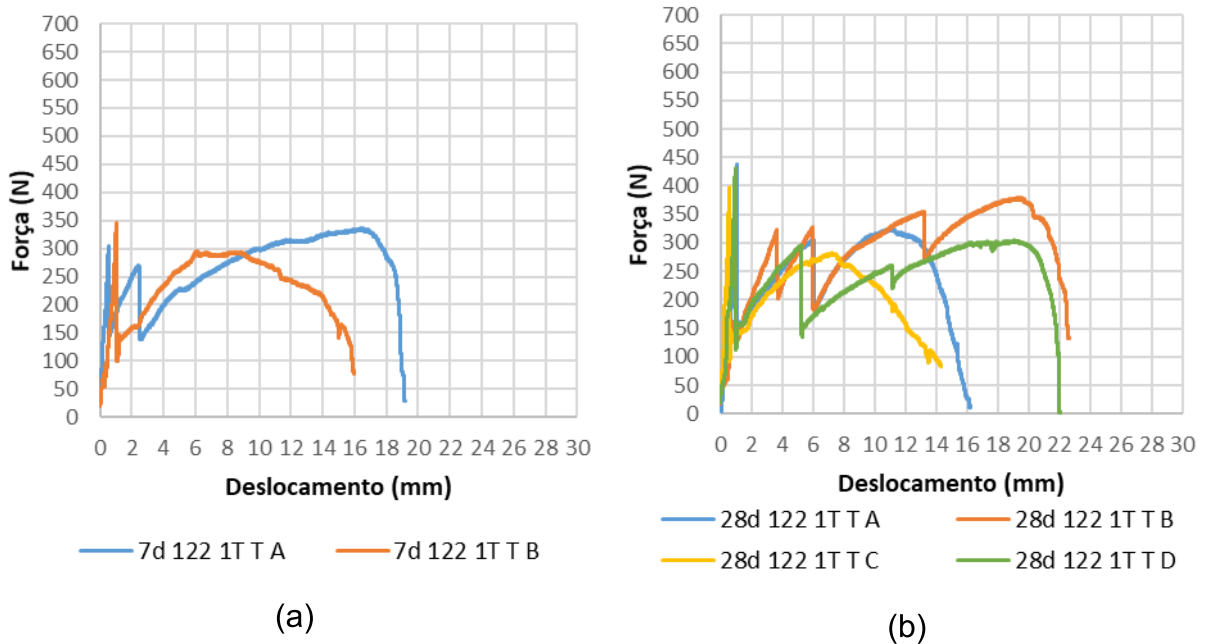
ocorreu com uma breve queda gradativa do carregamento, com posterior alongamento e solitação dos filamentos próximo ao núcleo do fio.

Por haver configuração telescópica nos rompimentos dos fios nas idades de até 91 dias, de acordo com Butler, Mechtcherine e Hempel (2010), o período de ensaio não foi suficiente para fragilizar os filamentos internos.

#### 4.3.1.2 Resistência à flexão

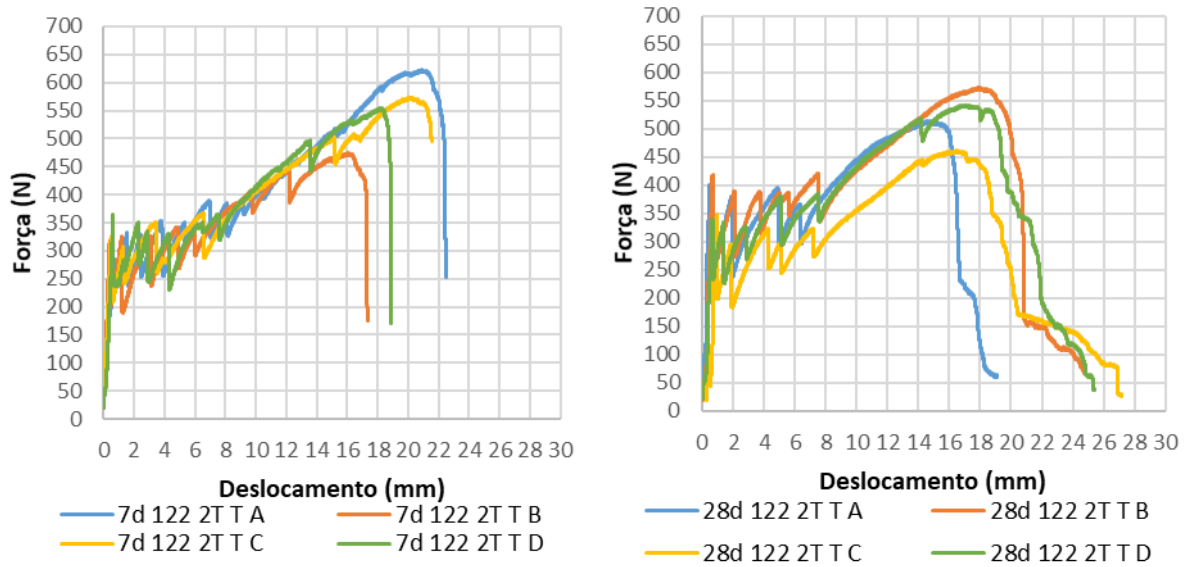
Os resultados do comportamento à flexão dos compósitos reforçados com o têxtil AR122 foram dispostos nos diagramas da força versus deslocamento apresentados Figura 62 à Figura 65, conforme as orientações do têxtil, da trama e da urdidura, contendo uma e duas camadas do têxtil, o que caracterizaram as, respectivas, taxas de reforço em 0,192% e 0,383%, conforme as idades de ensaio. Ao observar os diagramas, foi possível extrair os valores da resistência crítica e máxima à flexão. Aos 7 dias, para uma camada de têxtil na direção da trama, foram ilustradas apenas duas curvas, em decorrência do comprometimento dos demais corpos de prova na etapa de desforma.

Figura 62 – Diagramas Força vs Deslocamento – Flexão AR122 1T Trama, idades (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias



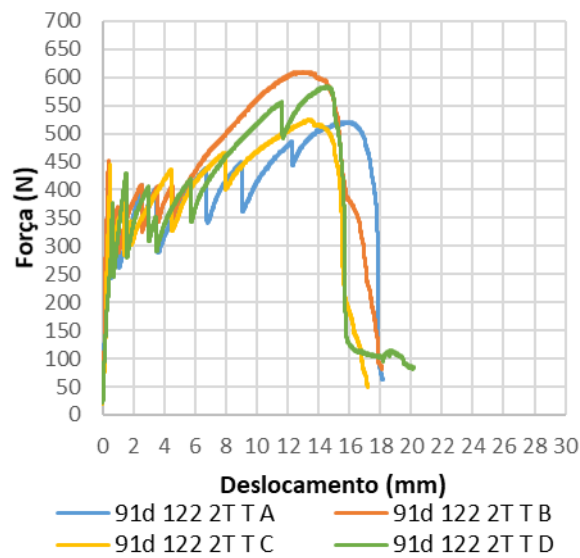
(c)

Figura 63 – Diagramas Força vs Deslocamento – Flexão AR122 2T Trama; idades (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias



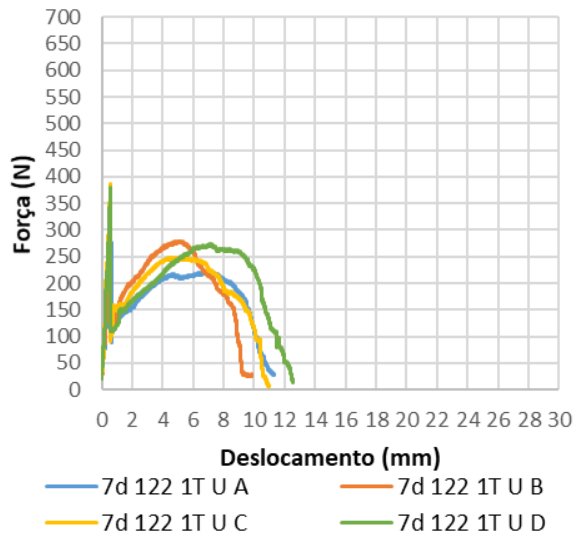
(a)

(b)

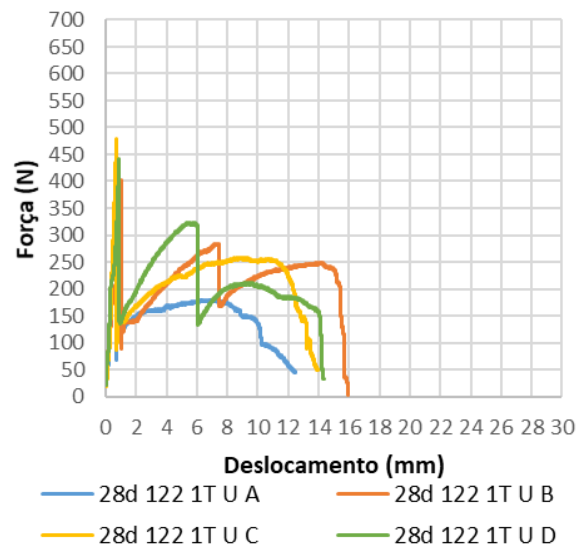


(c)

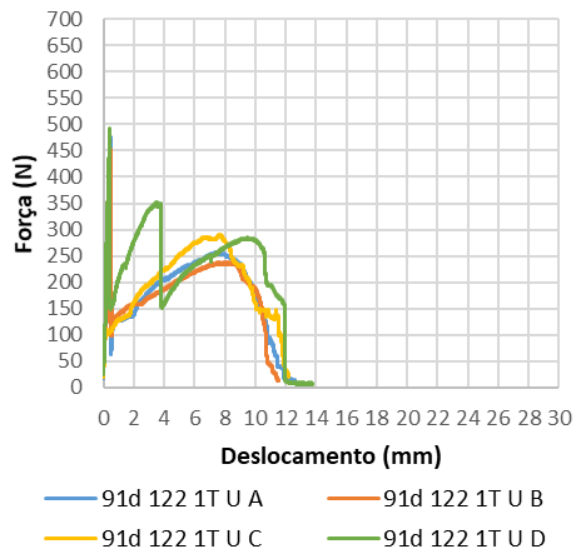
Figura 64 – Diagramas Força vs Deslocamento – Flexão AR122 1T Urdidura, idades (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias



(a)

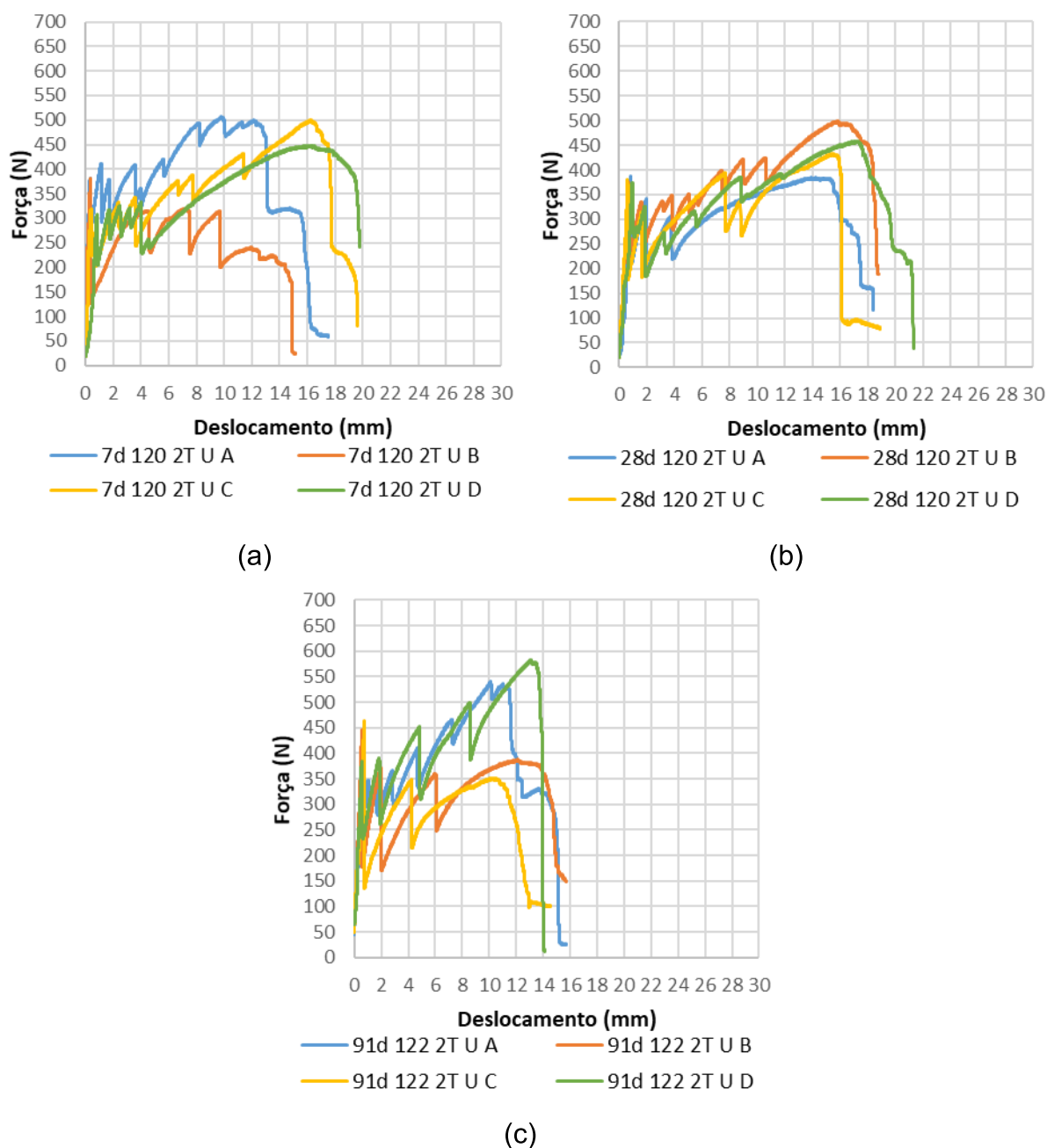


(b)



(c)

Figura 65 – Diagramas Força vs Deslocamento – Flexão AR122 2T Urdidura; idades (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias



Ao analisar os diagramas força *versus* deslocamento dos corpos de prova submetidos à flexão, notou-se pouca variação conforme evolução da idade de hidratação da matriz, foi destacando apenas a influência da quantidade de camadas e a orientação do têxtil. Ainda, o comportamento manifestado nos corpos de prova com duas camadas de têxtil foi diferente dos compósitos reforçados com apenas uma cada de têxtil, para ambas as orientações.

Destaca-se que, após a ocorrência da fissura, para o compósito com uma camada de reforço não houve aumento da resistência à flexão capaz de superar a força crítica, sendo então caracterizada a força máxima como força crítica. Ocorreu que, nos compósitos com apenas uma camada têxtil, foi promovido apenas sustentação do deslocamento e não influenciou na capacidade de carga, desenvolvendo comportamento mecânico do tipo dúctil, resultados consoantes com Zargarán et al. (2017).

Com uma camada de têxtil, a falha do TRC ocorreu por rompimento isolado no têxtil, no entanto, quando com duas camadas, em decorrência da formação de múltiplas quedas abruptas da carga, a falha do compósito ocorreu por escorregamento do têxtil com esmagamento da matriz.

Nos diagramas, todos os corpos de prova foram observados a atuação da região sem formação de fissura, sob influência do regime elástico, denominado como estágio I. Em alguns corpos de prova contendo uma camada de têxtil, houve formação de novas fissuras, que foram caracterizadas como atuação do estágio IIA.

De modo geral, nos corpos de prova com uma camada de têxtil, houve ocorrência de apenas os estágios IIB e III, sendo a etapa IIB caracterizada pelo aumento da abertura da fissura sem formação de novas, com transferência da carga ao têxtil, seguido pela falha do reforço, que caracteriza ocorrência do estágio III. Após, houve redução gradativa da carga, atribuída ao escorregamento dos filamentos com avanço do deslocamento.

Nos diagramas dos corpos de prova contendo duas camadas de têxtil, foram observadas a ocorrência dos três estágios distintos, como classifica Kamani, Kamali Dolatabadi e Jeddi (2018), e essa reação satisfaz a atuação mecânica esperada do concreto têxtil. Dado que houve aumento da carga após a ocorrência da primeira fissura, com manifestação de múltiplas fissuras e aumento progressivo da carga, resultando na força máxima maior que a força de fissuração.

Sendo assim, conforme Kulas, (2013), foi destacada a influência da taxa de reforço, tanto no comportamento mecânico quanto na resistência à flexão, visto que a configuração da ruptura se alterou com a taxa de reforço.

Nos diagramas Força vs Deslocamento, foi possível extrair a resistência máxima e crítica de cada exemplar para as respectivas idades de ensaio, bem como os respectivos valores do deslocamento. Os valores médios das tipologias analisadas foram organizados na Tabela 15, conforme quantidade de camadas, para as idades

de ensaio e orientação do têxtil. Os resultados individuais de cada corpo de prova estão dispostos no Apêndice B.

Tabela 15 – Valores médios dos resultados do comportamento à flexão dos compósitos reforçados com o têxtil AR122

Orientação do reforço	Número de camadas	Idade de ensaio (dias)	$f_{cr}$ (N)	$\delta_{cr}$ (mm)	$f_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)
Trama	1	7	325,1	0,786	340,8	8,690
	1	28	356,9	0,881	411,3	5,515
	1	91	447,0	0,531	447,0	0,531
	2	7	324,2	0,582	556,0	18,864
	2	28	376,4	0,676	522,3	16,549
	2	91	416,6	0,489	560,4	14,241
Urdidura	1	7	342,0	0,592	342,0	0,592
	1	28	435,3	1,341	435,3	1,341
	1	91	428,2	2,852	428,2	2,852
	2	7	347,5	0,475	459,2	10,661
	2	28	379,5	0,765	444,4	12,346
	2	91	424,0	0,642	508,3	6,143

Legenda:  $f_{cr}$  Carga Crítica;  $\delta_{cr}$  Deslocamento crítico;  $f_{max}$  Carga máxima;  $\delta_{max}$  Deslocamento máximo

Nos corpos de prova reforçados com uma camada, não se observou, de modo geral, aumento da força após a formação da primeira fissura. Foram destacados os resultados médios dos compósitos reforçados com têxtil orientado na trama nas idades de 7 e 28 dias, os quais houve aumento em 4,83% e 15,24%, respectivamente, da força máxima em relação à crítica, nos demais corpos de prova, a força crítica, foi considerada como máxima. Este comportamento corrobora com Williams Portol, Nyholm Thrane e Lundgren (2017), pois, com o avanço da resistência à compressão da matriz, apenas a matriz foi solicitada no estágio I, sendo que o aumento da força necessária para formar a primeira fissura foi influenciado apenas pelo aumento da sua resistência à compressão e não pela quantidade de têxtil. Contrariando Zargaran et al. (2017), que observaram influência da quantidade de camadas no aumento da resistência crítica. Sendo assim, com o surgimento da primeira fissura, a capacidade



resistente de apenas uma camada do têxtil não foi suficiente para aumentar a resistência de flexão.

Nos corpos de prova reforçados com duas camadas de têxtil, foi possível evidenciar aumento da resistência após o surgimento da primeira fissura, sendo capaz de superar a força crítica, para ambas as orientações do têxtil.

Como no estágio pré-fissura, houve atuação preponderante da matriz na resistência à flexão, foi observado aumento da força crítica com o avanço da hidratação da matriz, sendo que, à medida que a resistência à compressão se eleva, maior foi a força necessária para formar a primeira fissura. Este mesmo comportamento não foi observado com a mesma tendência na força máxima, visto que após a ocorrência das fissuras, somente o têxtil é solicitado e a falha do compósito ocorreu por deficiência na aderência do têxtil com a matriz, como também observado por Williams Portol, Nyholm Thrane e Lundgren (2017).

A maior resistência máxima foi obtida no compósito com duas camadas de têxtil na direção da trama e na idade de 91 dias, sendo 10,2% superior à direção da urdidura. Seguida pela idade de 7 dias, com resultado superior a urdidura em 21,08%, e pela idade de 28 dias, que atingiu resistência 17,53% maior que o têxtil posicionado na orientação da urdidura.

O que acompanhou a tendência do têxtil quando em situação isolada, a direção da trama também apresentou maior resistência à tração em comparação com a urdidura.

Com o intuito de visualizar a formação das fissuras nos corpos de prova após o ensaio de flexão, na Figura 66 à Figura 69 foram reunidas as imagens dos corpos de prova após o ensaio, conforme idade, quantidade de camadas e orientação do têxtil.

Figura 66 – Aspecto final dos corpos de prova com uma camada de reforço AR122 na direção da trama após ensaio de flexão conforme as idades analisadas

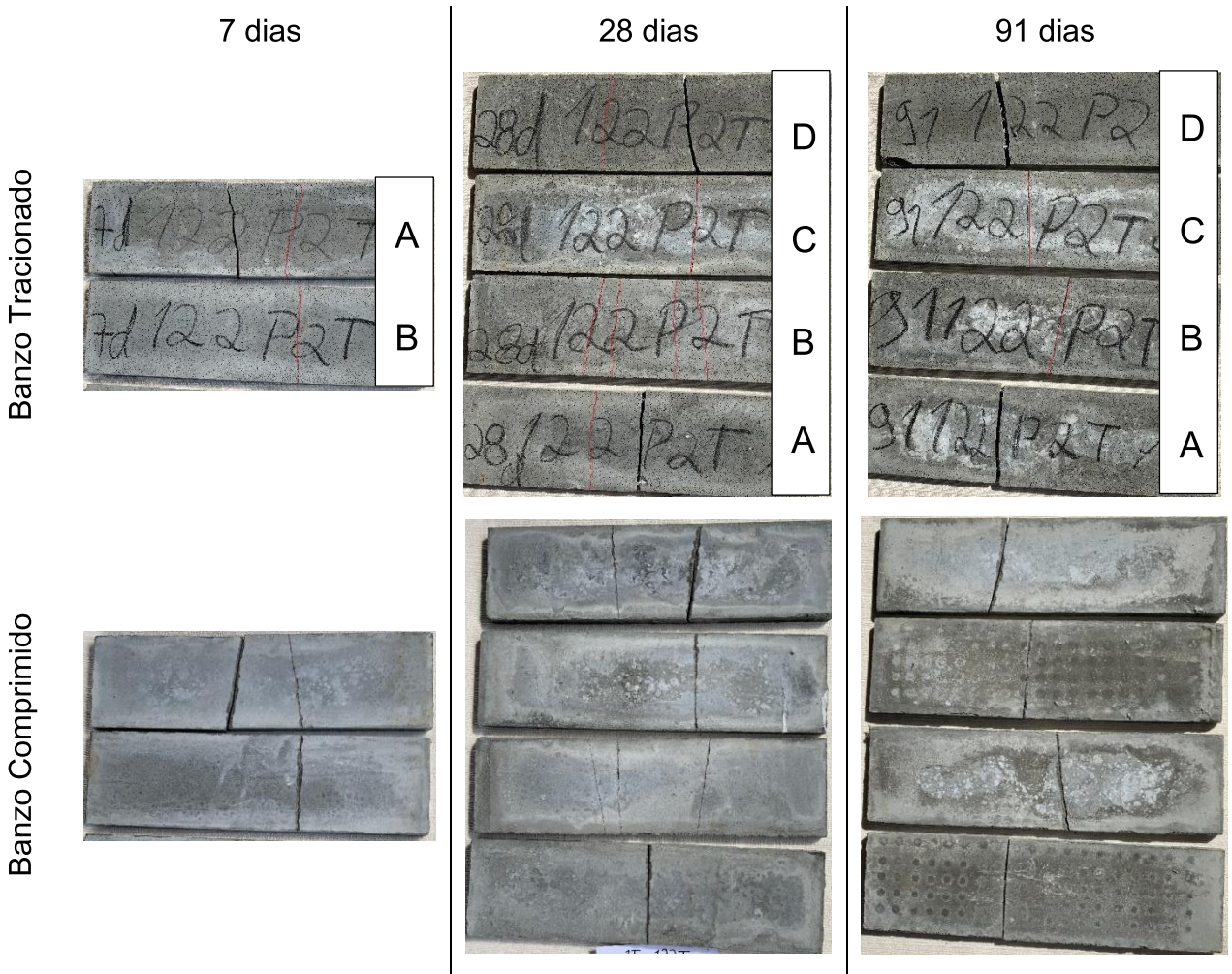


Figura 67 – Aspecto final dos corpos de prova com duas camadas de reforço AR122 na direção da trama após ensaio de flexão conforme as idades analisadas

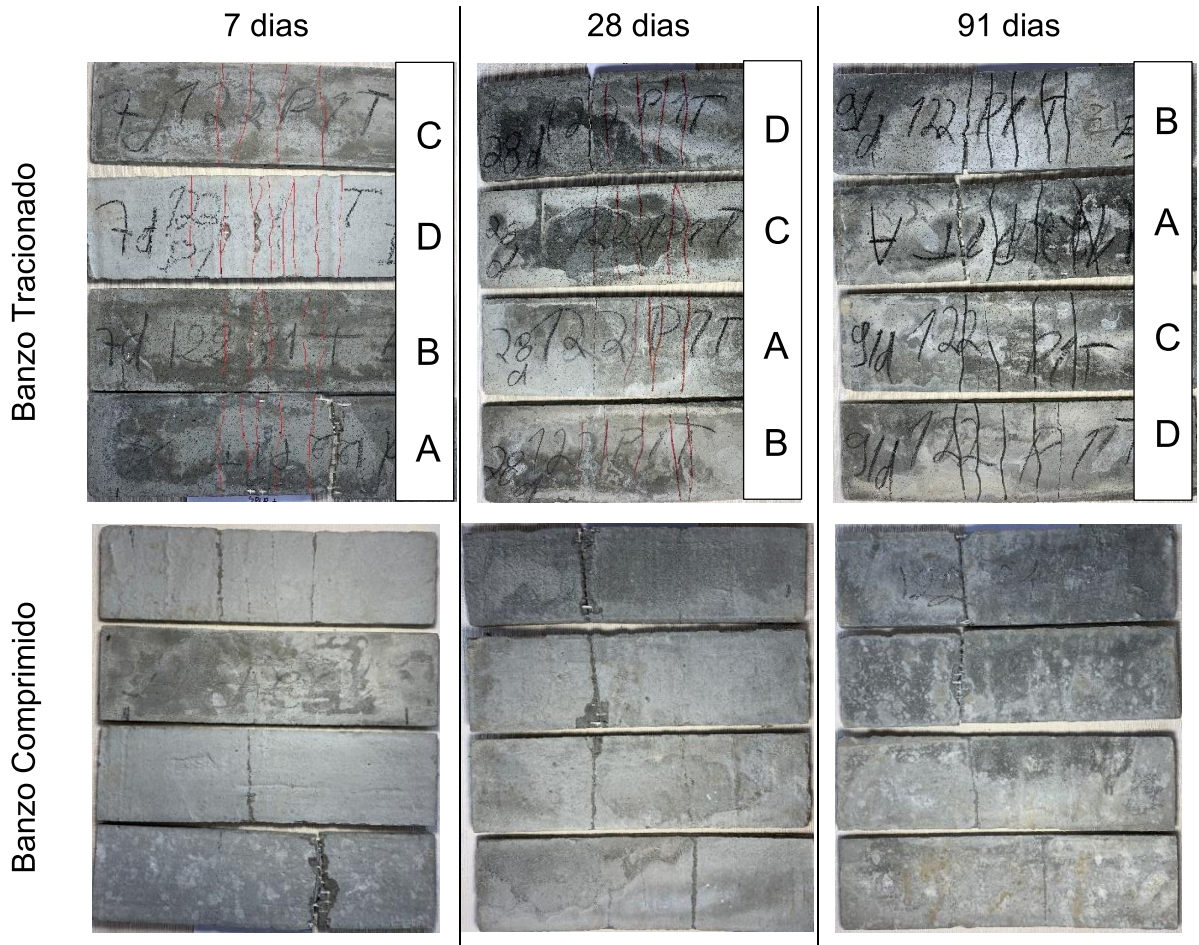


Figura 68 – Aspecto final dos corpos de prova com uma camada de reforço AR122 na direção da urdidura após ensaio de flexão conforme as idades analisadas

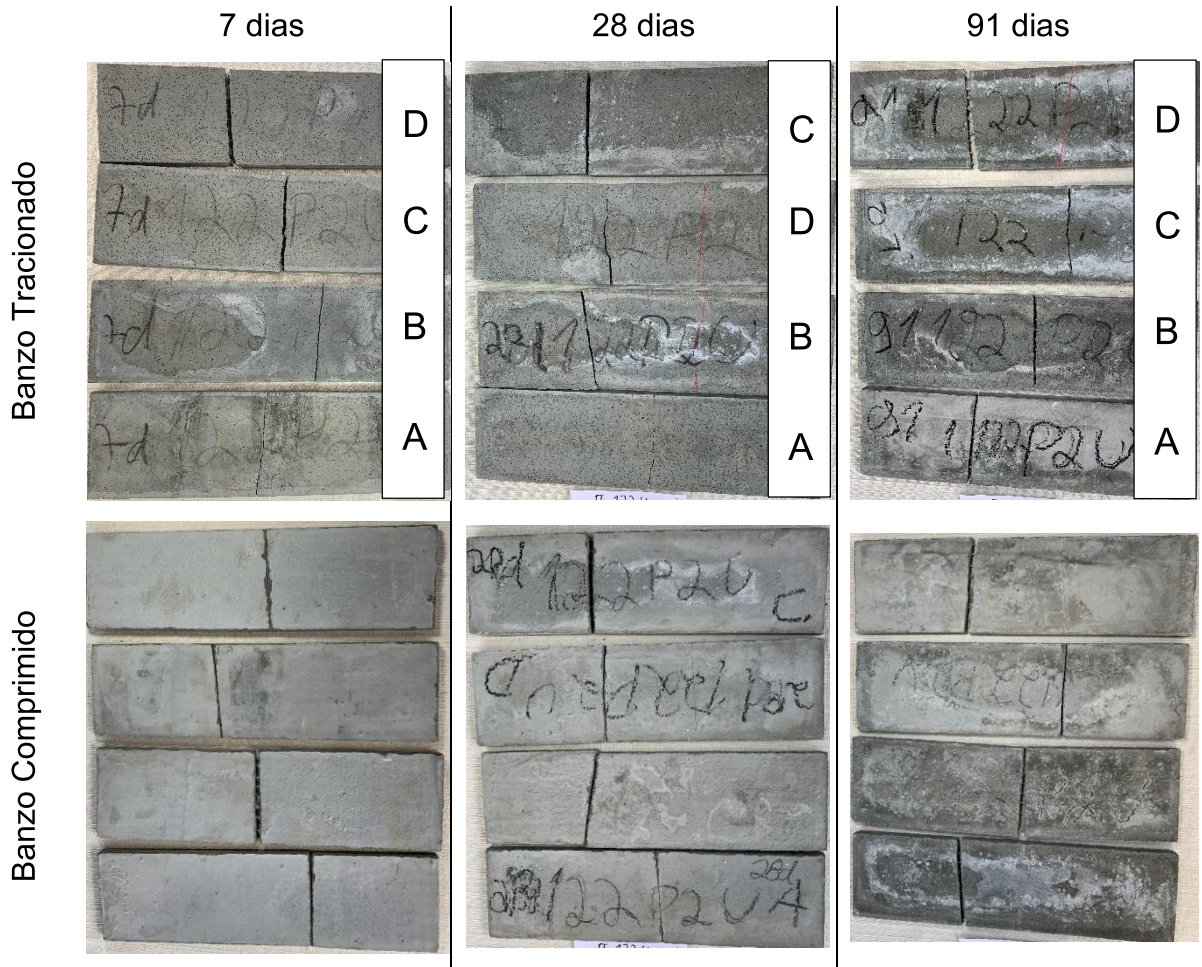
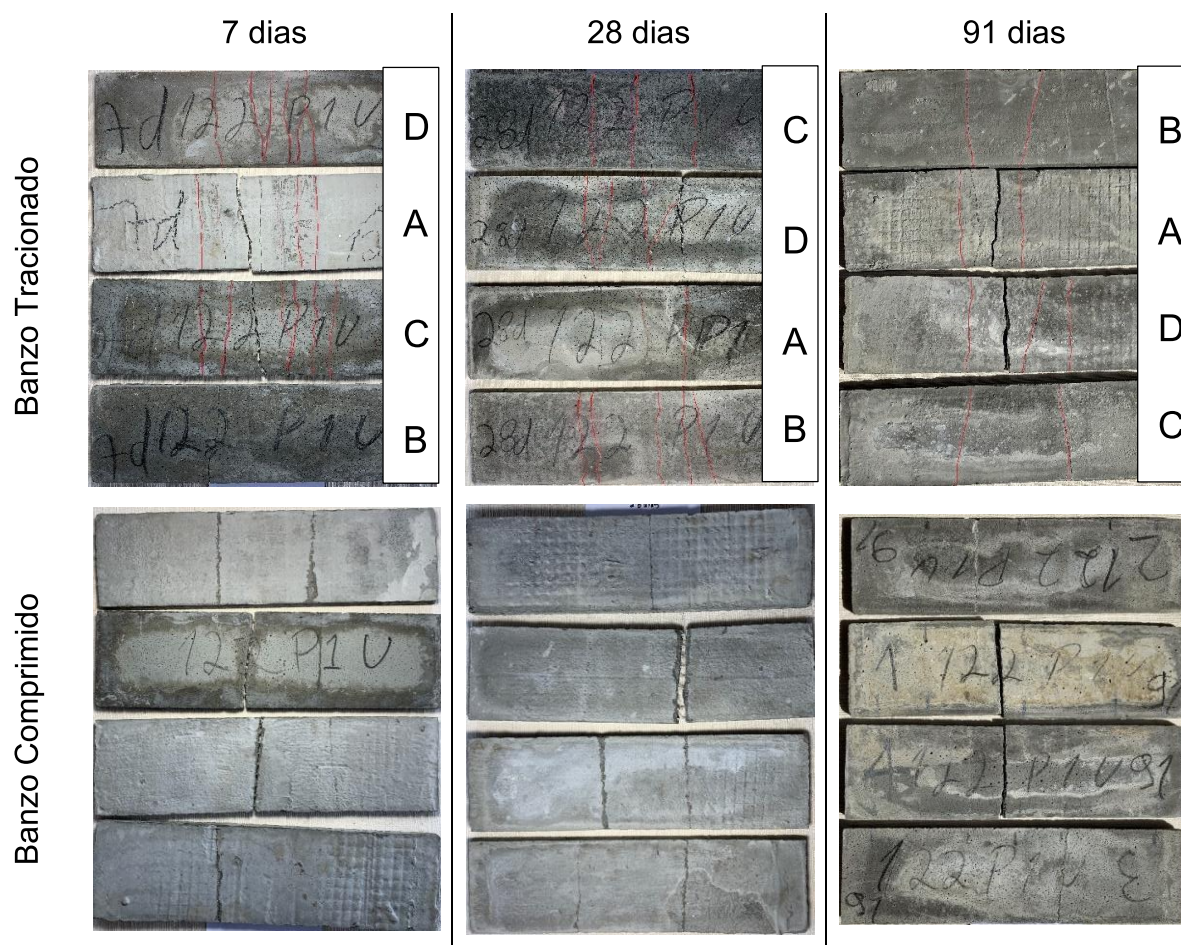
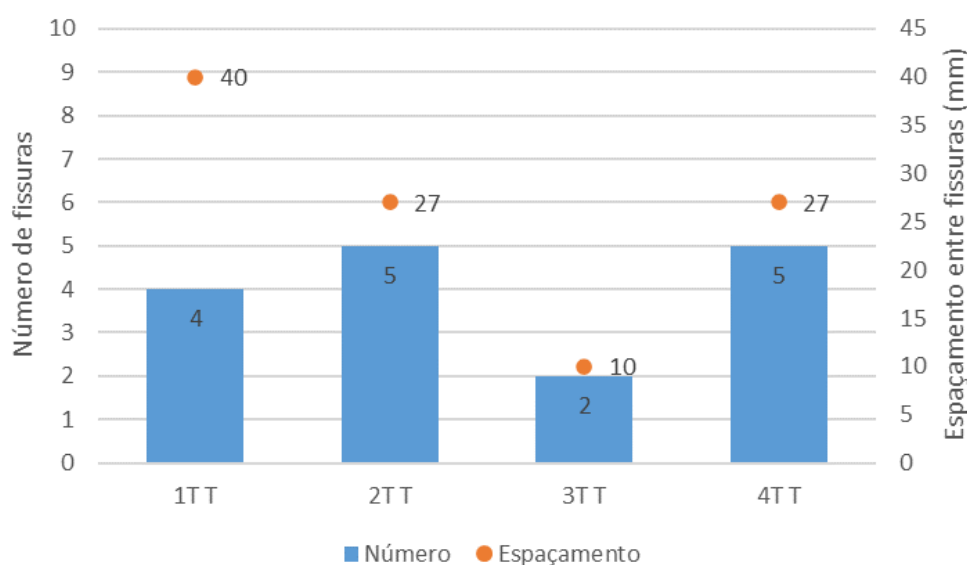


Figura 69 – Aspecto final dos corpos de prova com duas camadas de reforço AR122 na direção da urdidura após ensaio de flexão conforme as idades analisadas



Na Figura 70 são reunidos o número máximo e espaçamento das fissuras dos corpos de prova na idade de 28 dias.

Figura 70 – Número de fissuras e espaçamentos entre fissuras após ensaio de flexão



Foram observadas relações entre as imagens dos corpos de prova após ensaio com a configuração dos diagramas. Houve formação de uma a duas fissuras nos corpos de prova com uma camada de têxtil e nos corpos de prova contendo duas camadas de têxtil, foi desenvolvida a formação de múltiplas fissuras, nas duas situações de orientação do reforço, sendo que a formação das fissuras ocorreu na face tracionada e localizadas no terço médio central.

Importante destacar que não foi observado influência da direção do têxtil na quantidade e espaçamento das fissuras quando reforçado com duas camadas de têxtil.

Em relação a superfície comprimida dos corpos de prova, não foi observado esmagamento da matriz nos compósitos reforçados com uma camada. Por outro lado, nos corpos de prova contendo duas camadas de reforço, houve manifestação de pontuais rupturas da matriz por solicitação de compressão e de forma localizada na fissura de ruptura do corpo de prova. Suspeita-se que a taxa de reforço possa ter influenciado para que a tensão de compressão da matriz fosse alcançada, o que segundo Kamani et al. (2019), os compósitos com duas camadas de têxtil foram caracterizados com situação sub-reforçado.

#### 4.3.1.2.1 Análise estatística

Para que os resultados dos ensaios de flexão fossem mais bem interpretados conforme as distinções adotadas nesta pesquisa, foi realizada análise estatística da

influência da idade de ensaio na resistência à flexão. Para tanto, adotou-se o método de análise de variância (ANOVA), para verificação da existência de diferença significativa entre a resistência máxima e crítica com relação às idades analisadas para cada quantidade de reforço. Os resultados foram dispostos na Tabela 16 e Tabela 17 para os corpos de prova com têxtil na orientação da trama e a Tabela 18 e Tabela 19 para resultados com o têxtil na direção da urdidura.

Os resultados dos corpos de prova com uma camada de têxtil na direção da trama na idade de 7 dias, foram desconsiderados da análise estatística, uma vez que a quantidade de corpos de prova consideradas válidas foi caracterizada como insuficientes para avaliação estatística.

Como os resultados da força crítica dos corpos de prova com uma camada de têxtil na orientação da urdidura foram caracterizadas como resistência máxima, a análise estatística se deu apenas nos resultados da força máxima.

Tabela 16 – Análise de variância da resistência à flexão crítica e máxima dos compósitos reforçados com uma camada do têxtil AR122 na direção da trama

**ANOVA - Resistência Crítica à Flexão**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre idades	16236,02	1	16236,02	1,844111	0,223314	5,987378
Dentro das idades	52825,52	6	8804,253			
Total	69061,54	7				

**ANOVA - Resistência Máxima à Flexão**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre idades	2556,125	1	2556,125	4,291741	0,083696	5,987378
Dentro das idades	3573,55	6	595,5917			
Total	6129,675	7				

Tabela 17 – Análise de variância da resistência à flexão crítica e máxima dos compósitos reforçados com duas camadas do têxtil AR122 na direção da trama

**ANOVA - Resistência Crítica à Flexão**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre idades	17180,36	2	8590,181	6,413695	0,01856	4,256495
Dentro das idades	12054,15	9	1339,35			
Total	29234,51	11				

**ANOVA - Resistência Máxima à Flexão**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre idades	3487,965	2	1743,983	0,65254	0,543701	4,256495
Dentro das idades	24053,46	9	2672,606			
Total	27541,42	11				

Tabela 18 – Análise de variância da resistência à flexão máxima dos compósitos reforçados com uma camada do têxtil AR122 na direção da urdidura.

**ANOVA - Resistência Máxima à Flexão**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre idades	21599,65	2	10799,83	2,608843	0,12775	4,256495
Dentro das idades	37257,3	9	4139,699			
Total	58856,95	11				



Tabela 19 – Análise de variância da resistência à flexão crítica e máxima dos compósitos reforçados com duas camadas do têxtil AR122 na direção da urdidura

**ANOVA - Resistência Crítica à Flexão**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre idades	11807,84	2	5903,918	5,895096	0,023106	4,256495
Dentro das idades	9013,467	9	1001,496			
Total	20821,3	11				

**ANOVA - Resistência Máxima à Flexão**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre idades	8951,432	2	4475,716	1,380624	0,299952	4,256495
Dentro das idades	29176,27	9	3241,807			
Total	38127,7	11				

Ao considerar o nível de significância de 5% e implicando a um nível de confiança de 95%, foi possível observar os resultados da análise estatística para as resistências críticas e máximas, as respectivas interpretações das tipologias foram sintetizadas no Quadro 8.

Quadro 8 – Síntese da análise de variância da resistência à flexão dos compósitos reforçados com o têxtil AR122

Orientação	Nº de camadas	Distinção da análise	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	Interpretação
Trama	1	Resistência crítica	1,844111	0,223314	5,987378	não há diferença significativa
		Resistência máxima	4,291741	0,083696	5,987378	não há diferença significativa
	2	Resistência crítica	6,413695	0,01856	4,256495	<b>há diferença significativa</b>
		Resistência máxima	0,65254	0,543701	4,256495	não há diferença significativa
Urdidura	1	Resistência máxima	2,608843	0,12775	4,256495	não há diferença significativa
	2	Resistência crítica	5,895096	0,023106	4,256495	<b>há diferença significativa</b>
		Resistência máxima	1,380624	0,299952	4,256495	não há diferença significativa

À vista disso, durante o período de análise, não foram observadas influências do tempo de cura na resistência máxima à flexão, por outro lado, se observou diferença significativa da resistência crítica entre os períodos analisados para os corpos de prova contendo duas camadas de têxtil, para ambas as orientações.

Por fim, se analisou de forma estatística a colaboração da orientação do têxtil na resistência à flexão, para tanto, foi verificado se há diferença significativa entre os resultados de resistência máxima à flexão com as orientações do têxtil e as idades de cura analisadas, para isto, também se utilizou do método de análise de variância

(ANOVA). A Tabela 20 reúne os resultados da análise estatística para os compósitos com uma camada e a Tabela 21 para os com duas camadas.

Tabela 20 – Análise de variância da resistência à flexão máxima dos compósitos reforçados com uma camada do têxtil AR122 entre as direções de reforço

**ANOVA - Resistência Máxima à Flexão**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Sentido do reforço	1232,667	1	1232,667	0,184481	0,673278	4,493998
Entre amostras	5371,97	3	1790,657	0,26799	0,847501	3,238872
Interações	4170,15	3	1390,05	0,208035	0,88934	3,238872
Dentro	106908,9	16	6681,805			
Total	117683,7	23				

Tabela 21 – Análise de variância da resistência à flexão máxima dos compósitos reforçados com duas camadas do têxtil AR122 entre as direções de reforço

**ANOVA - Resistência Máxima à Flexão**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Sentido do reforço	34299,72	1	34299,72	9,439109	0,00729	4,493998
Entre amostras	4850,571	3	1616,857	0,444951	0,724183	3,238872
Interações	2677,941	3	892,6471	0,245652	0,8632	3,238872
Dentro	58140,61	16	3633,788			
Total	99968,84	23				

Os resultados da análise estatística da relação, entre as resistências máximas e as orientações do têxtil, foram obtidos considerando um nível de significância de 5% e um nível de confiança de 95%.

A vista disso, os resultados estatísticos demonstraram que o sentido do têxtil não interferiu significativamente na resistência máxima à flexão, quando em compósitos reforçados com apenas uma camada de têxtil. E que a orientação do têxtil interferiu significativamente na resistência máxima à flexão, quando em compósitos reforçados com duas camadas de reforço.

#### 4.3.1.3 Síntese dos resultados

Os resultados experimentais demonstram que, tanto a resistência máxima à flexão quanto à tração direta dos TRC reforçados com têxtil AR122, aumentaram com o número de camadas de reforço, para ambas as situações de orientação do têxtil.

Nos compósitos reforçados com duas camadas de têxtil AR122, independentemente da direção, os comportamentos mecânicos obtidos nos ensaios de resistência à flexão e tração direta apresentaram aumento da carga após surgimento da primeira fissura, além de terem ocorrido a formação de múltiplas fissuras, seguido pela redução gradativa da carga, características que qualificaram os compósitos com propriedades satisfatórias de concreto têxtil.

Sendo assim, os compósitos reforçados com uma camada de têxtil para ambas as orientações, foram caracterizados com propriedades que não qualificam o reforço com comportamento característico de concreto têxtil. Dado que, os corpos de prova não apresentaram manifestação de múltiplas fissuras, tampouco demonstraram atuação nos estágios característicos do concreto têxtil. De modo geral, os corpos de prova com apenas uma camada de têxtil a resistência do compósito foi igual, ou levemente superior a resistência de fissuração da matriz, tanto à flexão como à tração direta.

Com relação a idade de cura da matriz, não houve influência de modo significativo na resistência máxima à flexão, pois os resultados obtidos durante o período de análise, não foram significativamente diferentes. O mesmo pôde ser observado nas análises de resistência à tração direta.

Por fim, ao se tomar como base os resultados do comportamento à flexão, a força média máxima aos 28 dias dos compósitos reforçados com duas camadas na direção da trama atingiu resistência 17,53% superior aos compósitos reforçados com orientação para a urdidura. Sendo que esta diferença possui caráter estatisticamente significativo.

Tendência similar também foi observado nos resultados do ensaio à tração direta, nos compósitos contendo duas camadas do têxtil posicionados com a orientação da trama paralela ao esforço principal, a resistência máxima na idade de 28 dias foi 31,63% superior à resistência máxima na orientação da urdidura.

Como o fio na direção da trama apresentou maior resistência à tração e maior módulo de elasticidade em relação a urdidura, quando inserido como reforço na matriz

cimentícia contendo duas camadas de têxtil, os compósitos apresentaram desempenho mecânico satisfatório.

#### **4.3.2 Têxtil AR192**

Os corpos de prova reforçados com o têxtil AR192 foram analisadas para as diferentes orientações e quantidades de camadas de têxtil, o comportamento mecânico quanto a resistência à tração direta e à flexão.

##### **4.3.2.1 Resistência à tração direta**

Os resultados médios dos corpos de prova considerados válidos reforçadas com o têxtil AR192, quanto ao comportamento à solicitação de tração direta, estão apresentados na Tabela 22, conforme a quantidade e orientação do têxtil e a idade de cura da matriz cimentícia. As quantidades de uma, duas, três e quatro camadas do têxtil analisada, totalizam, respectivamente, as taxas de reforço, 0,287%, 0,575%, 0,862% e 1,15%.

Os valores individuais de todos os corpos de prova estão dispostos no Apêndice C.

Tabela 22 – Valores médios referentes aos resultados da resistência à tração direta dos compósitos reforços com o têxtil AR192

Sentido do reforço	Número de camadas	Idade do ensaio (dias)	$\sigma_{c,cr}$ (MPa)	$\sigma_{cu}$ (MPa)	$\sigma_{t,cr}$ (MPa)	$\sigma_{tu}$ (MPa)
Trama	1	7	2,44	3,70	848,70	1.288,70
	1	28	3,51	3,98	1.222,61	1.384,35
	1	91	2,57	3,03	893,91	1.053,91
	2	7	2,80	6,96	486,96	1.210,43
	2	28	3,13	6,00	543,77	1.044,06
	2	91	3,43	6,00	596,52	1.043,48
	3	28	3,52	7,75	408,12	898,84
	4	28	2,74	10,07	238,26	875,65
Urdidura	1	7	3,60	3,60	1.251,01	1.251,01
	1	28	1,90	2,60	660,87	902,61
	1	91	1,66	2,72	578,55	947,25
	2	7	3,65	6,08	635,36	1.057,97
	2	28	3,07	6,15	533,91	1.068,70
	2	91	3,85	5,90	670,14	1.026,67
	3	28	5,31	8,61	615,65	998,26
	4	28	3,65	9,67	317,17	840,87

Legenda:  $\sigma_{c,cr}$  tensão crítica do compósito.  $\sigma_{cu}$  tensão máxima do compósito.  $\sigma_{t,cr}$  tensão crítica do reforço.  $\sigma_{tu}$  tensão máxima do reforço.

Os resultados desconsiderados no cálculo do valor médio, foram os que sofreram interrupção do ensaio em decorrência do escorregamento dos corpos de prova nos suportes metálicos, o que impossibilitou as leituras das deformações longitudinais.

Diante dos resultados obtidos, se percebeu variações dos valores da tensão de tração entre as tipologias estudadas, além do mais, houve influência da quantidade de camadas no comportamento mecânico e na resistência máxima.

Nos resultados médio da tensão crítica, valor necessário para gerar a primeira fissura, foi percebido semelhança de comportamento com os compósitos contendo o têxtil AR122, pois em todas as idades ensaiadas, para ambas as orientações do têxtil e quantidade de camadas, os valores foram inferiores à tensão máxima, o que

conforme Peled (2016), pode ser caracterizado como atuação do têxtil como reforço frente à solicitação de tração na promoção do aumento da resistência após a formação da primeira fissura.

Observou-se, também, variação da tensão crítica conforme o avanço da idade de cura, uma vez que aos 91 dias a resistência foi superior às idades iniciais, pois como neste estágio inicial não há ocorrência de fissura, pois de acordo com Yao et al. (2015), apenas a matriz é solicitada, e não há influência do reforço, dado que não foi observado aumento da tensão crítica com o aumento do número de camadas, quando considerado a idade de 28 dias.

Por outro lado, a tensão máxima não seguiu a mesma tendência de crescimento com o avanço da idade, pois na idade de 91 dias o valor médio não necessariamente foi maior frente as idades iniciais. Foi observado a influência da quantidade de camadas no aumento da tensão máxima e não a idade de cura da matriz.

Suspeita-se que a variação das resistências máximas entre as idades pode ter sido motivada pelas limitações de fixação da amostra e não pela possibilidade do ambiente alcalino ter deteriorado o têxtil de vidro AR, visto que, conforme Zani et al., (2019), a tensão máxima é preferencialmente guiada pela capacidade do têxtil em resistir os esforços.

Por entender que durante o período de análise, a idade não influenciou nos resultados de resistência máxima quando solicitado à tração, sendo assim, adotou-se a idade de 28 dias para análise da resistência à tração de corpos de prova contendo três e quatro camadas de têxtil.

Ao relacionar os resultados dos corpos de prova com a quantidade de camadas do têxtil com a resistência máxima, percebeu-se aumento no valores médios, a medida que aumentou a quantidade de camadas do têxtil, no entanto, não necessariamente na mesma proporção, como destacado por Colombo et al. (2013) e Du et al. (2017), quando considerado a área do compósito. Por outro lado, ao considerar a tensão de tração como quociente da força com a área do têxtil, a resistência não acompanhou a mesma tendência quando considerada a área do compósito, pois a força máxima não apresentou aumento na mesma proporção que a taxa de reforço.

A influência da quantidade de camadas de têxtil apresentou comportamento como esperado, dado que, nos elementos com duas ou mais camadas de têxtil, a

formação da primeira fissura foi retardada em comparação aos compósitos com apenas uma camada, de acordo com SIlva e Silva (2020), motivado pelo confinamento gerado pelas camadas de têxteis na porção central da espessura da matriz.

Com relação da tensão máxima sob influência da quantidade de camadas do têxtil, os corpos de prova contendo duas, três e quatro camadas do têxtil na orientação da trama, foram respectivamente 50,75%, 94,72% e 153,01% maiores que o compósito com apenas uma camada. A mesma tendência foi observada com os corpos de prova reforçados com duas, três e quatro camadas do têxtil na direção da urdidura, os quais atingiram respectivamente, valores superiores em 136,54%, 231,15% e 271,92% em relação ao valor médio do compósito com apenas uma camada.

No que tange a influência da orientação do têxtil na resistência máxima na idade de 28 dias, foi observado que na situação de uma camada, a trama atingiu valor 53,08% maior que a resistência na direção da urdidura, esta mesma tendência também foi observada na composição de quatro camadas de reforço, com resultado 4,13% maior para a direção da trama. Em contrapartida, nas quantidades de duas e três camadas de têxtil na orientação da urdidura alcançaram valores respectivos de 2,50% e 11,10% superiores a direção da trama.

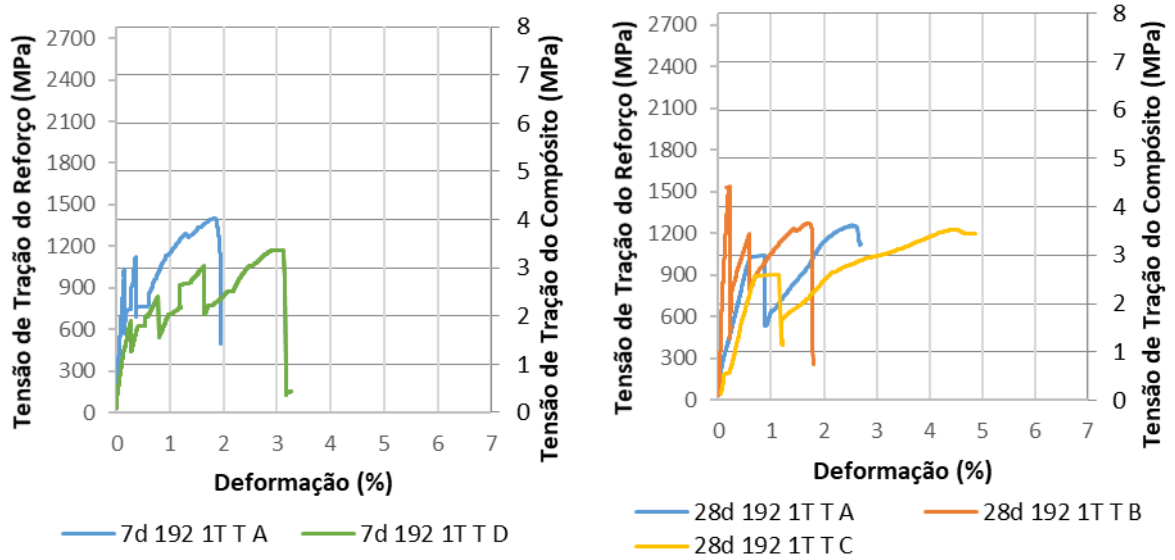
Por não se ter identificado tendência predominante na influência da orientação do têxtil na resistência máxima para a idade de 28 dias, sendo assim, foi possível indicar que a orientação do têxtil parece não ter influenciado no desempenho à tração, resultados contrariam os obtidos por Hegger et al. (2006) e Zani et al. (2019).

Desta forma, a geometria do fio, bem como o processo de produção do têxtil AR192, parecem não ter influenciado na resistência à tração, o que contraria os resultados de Haik, Adiel Sasi e Peled (2017).

Em relação ao comportamento mecânico dos corpos de prova, frente a deformação sob influência da tensão, os diagramas tensão *versus* deformação apresentados na Figura 71 à Figura 75 ilustram a configuração individual dos corpos de prova considerados válidos.

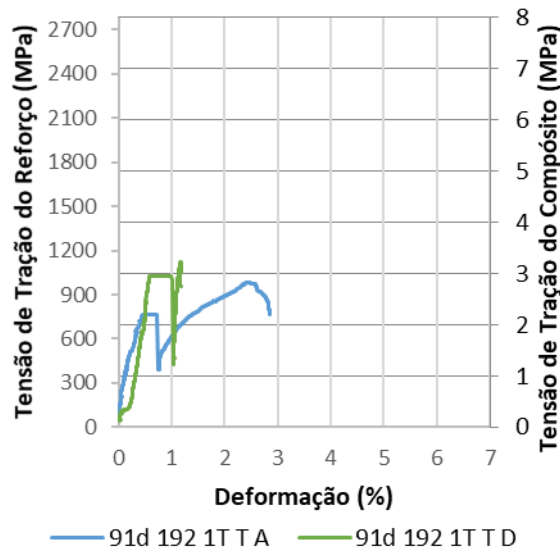


Figura 71 – Diagramas da tensão de tração *versus* deformação do TRC com uma camada do AR192 na direção da trama nas idades (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias



(a)

(b)



(c)

Figura 72 – Diagramas da tensão de tração *versus* deformação do TRC com uma camada do AR192 na direção da urdidura nas idades (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias

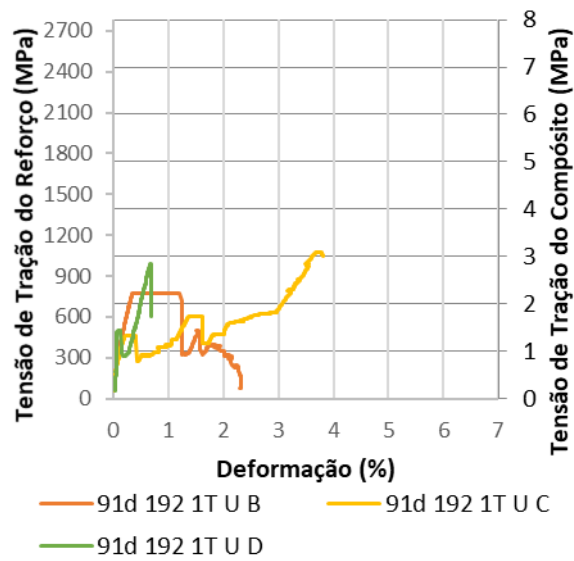
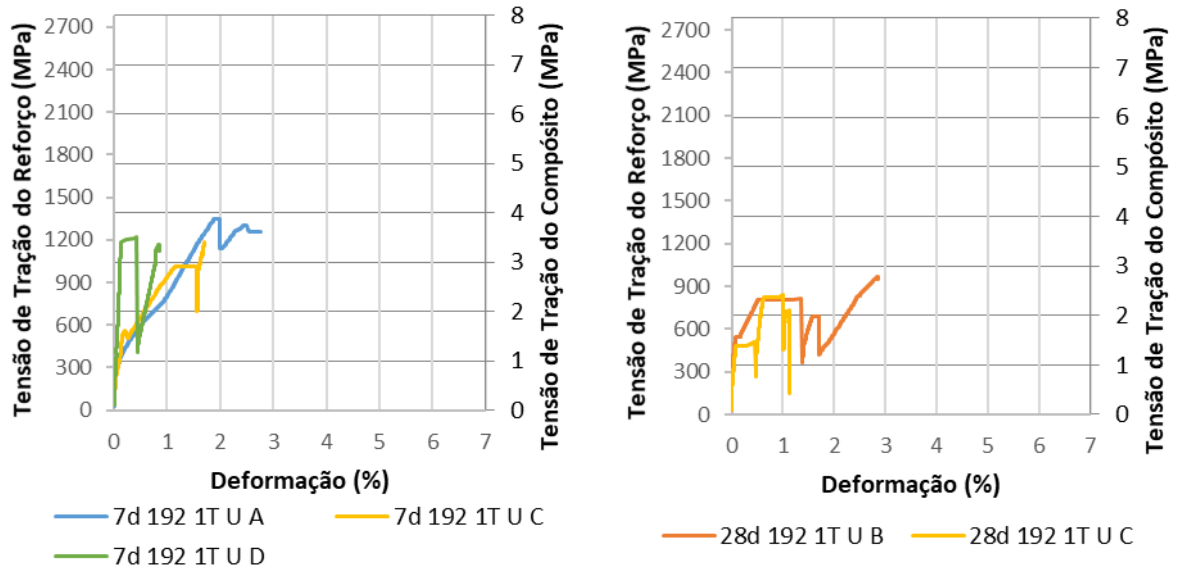


Figura 73 – Diagramas da tensão de tração *versus* deformação do TRC com duas camadas do AR192 na direção da trama nas idades (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias

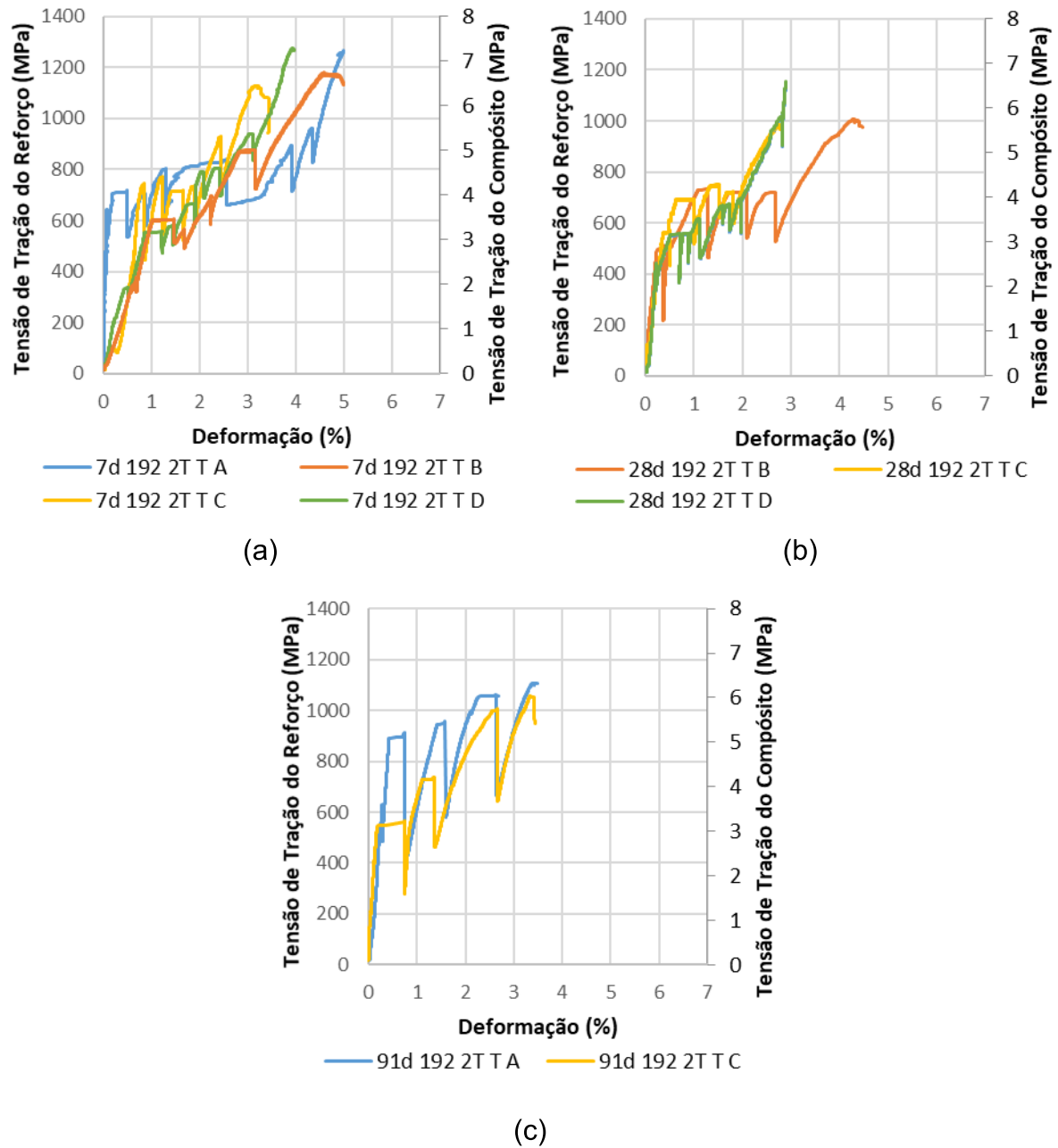
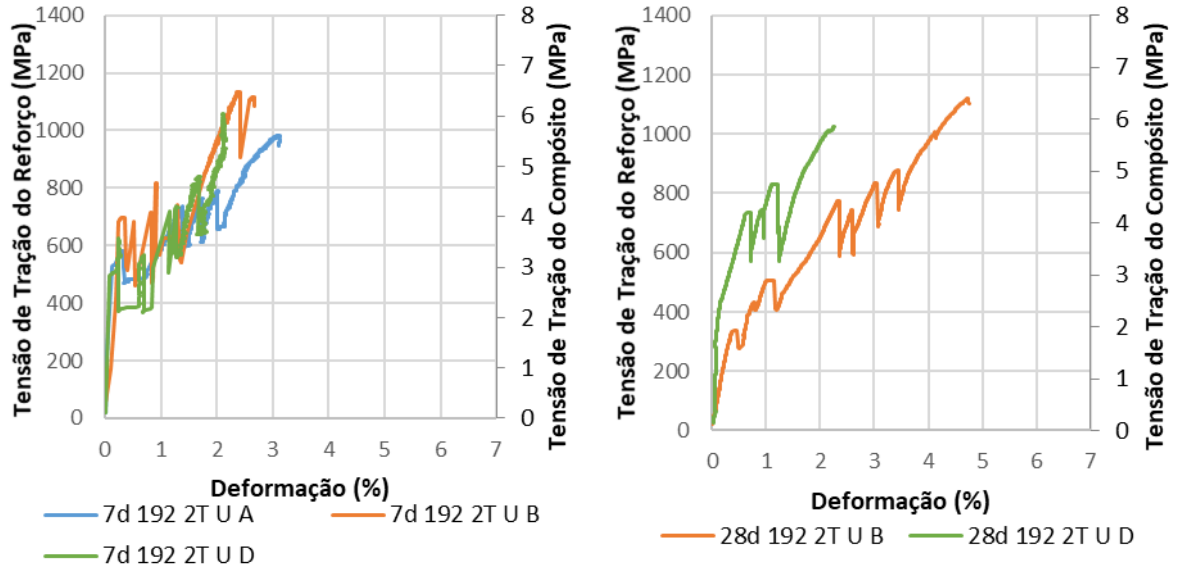
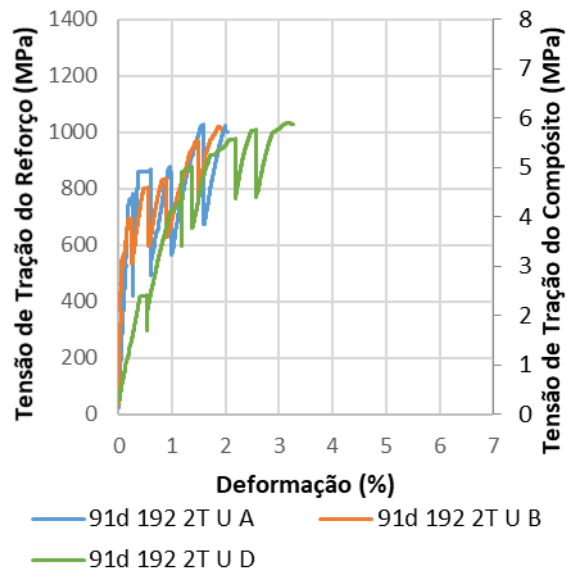


Figura 74 – Diagramas da tensão de tração *versus* deformação do TRC com duas camadas do AR192 na direção da urdidura nas idades (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias



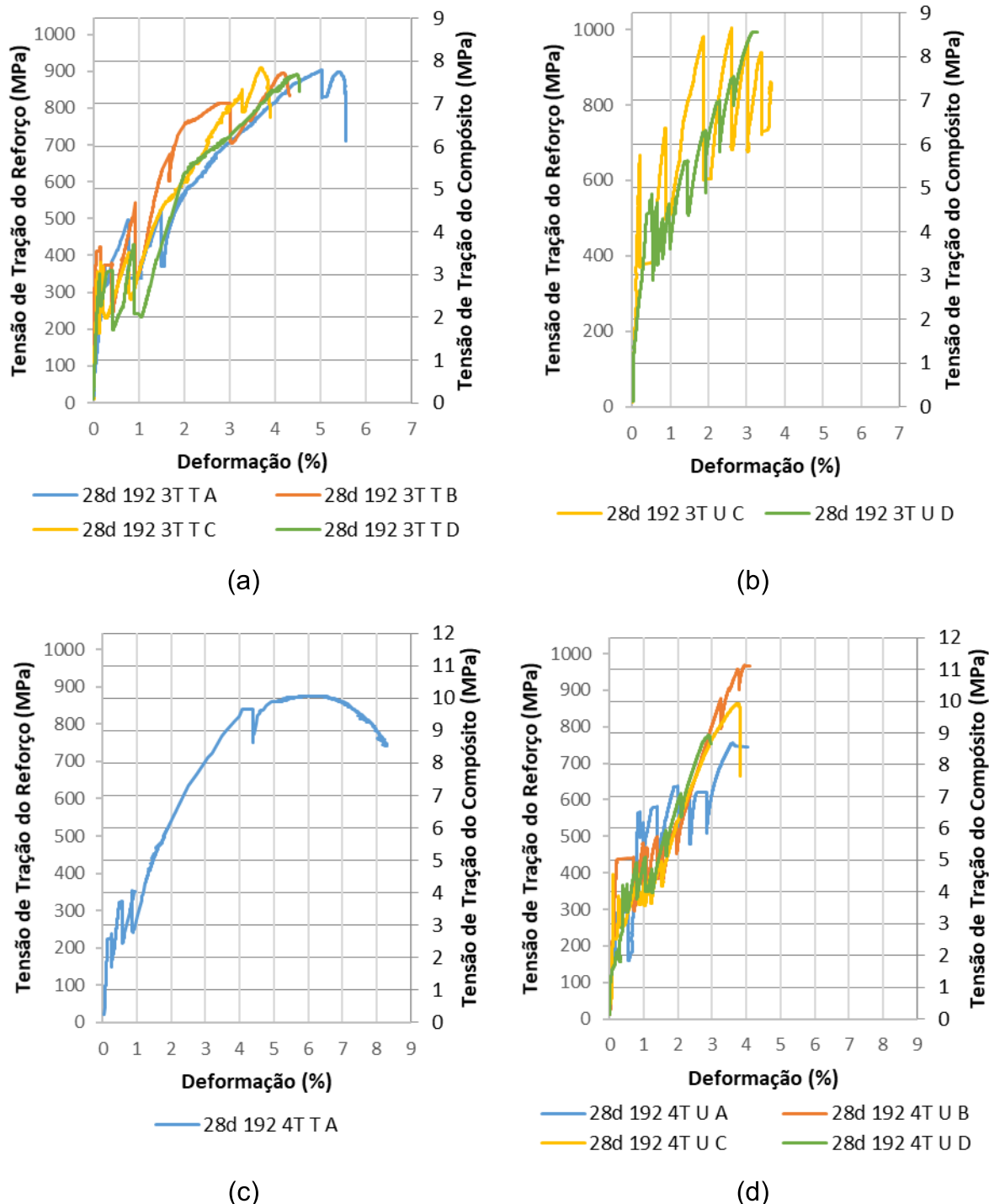
(a)

(b)



(c)

Figura 75 – Diagramas da tensão de tração *versus* deformação do TRC com têxtil AR192 na direção (a) trama com três camadas; (b) urdidura com três camadas; (c) trama com quatro camadas e (d) urdidura com quatro camadas



O comportamento observado em todos os corpos de prova foram destacados, de forma análoga, aos estágios relacionados por Peled; Bentur; Mobasher (2017) e

segundo Hegger et al. (2006a), apresentaram semelhanças ao comportamento de material do tipo dúctil.

Todos os corpos de prova apresentaram comportamento inicial como esperado, com formação de uma reta linear, sem ocorrências de fissuras, com subsequente formação de fissura e rompimento do compósito, independentemente das distinções analisadas.

No estágio inicial, na situação pré-fissura, o comportamento dos corpos de prova atuou no regime elástico linear, situação, de acordo com Du et al. (2017), apenas a matriz exerceu reação ao esforço externo de tração, após a formação da primeira fissura, o têxtil foi solicitado. A formação da primeira fissura pôde ser observada nos diagramas com a queda abrupta da tensão seguido pelo aumento da carga com contínuo progresso da deformação.

Nos compósitos com apenas uma camada têxtil, para ambas as orientações do têxtil, a ruptura se desenvolveu sem a ocorrência do estágio 2, pois não foram observadas quedas abruptas da tensão no diagrama, que pudessem ser relacionadas com a formação de múltiplas fissuras, consecutivamente, a falha ocorreu com apenas uma fissura. Com a formação da fissura o comportamento pós fissura foi relacionado ao estágio 3, pois não houve surgimento de novas fissuras, apenas abertura da fissura existente aumentou e a capacidade suporte foi atribuído ao têxtil.

Ao ser analisada a ocorrência de apenas uma fissura, conforme Colombo et al., (2013) e Yao et al. (2015), é presumível que a acentuada liberação de energia para formação da primeira fissura, não permitiu a redistribuição das tensões entre a matriz e o têxtil, o que resultou na ruptura do compósito sem ocorrências de fissuras uniformemente espaçadas.

Por este comportamento, essa tipologia de apenas uma camada de têxtil, de acordo com Zani et al. (2019), não foi considerada com características que representam a lei constitutiva simplificada do concreto têxtil. O que segundo Silva e Silva (2020), as condições de contorno, a geometria do corpo de prova, bem como a taxa de reforço não foram eficientes. Além do mais, em geral, em consoante com Du et al. (2017), a quantidade de uma camada de têxtil não apresentou capacidade de atuação como reforço.

De forma genérica, nos corpos de prova com duas ou mais camadas de têxtil, após a formação da primeira fissura, nos diagramas tensão versus deformação, ocorreram quedas abruptas da tensão, com aumento da deformação em um patamar

de carga razoavelmente constante. Por efeitos da aderência do reforço com a matriz, após a formação da primeira fissura, segundo Du et al., (2017), o têxtil distribuiu a carga para a matriz, até que a tensão crítica da matriz fosse alcançada, o que resultou em novas fissuras.

Dessa forma os corpos de prova reforçados com duas, três e quatro camadas de reforço, em ambas as orientações do têxtil, de acordo Butler, Mechtcherine e Hempel (2010), manifestaram ocorrência dos 3 estágios distintos, característicos de comportamento do TRC. O que segundo Peled, Mobasher e Bentur (2017), pode ser então caracterizado como comportamento mecânico de caráter satisfatório, visto que, representam a lei constitutiva do concreto têxtil quando solicitado à tração direta.

Ainda assim, o comportamento mecânico dos corpos de prova contendo duas camadas do têxtil, para ambas as orientações, apresentaram semelhanças, tanto no que tange a configuração dos diagramas, quanto na proximidade com os valores obtidos por De Munck et al. (2018).

Os aspectos finais de ruptura dos corpos de prova após ensaio são apresentados na Figura 76, Figura 77 e Figura 78, respectivamente com uma, duas, três e quatro camadas de têxtil, sendo possível visualizar o local de formação de fissura e a configuração de ruptura.

Figura 76 – Aspecto final dos corpos de prova de TRC com uma camada de têxtil AR122 após ensaio de tração conforme idade de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias

AR192 1T T



(a)

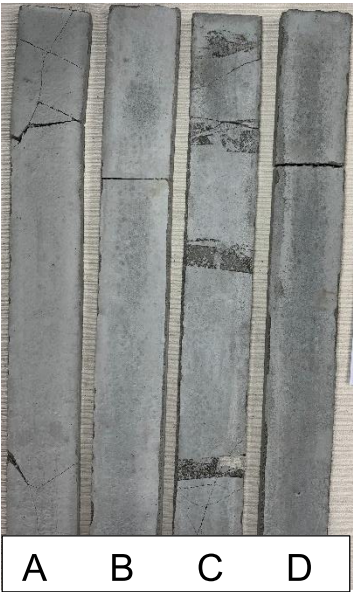


(b)



(c)

AR192 1T U



(a)



(b)



(c)



Figura 77 – Aspecto final dos corpos de prova de TRC com duas camadas de têxtil AR122 após ensaio de tração conforme idade de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias

AR192 2T T



(a)



(b)

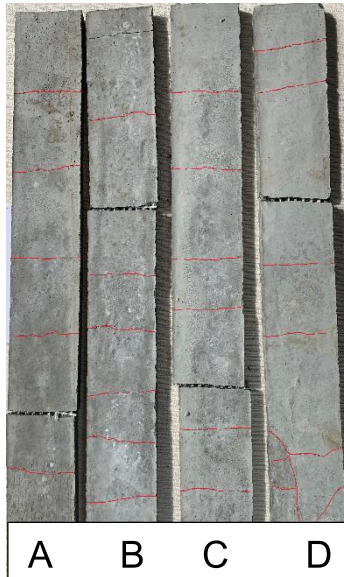


(c)

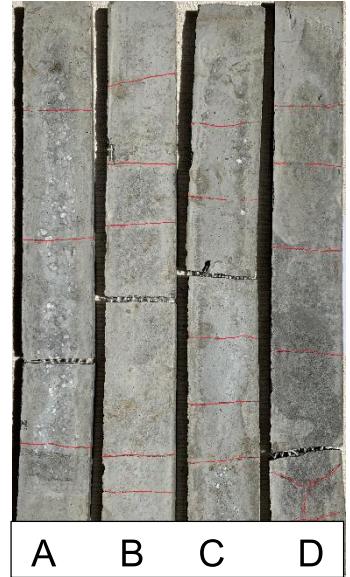
AR192 2T U



(a)



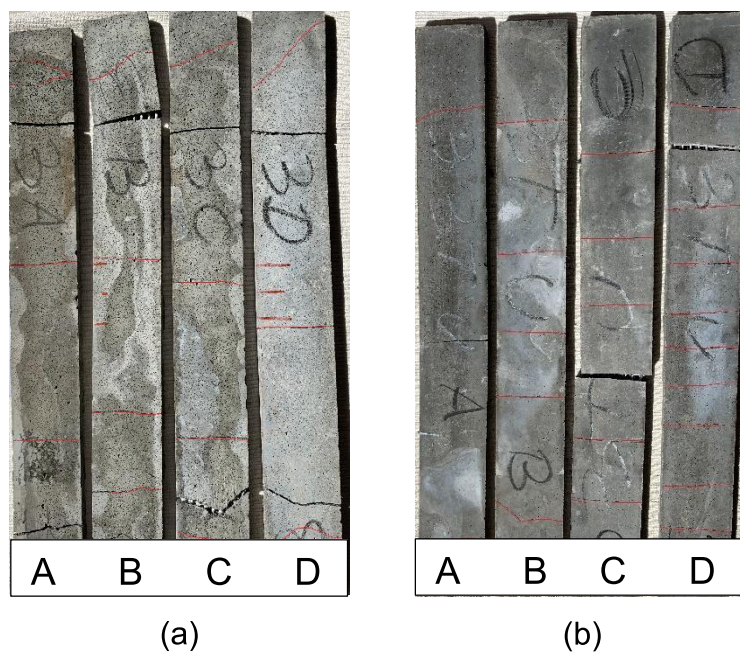
(b)



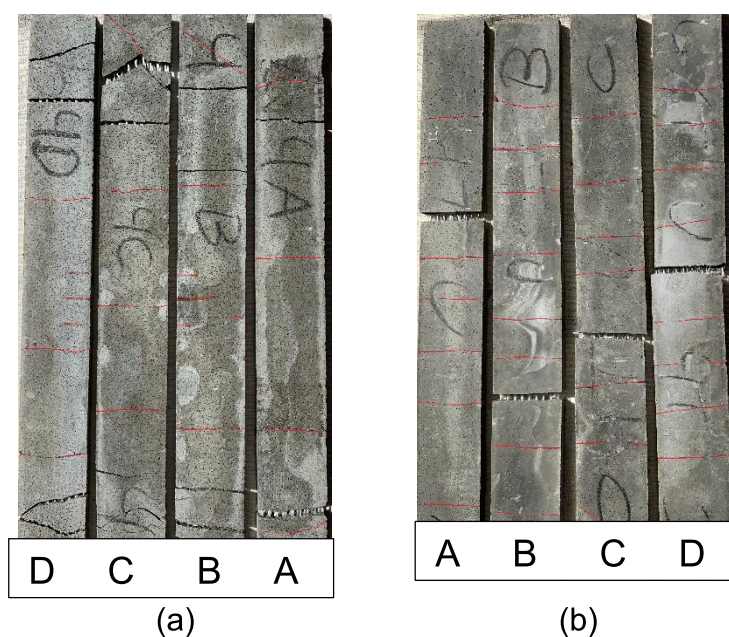
(c)

Figura 78 – Aspecto final dos corpos de prova de TRC com três e quatro camadas de têxtil AR122 após ensaio de tração nas orientações do têxtil (a) trama (b) urdidura

AR192 3T



AR192 4T



Como observado nos diagramas tensão *versus* deformação, os comportamentos finais dos corpos de prova ensaiados à tração direta contendo uma camada de têxtil demonstram a não ocorrência de múltiplas fissuras. Visto que a falha nos corpos de prova ocorreram com manifestação de apenas uma ou duas fissuras, o que segundo Zani et al. (2019) os resultados experimentais podem ser considerados

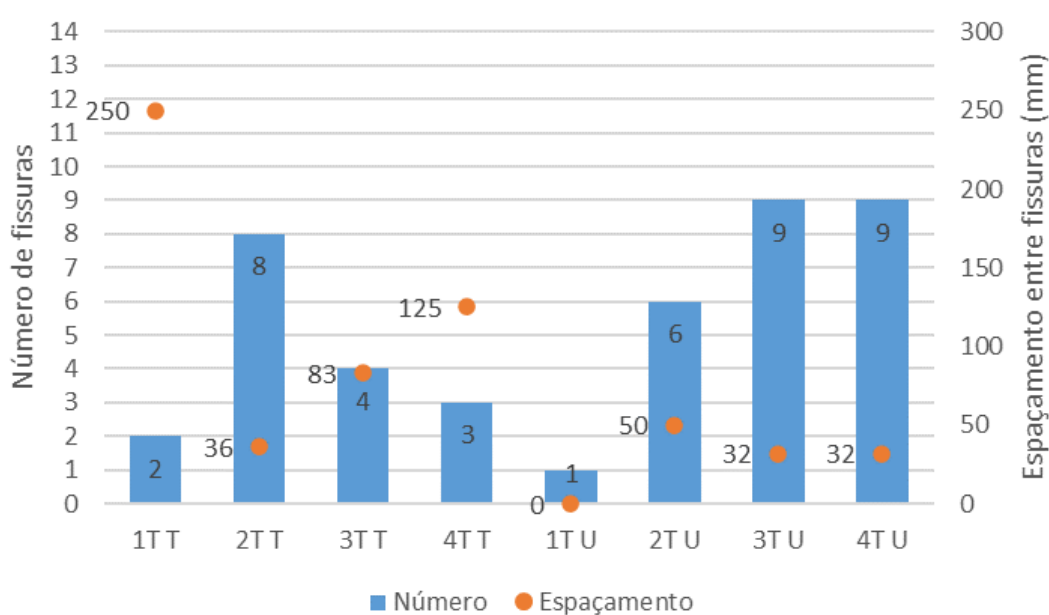
insatisfatórios, do ponto de vista de satisfação ao comportamento característico de fissuração do concreto têxtil.

Enquanto que nos corpos de prova reforçados com duas, três e quatro camadas houve formação de múltiplas fissuras, dado que se desenvolveu manifestação de fissuras perpendiculares ao comprimento do corpo de prova regularmente espaçamento por entre a região de fixação, o que segundo Zani et al. (2019), a formação das fissuras validou os resultados postados nos diagramas.

Em alguns corpos de prova, foi observado fissuras na região de fixação do suporte metálico por excesso do esforço de compressão gerado pelas placas metálicas de fixação, de acordo com Schütze, Lorenz e Curbach, (2015), a ocorrência foi motivada em razão da ausência no controle do torque no aperto dos parafusos, o que desenvolveu esforços superiores ao limite de compressão da matriz, resultando em prejuízos na determinação da deformação dos exemplares durante o ensaio.

Algumas considerações sobre a formação das fissuras e o espaçamento foram desenvolvidas com base nas observações dos corpos de prova após ensaio de tração, a Figura 79 apresenta a quantidade de fissuras, bem como o espaçamento nos corpos e prova ensaiados aos 28 dias.

Figura 79 – Número de fissuras e espaçamentos entre fissuras



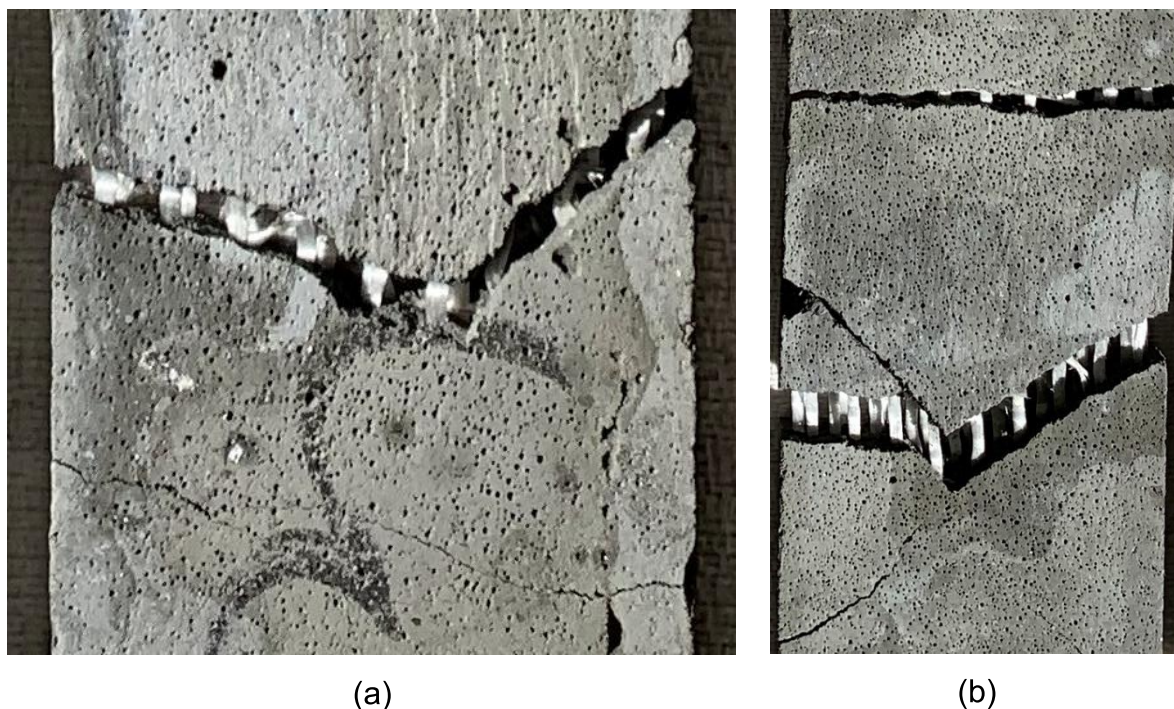
De modo geral, conforme Du et al. (2017), houve um padrão na formação das fissuras, em maior quantidade e espaçamento reduzido com o aumento do número de camadas de têxteis na orientação da urdidura.

Com uma camada de têxtil, em ambas as direções, os corpos de prova apresentaram uma e duas fissuras, no entanto, com duas ou mais camadas, foram observadas diversas fissuras. Com duas camadas, a direção da trama apresentou maior quantidade de fissuras e menor espaçamento quando comparado com a direção da urdidura. Em contrapartida, nos corpos de prova com três e quatro camadas de têxtil na direção da urdidura apresentaram maior quantidade de fissuras menos espaçadas em relação aos corpos de prova com têxtil na direção da trama.

Nos compósitos reforçados na direção da trama contendo três e quatro camadas, desenvolveram fissuras com maior espaçamento entre si e em menor quantidade, em comparação aos corpos de prova com duas camadas, o que pode ser relacionado à deficiência de aderência do têxtil com a matriz. Além do mais, nestas tipologias de reforço, foram observadas fissuras mais pronunciadas e com maior abertura, além da falha do corpo de prova ter ocorrido sem a ruptura total do têxtil.

A Figura 80 demonstra a fissura pronunciada com expressivo escorregamento do têxtil nos corpos de prova com três e quatro camadas do têxtil na orientação da trama.

Figura 80 – Aspecto do escorregamento do reforço no sentido da trama com (a) três camadas e (b) quatro camadas



Os resultados do escorregamento do têxtil corroboram com os observados por Zani et al. (2019), uma vez que o reforço posicionado na direção da trama, ocorreu maior deformação resultado do maior escorregamento do têxtil.

O melhor desempenho frente a aderência foi manifestado com o reforço na direção da urdidura, pois segundo Colombo, (2015), a ligação foi promovida pelos fios da trama que estão enlaçados perpendicularmente entre os fios da urdidura, o que minimizou o escorregamento dos fios da urdidura.

Outro fator que auxilia na minoração do escorregamento dos fios na direção da urdidura, para Valeri, Fernández Ruiz e Muttoni (2020), foi a configuração ondulada do fio da urdidura, que se manteve quando solicitada à tração em decorrência do confinamento gerado pela matriz, o que auxiliou na potencialização da ligação do fio com a matriz.

O comportamento desenvolvido pelos compósitos com três e quatro camadas do têxtil na orientação da trama indicou desempenho desfavorável. Em contrapartida, numerosas fissuras e com menor espaçamento, de acordo com Du et al. (2017), indicaram comportamento satisfatório do compósito com até duas camadas na direção da trama e nos corpos de prova reforçados na direção da urdidura com duas a quatro camadas.

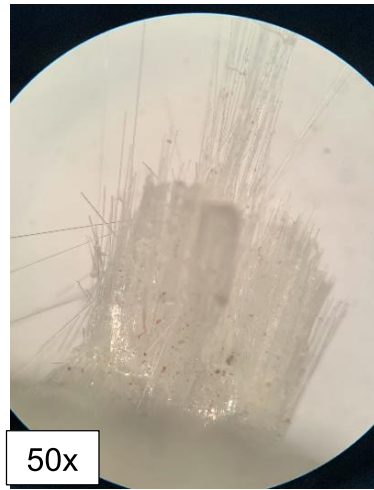
Nos corpos de prova em que houve ruptura do têxtil, como exemplo os compósitos com uma e duas camadas, as falhas dos fios da trama são demonstradas na Figura 81, na Figura 82 são apresentadas as configurações da ruptura do têxtil na direção da urdidura.

Figura 81 – Aspecto de ruptura dos fios de têxtil AR192 na orientação da trama após ensaio de tração conforme idade de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias

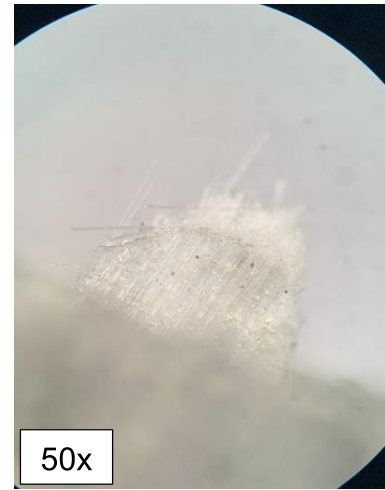
AR192 1T T



(a)

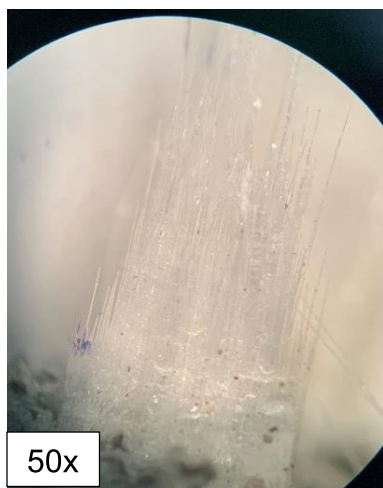


(b)



(c)

AR192 2T T



(a)



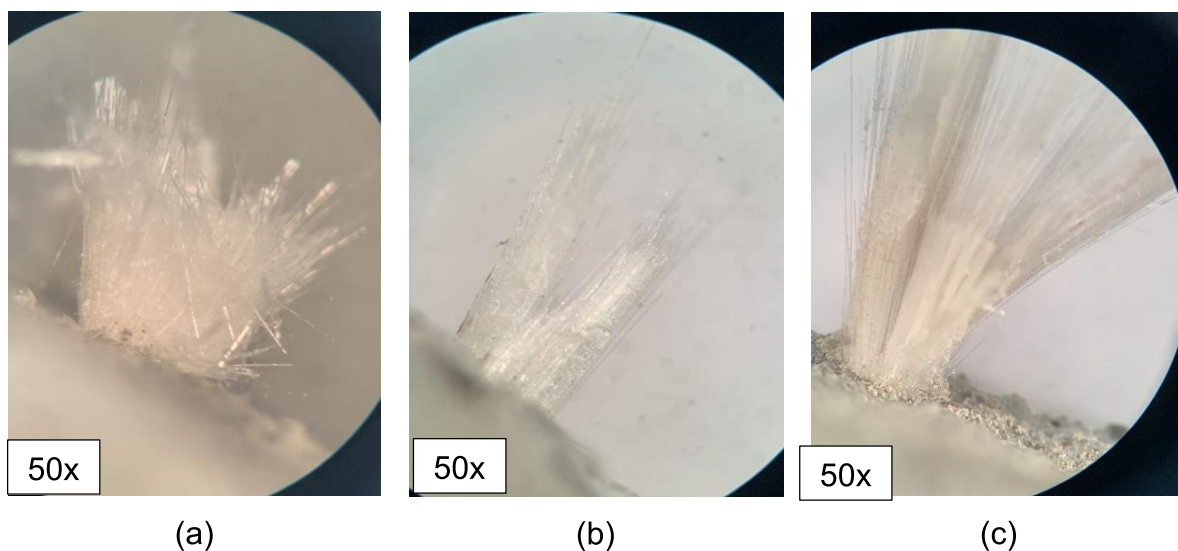
(b)



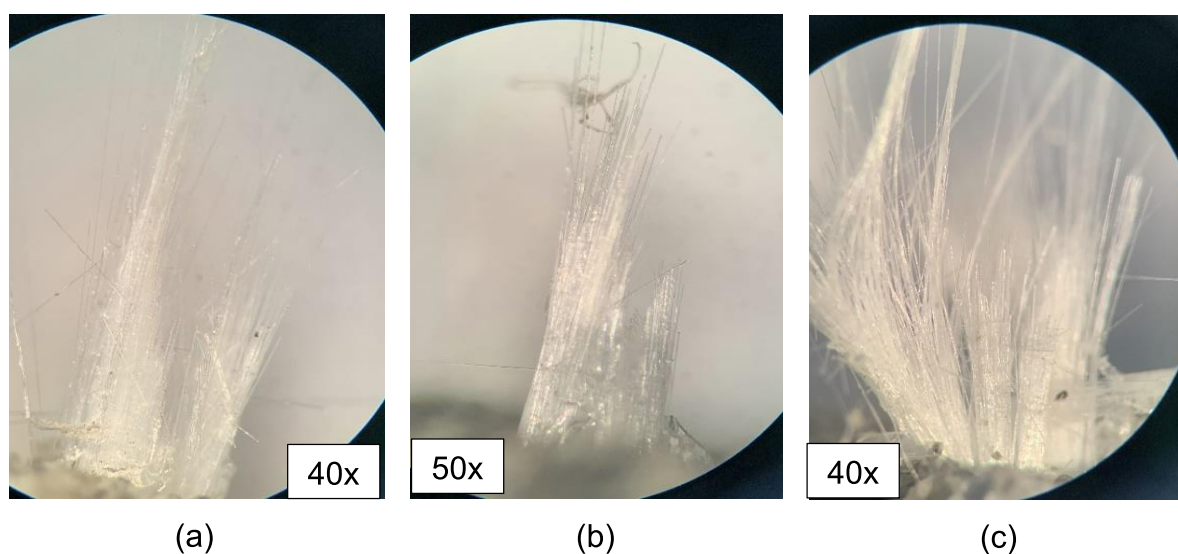
(c)

Figura 82 – Aspecto de ruptura dos fios de têxtil AR192 na orientação da urdidura após ensaio de tração conforme idade de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias

AR192 1T U



AR192 2T U



Nos corpos de prova contendo uma camada de têxtil na direção da trama, ensaiados aos 7 dias, a ruptura do fio não ocorreu pelo modo telescópico, visto que a falha do têxtil sucedeu com maior escorregamento dos fios externos. Este comportamento não foi presenciado nos demais exemplares nas idades avançadas. Os outros corpos de prova, a falha do têxtil apresentou maior semelhança com a configuração de ruptura de modo telescópico.

Suspeita-se que esta reação, conforme Kulas (2015) e Triantafillou (2016), possa ser atribuída ao pouco material hidratado depositado na superfície do reforço

na idade de 7 dias, o pode ter acarretado em uma baixa resistência de aderência do reforço com a matriz, o que desenvolveu um maior comprimento arrancado do fio.

Nos corpos de prova ensaiadas com o têxtil posicionado na direção da urdidura, independentemente da idade e da quantidade de camadas, não foi observado a formação de ruptura do têxtil por telescópio. Uma vez que a falha do têxtil ocorreu com maior escorregamento dos filamentos externos em relação aos filamentos internos. Este aspecto de ruptura do reforço, de acordo com Colombo (2015), pode ser atribuído a geometria do têxtil, no qual os filamentos da urdidura estão enlaçados nos fios da trama, o que favorece a ruptura precoce no encontro com a trama.

De modo geral, os fios na orientação da urdidura falharam em locais próximos ao encontro com a trama, segundo Du et al. (2017), nesta região há maior fragilidade promovido pela transição com a trama.

Além do mais, a geometria mais arredondada da urdidura pode ter influenciado a aderência dos filamentos, conforme telescópica Haik, Sasi e Peled (2017), há menor área de contato com a matriz, o que resultou em uma ruptura do reforço distinta da configuração.

Por fim, em geral, a configuração de ruptura do têxtil não foi influenciada com o avanço da hidratação do cimento, pois não foi observado fragilização do fio de vidro AR.

#### 4.3.2.2 Resistência à flexão

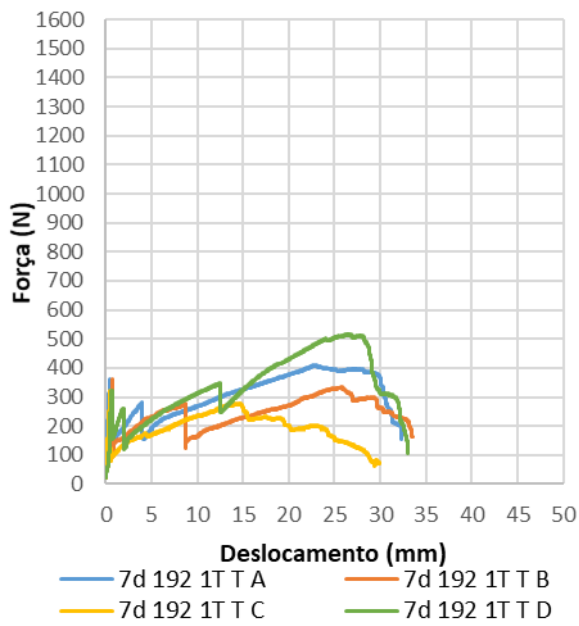
Os resultados do comportamento dos corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à flexão são dispostos nos diagramas da força *versus* deslocamento, apresentados na Figura 83 à Figura 88.

As quantidades de reforço analisadas compreendem um, dois, três e quatro camadas de têxtil, o que caracterizam, respectivamente, as taxas de reforço de 0,287%, 0,575%, 0,862% e 1,15%, sendo iguais para ambas as orientações do têxtil.

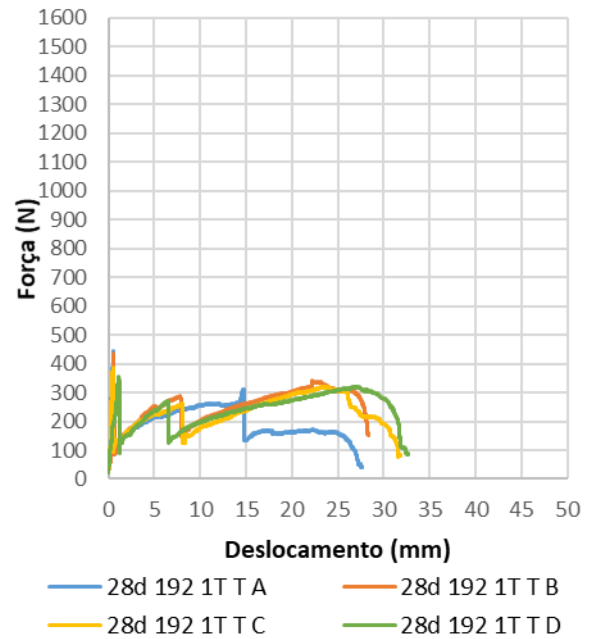
Com os diagramas Força vs Deslocamento foi possível determinar o comportamento mecânico dos compósitos e extrair o valor da força máxima e crítica de cada corpo de prova. A resistência crítica foi considerada neste trabalho como a força necessária para formar a primeira fissura. Além do mais, foi possível distinguir o enquadramento nos estágios de atuação da solicitação à flexão e relacionar com as propriedades constitutivas do concreto têxtil.



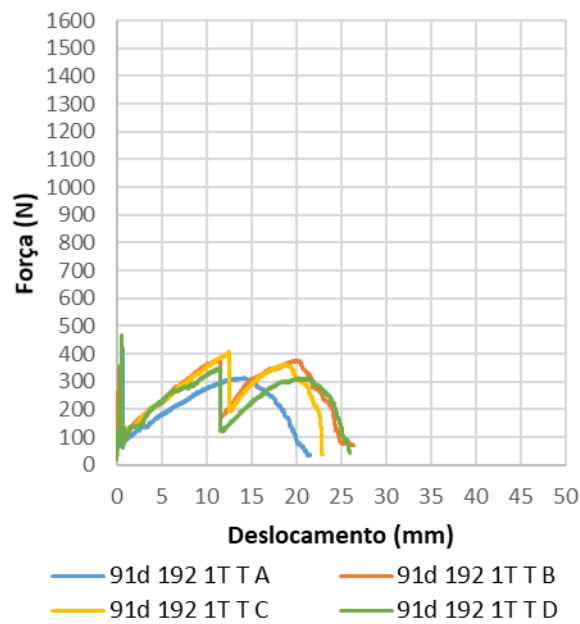
Figura 83 – Diagramas Força vs Deslocamento – Flexão AR192 1T Trama; (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias



(a)

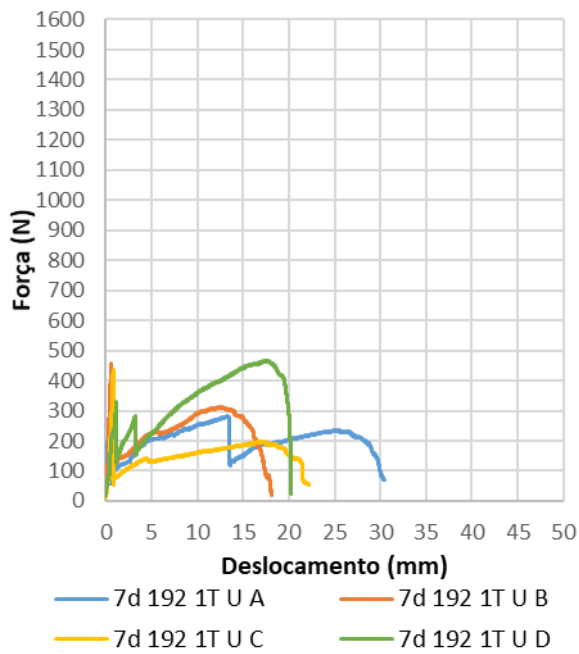


(b)

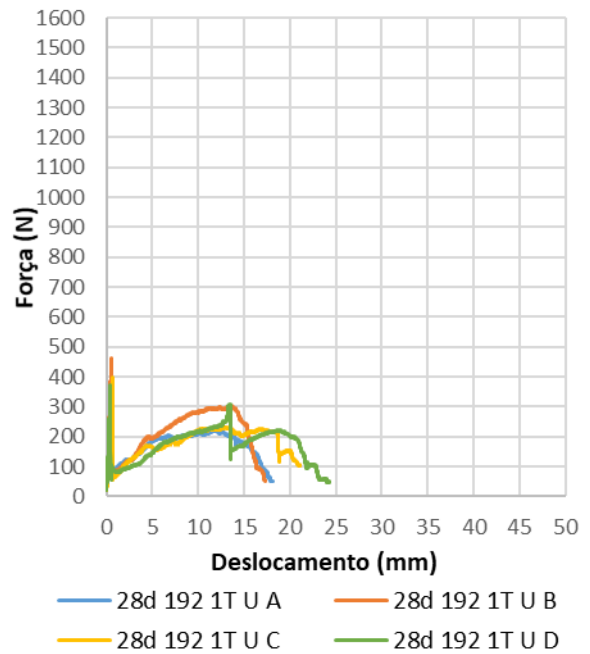


(c)

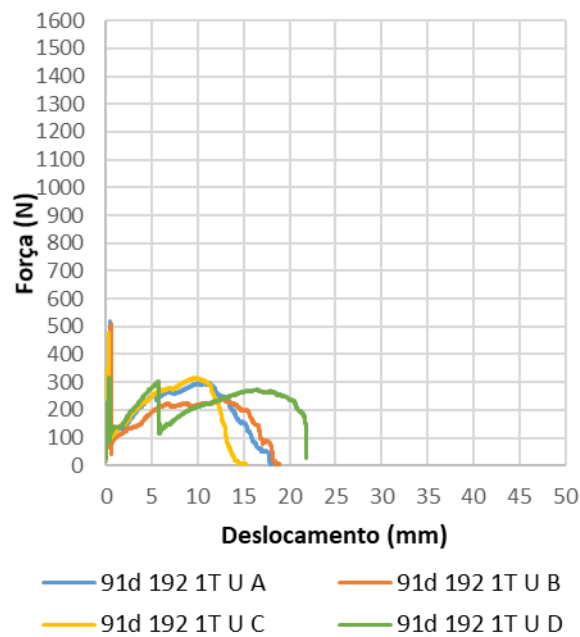
Figura 84 – Curvas Força vs Deslocamento – Flexão AR192 1T Urdidura; idade (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias



(a)

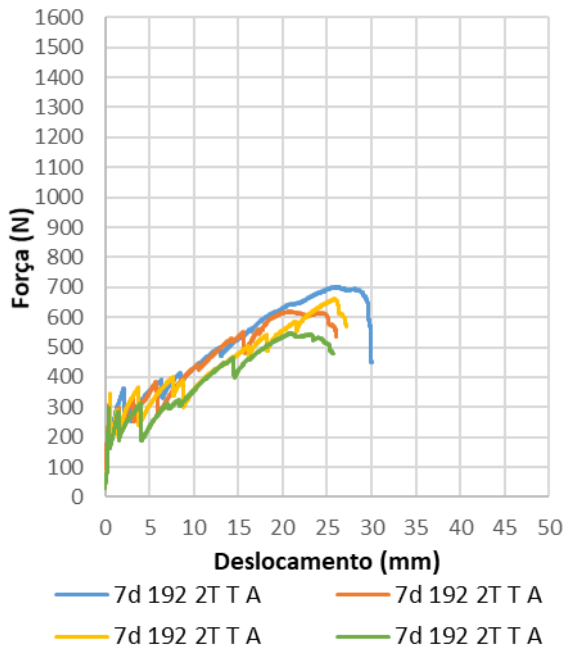


(b)

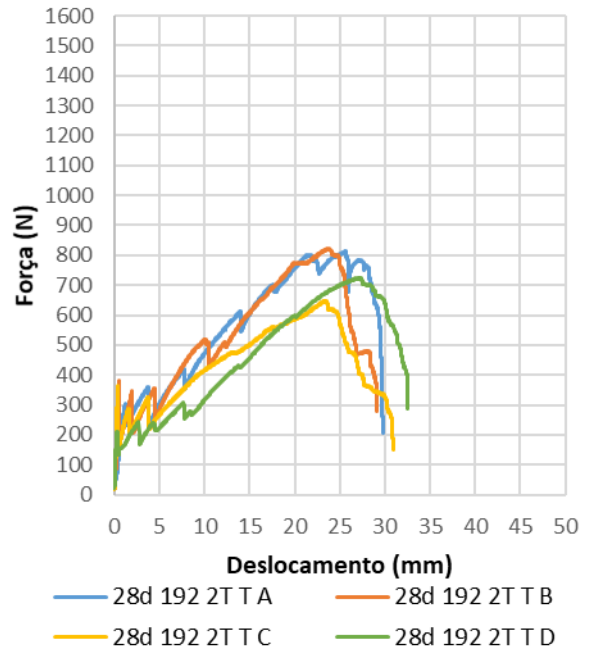


(c)

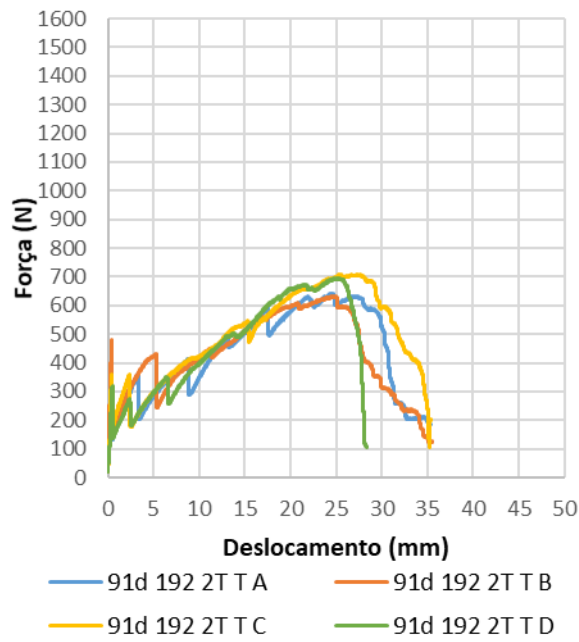
Figura 85 – Curvas Força vs Deslocamento – Flexão AR192 2T Trama; idade (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias



(a)

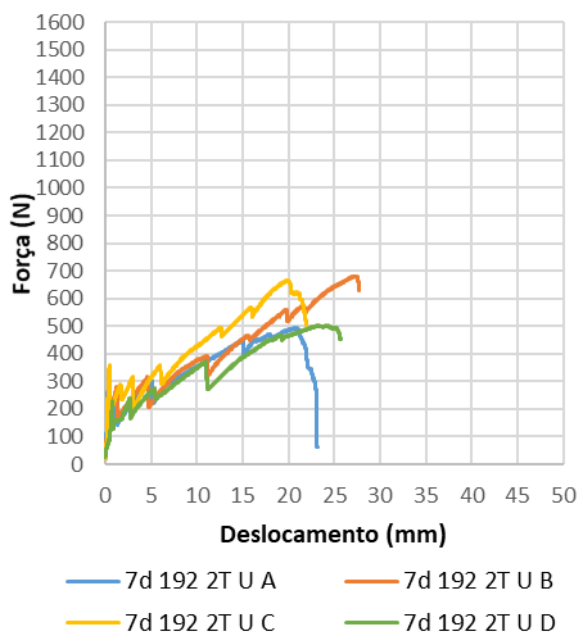


(b)

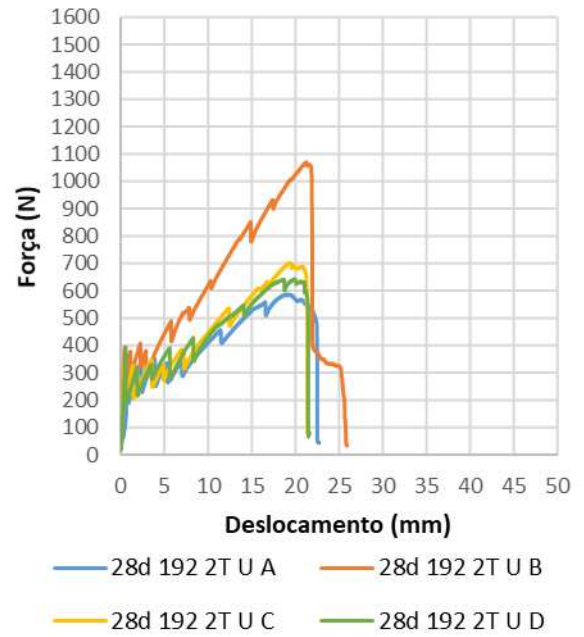


(c)

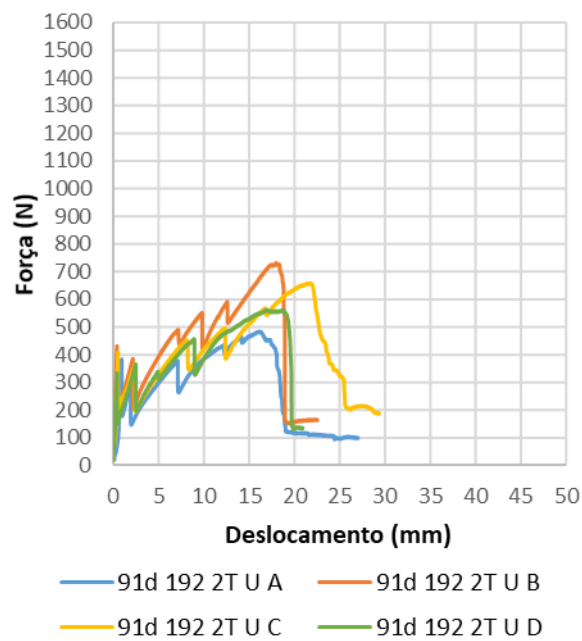
Figura 86 – Curvas Força vs Deslocamento – Flexão AR192 2T Urdidura; idade (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 91 dias



(a)



(b)



(c)

Figura 87 – Curvas Força vs Deslocamento – Flexão AR192 3T (a)Trama; (b) Urdidura

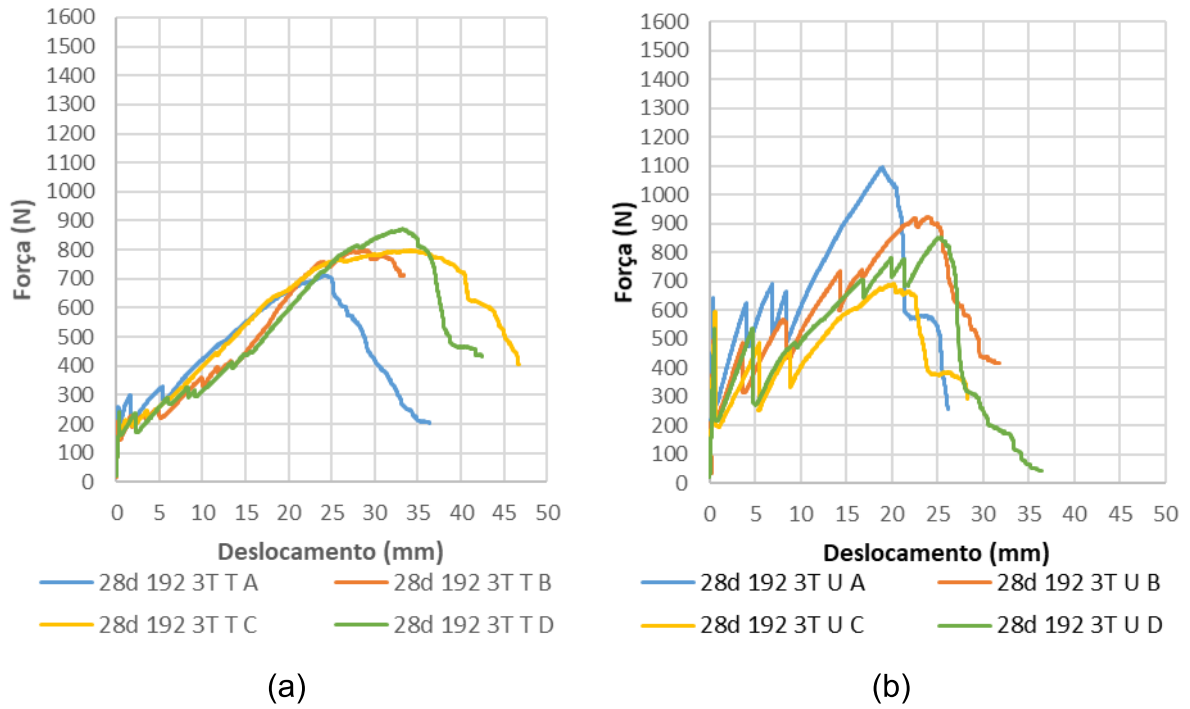
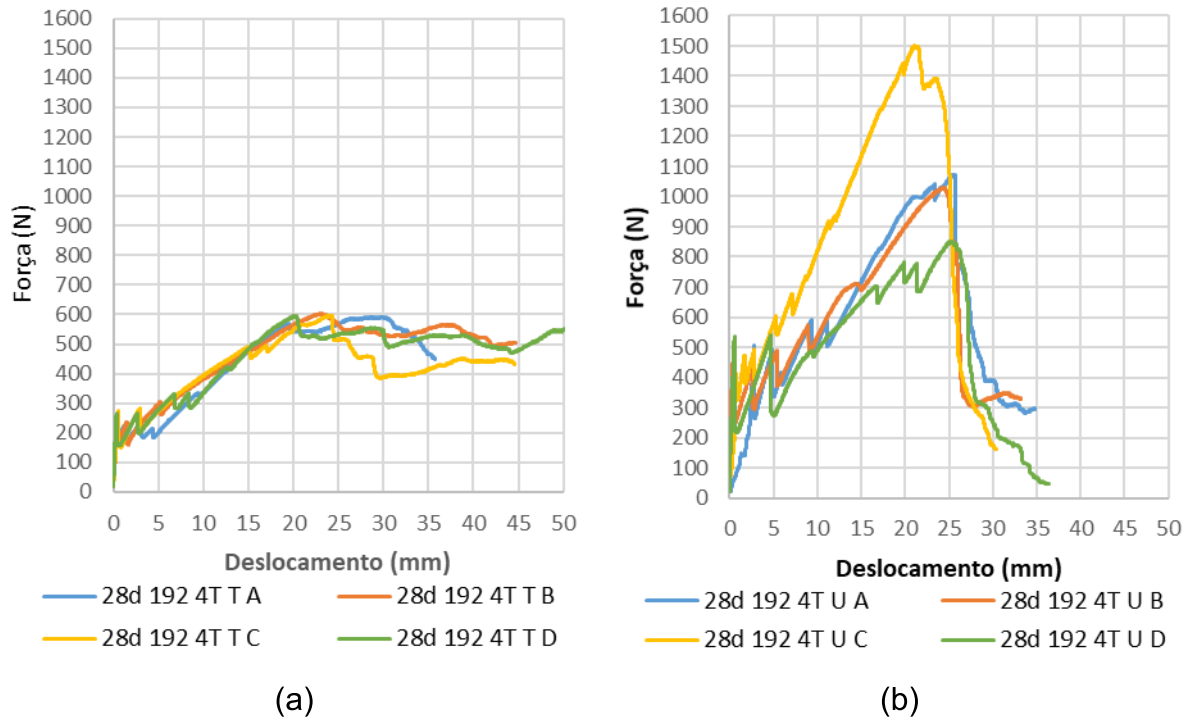


Figura 88 – Curvas Força vs Deslocamento – Flexão AR192 4T (a)Trama; (b) Urdidura



Ao se analisar o comportamento do TRC, foi observado a capacidade de suportar carga após a formação da primeira fissura, o que segundo Peled, Bentur e Mobasher (2017), caracteriza a atuação do têxtil como reforço frente aos esforços de flexão e que relaciona com comportamento do tipo dúctil.

Em relação a evolução da idade, foi observado similaridade de comportamento à flexão, não sendo possível indicar influência do período de análise na configuração mecânica dos corpos de prova.

No que tange a percepção de atuação nos diferentes estágios, todos os corpos de prova desenvolveram manutenção do estágio I, região sob ação do regime elástico da matriz. Com o surgimento da primeira fissura, foi pronunciada a influência da quantidade de camadas de têxtil.

A configuração dos diagramas Força vs Deslocamento nos compósitos reforçados com uma camada para ambas as orientações, a força necessária para formação da primeira fissura foi caracterizada como máxima na grande maioria dos corpos de prova ensaiados, visto que após a ocorrência da primeira fissura, segundo Zargar et al. (2017), o têxtil foi solicitado de modo isolado, e não alcançou a capacidade de dissipar a energia na matriz para superar a força crítica. Exceto nas amostras 7d 192 1T T A e D, 91d 192 1T T B e 7d 1T U D, que a força máxima superou a força crítica.

Com a formação da primeira fissura, nos corpos de prova com duas à quatro camadas, para ambas as orientações do reforço, ocorreu a transferência da carga através da fissura para o têxtil, de acordo com Du et al. (2017), o desempenho da aderência entre o têxtil e a matriz foi destacado, ocorreu a redistribuição da carga para a matriz até a formação de uma nova fissura, este processo se repetiu, com a manifestação de múltiplas fissuras em um patamar razoavelmente constante da carga e com avanço do deslocamento, quando incremento da carga superou a capacidade de redistribuir as cargas, o têxtil foi solicitada de modo isolado. Esta atuação caracterizou o estágio IIA e IIB, respectivamente.

A falha do reforço ocorreu no estágio III em que segundo Williams Portal, Nyholm Thrane e Lundgren (2017), houve perda da capacidade de aderência do têxtil com a matriz, o que ocorreu na redução gradativa da carga com avanço do deslocamento.

O comportamento dos corpos de prova ensaiados com apenas uma camada de têxtil, para ambas as orientações, não se relacionam com as diretrizes indicadas

por Peled, Mobasher e Bentur (2017) para serem caracterizados com propriedades do concreto têxtil, de modo geral, de acordo com Du et al. (2017), a capacidade de carga do compósito foi igual à da matriz, pois não houveram aumento da resistência após o surgimento da primeira fissura e surgimento de múltiplas fissuras.

O desempenho das amostras reforçadas com duas e três camadas de têxtil em ambas as direções, caracterizaram o comportamento preconizado por Peled, Mobasher e Bentur (2017), uma vez que as amostras apresentaram aumento da força após o surgimento da primeira fissura com avanço do deslocamento. Além do mais, em todas as idades ensaiadas, os desempenhos dos corpos de prova frente ao esforço de flexão foram similares e segundo Williams Portal, Nyholm Thrane e Lundgren (2017), atuaram nos três estágios característicos do comportamento constitutivo do concreto têxtil.

Cabe ainda mencionar, que a força máxima média dos corpos de prova reforçadas com três camadas na direção da trama foi menor e atingida com maior deslocamento em relação aos exemplares com têxtil na direção da urdidura.

Nos corpos de prova reforçados com quatro camadas na direção da trama, na situação com que a força se aproximou de 600 N com deslocamento aproximado do compósito em 24 mm, ocorreu a interrupção no crescimento da carga com contínuo avanço do deslocamento. O avanço do deslocamento ocorreu com patamares de carregamento estável. Os compósitos reforçados com esta orientação e com esta quantidade de têxtil apresentam menor eficiência quando comparado com os resultados dos compósitos reforçados na orientação da urdidura.

Este comportamento pode ser relacionado a taxa de reforço, de acordo com (KAMANI et al., 2019), não há espessura da matriz suficiente para garantir a aderência do têxtil com a matriz, e pode ter ocasionado deficiências no contato do têxtil com a matriz, prejudicando assim, o comportamento mecânico do compósito à flexão.

Além do mais, segundo Zani et al (2019), pôr o fio da trama estar livre para se movimentar, em decorrência da configuração de produção do têxtil, o fio da trama apresentou maior escorregamento por entre os fios da urdidura, o que não foi observado quando a urdidura foi solicitada em taxas similares. De acordo com Colombo (2015), como os fios da urdidura estão enlaçados por entre os fios da trama, logo, houve maior restrição do escorregamento, consecutivamente, melhor eficiência de ligação.

Na configuração de quatro camadas de têxtil, os compósitos reforçados na direção da urdidura, de acordo com Peled, Mobasher e Bentur (2017), se comportaram conforme a lei constitutiva do TRC, por outro lado, os corpos de prova com têxtil na direção da trama não satisfizeram o comportamento dos estágios do TRC. Sendo possível relacionar que a quantidade de quatro camadas na orientação da trama não pode ser indicada para uso como reforço têxtil nas condições de contorno estudadas.

Por fim, de modo geral, indica-se que a taxa de reforço 1,15%, quando considerada a orientação da trama, não sustentou as propriedades constituintes do TRC, dessa maneira, a taxa de 0,862% (três camadas) foi considerada como a quantidade limite máxima de têxtil.

Os resultados médios dos deslocamentos, da força máxima e crítica dos corpos de prova nas situações estudadas, estão organizados na Tabela 23. Dado que os resultados individuais de cada corpo de prova ensaiado estão dispostos no Apêndice D.



Tabela 23 – Valores médios dos resultados do comportamento à flexão dos compósitos reforçados com o têxtil AR192

Orientação do têxtil	Número de camadas	Idade de ensaio (dias)	$f_{cr}$ (N)	$\delta_{cr}$ (mm)	$f_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)
Trama	1	7	342,3	0,599	402,0	12,717
	1	28	406,6	0,695	406,6	0,695
	1	91	428,5	0,541	435,0	3,341
	2	7	315,2	0,479	632,9	23,441
	2	28	316,4	0,598	752,2	24,947
	2	91	375,6	0,436	669,5	24,934
	3	28	222,8	0,266	795,3	30,028
	4	28	250,1	0,877	596,9	24,299
Urdidura	1	7	403,5	0,762	437,8	4,826
	1	28	411,5	1,230	411,5	1,230
	1	91	457,1	0,446	457,1	0,446
	2	7	292,5	0,513	585,7	22,774
	2	28	373,0	0,563	750,5	19,861
	2	91	389,6	0,565	609,2	18,601
	3	28	568,0	0,482	890,1	22,044
	4	28	452,0	1,085	1.173,5	24,263

Legenda:  $f_{cr}$  Carga Crítica;  $\delta_{cr}$  Deslocamento crítico;  $f_{max}$  Carga máxima;  $\delta_{max}$  Deslocamento máximo

Os valores médios dos resultados dos corpos de prova indicaram aumento da resistência máxima acompanhado pelo número de camadas, bem como aumento do deslocamento.

Na direção da trama, o aumento da força máxima foi limitado em três camadas, pois com a quantidade de quatro camadas, ocorreu diminuição da resistência em 24,94% em relação a força máxima do compósito reforçado com três camadas. Sendo assim, a quantidade de três camadas atingiu maior resistência máxima entre os compósitos analisados para a direção da trama.

Ao se analisar a evolução da resistência entre uma e três camadas de têxtil na direção da trama, houve aumento de 95,59%, tomando como base a idade de 28 dias.

E ao se analisar a resistência máxima dos compósitos com duas e três camadas, percebeu-se aumento em 5,72%.

Por outro lado, ao se analisar a orientação da urdidura, é possível indicar que o maior valor da força obtida no estudo foi no compósito contendo quatro camadas de têxtil, o qual superou em 184,90% a resistência do compósito contendo uma camada de reforço. O aumento foi menor quando analisado entre os compósitos com duas e três camadas, respectivamente, em 56,36% e 31,83%.

Quando analisado a força crítica, o comportamento não seguiu a mesma tendência da força máxima, sendo possível relacionar que neste estágio a matriz exerceu maior esforço à solicitação de flexão (DU et al., 2017). Não sendo possível indicar influência da quantidade de camadas na resistência crítica.

Em relação ao deslocamento no ponto de força máxima, se observou tendência de aumento com a quantidade de camadas de têxtil, em contrapartida, no ponto de força crítica, o deslocamento não acompanhou o mesmo comportamento.

Sob influência da direção do têxtil na resistência máxima do compósito, a situação de uma camada, a urdidura atingiu valor médio 1,19% maior que o obtido na direção da trama. A mesma tendência não foi observada no valor médio dos compósitos com duas camadas, visto que a trama atingiu valor máximo 0,23% maior que a força máxima na direção da urdidura. Por outro lado, com as quantidades de três e quatro camadas, a direção da urdidura alcançou valor médio superior aos reforçados na direção da trama em, respectivamente 10,65% e 49,14%.

A configuração das fissuras nos corpos de prova após ensaio de flexão, nas situações com uma e duas camadas na direção da trama são apresentados na Figura 89 e Figura 90, na orientação da urdidura, são demonstrados na Figura 91 e Figura 92. E na Figura 93 e Figura 94 são apresentados os corpos de provas com três e quatro camadas para ambas as orientações, respectivamente.

Figura 89 – Aspecto final dos corpos de prova com uma camada de reforço AR192 na direção da Trama após ensaio de flexão conforme as idades analisadas

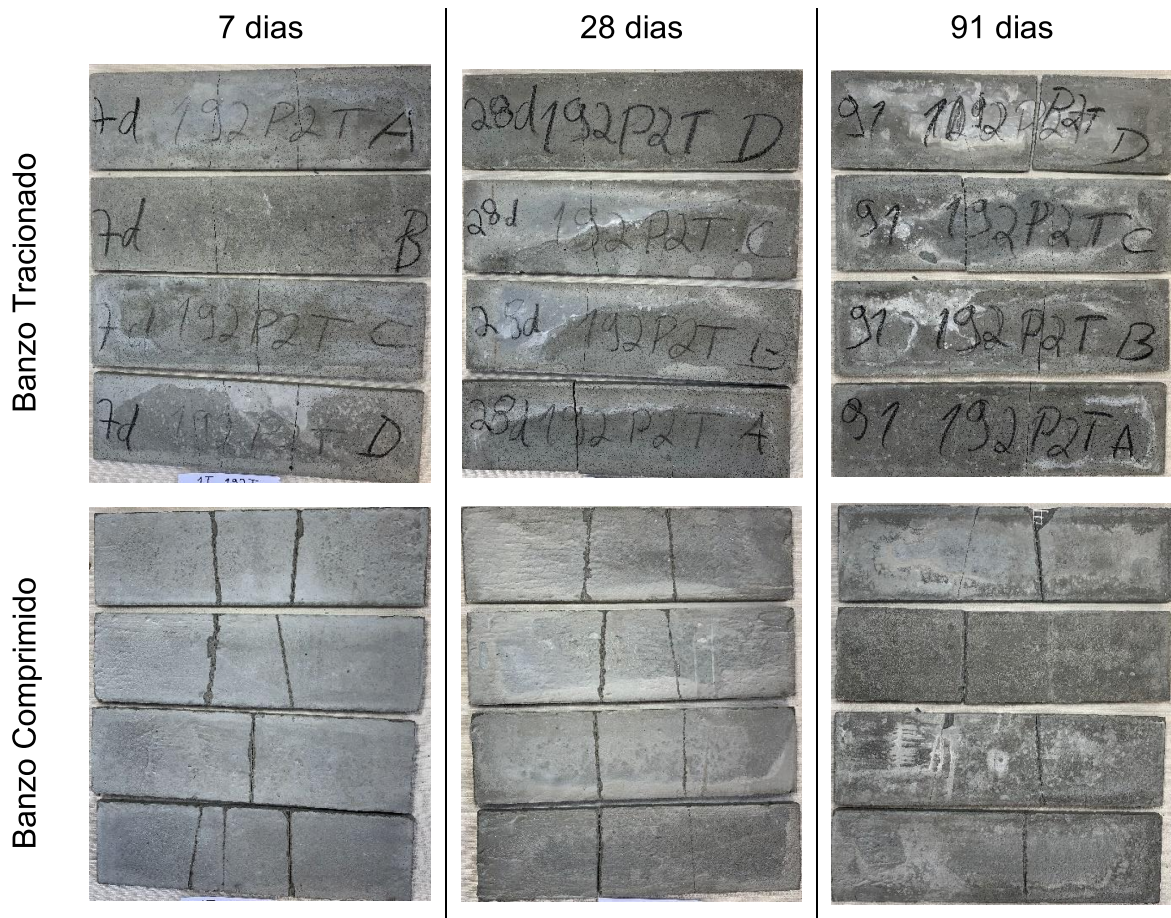


Figura 90 – Aspecto final dos corpos de prova com duas camadas de reforço AR192 na direção da Trama após ensaio de flexão conforme as idades analisadas

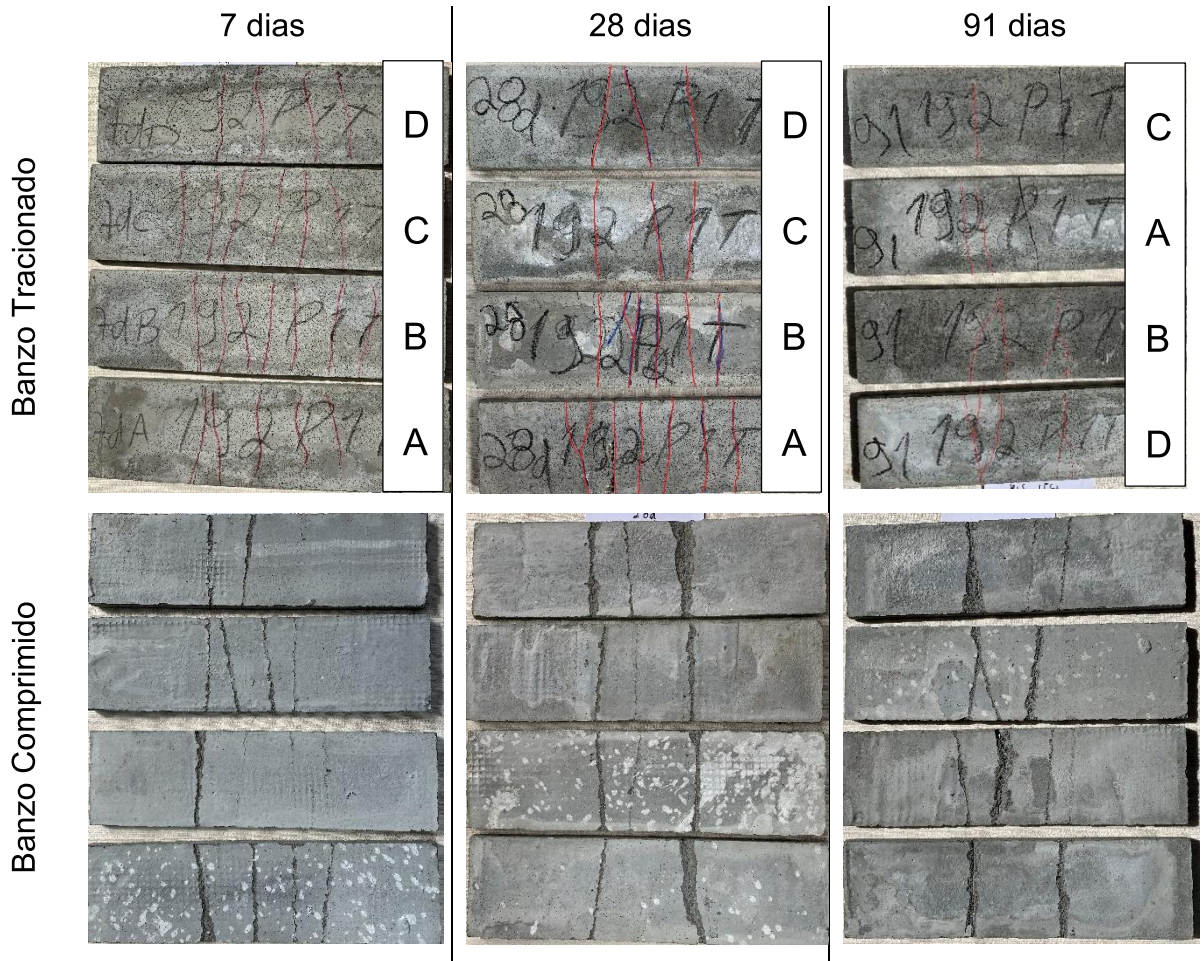


Figura 91 – Aspecto final dos corpos de prova com uma camada de reforço AR192 na direção da Urdidura após ensaio de flexão conforme as idades analisadas

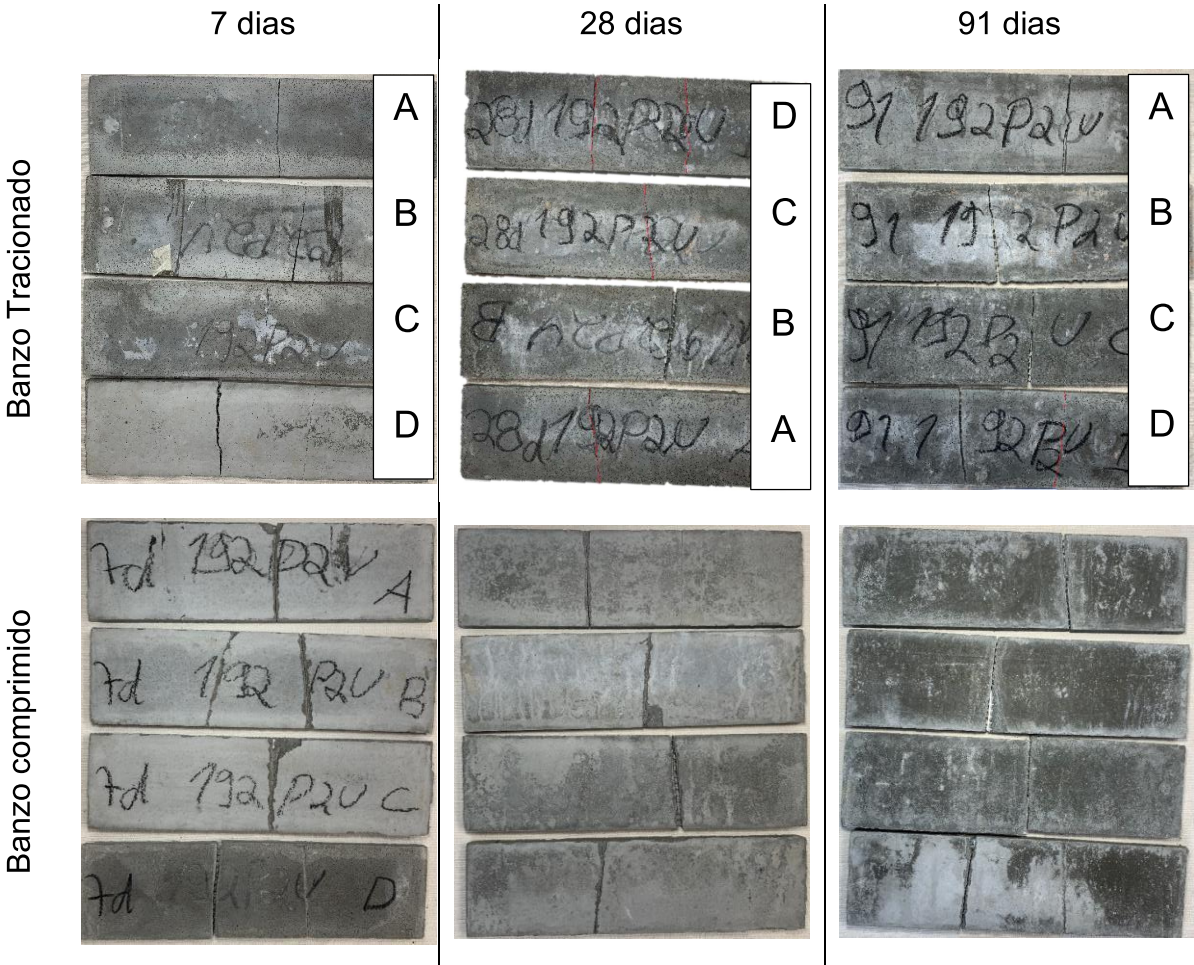


Figura 92 – Aspecto final dos corpos de prova com duas camadas de reforço AR192 na direção da Urdidura após ensaio de flexão conforme as idades analisadas

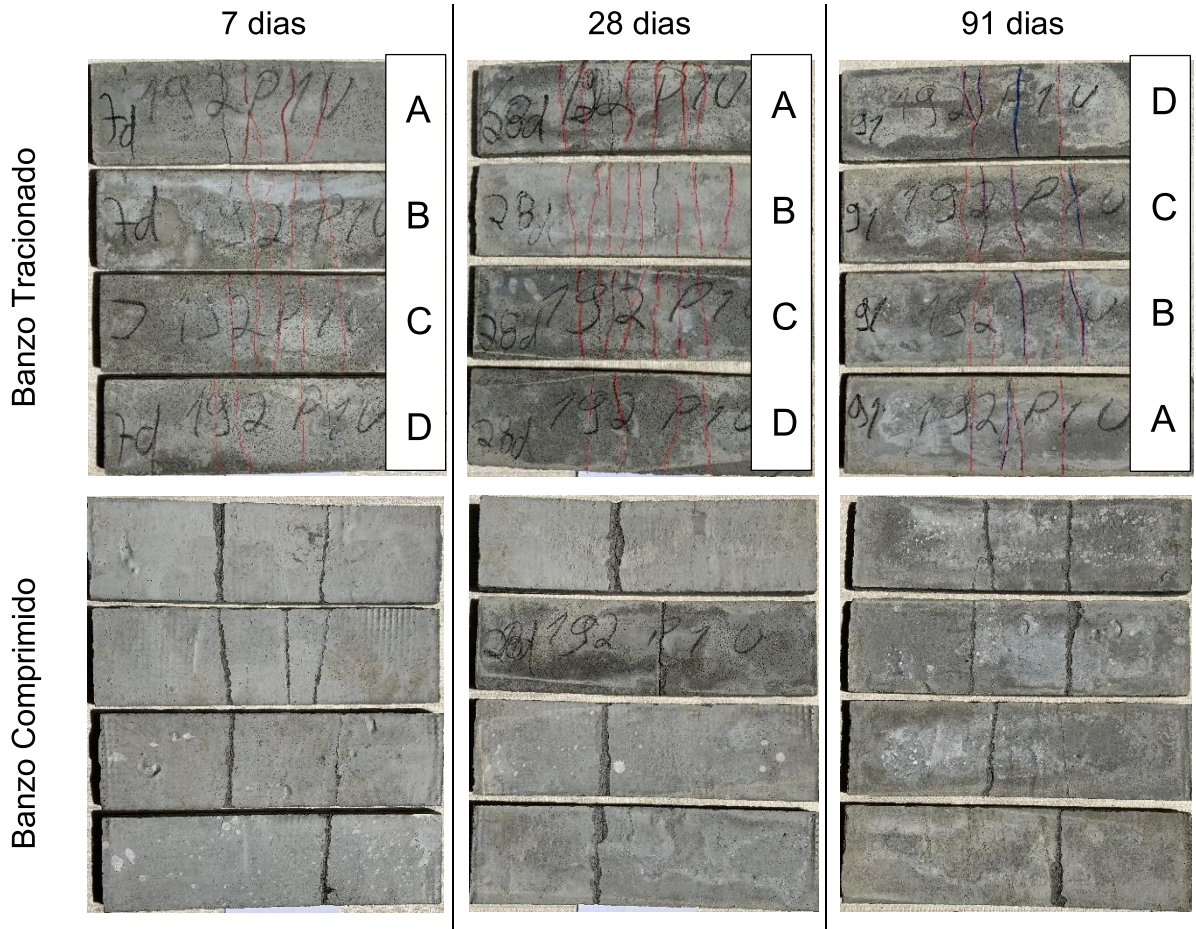


Figura 93 – Aspecto final dos corpos de prova com três camadas de reforço AR192 na direção da Trama e Urdidura após ensaio de flexão

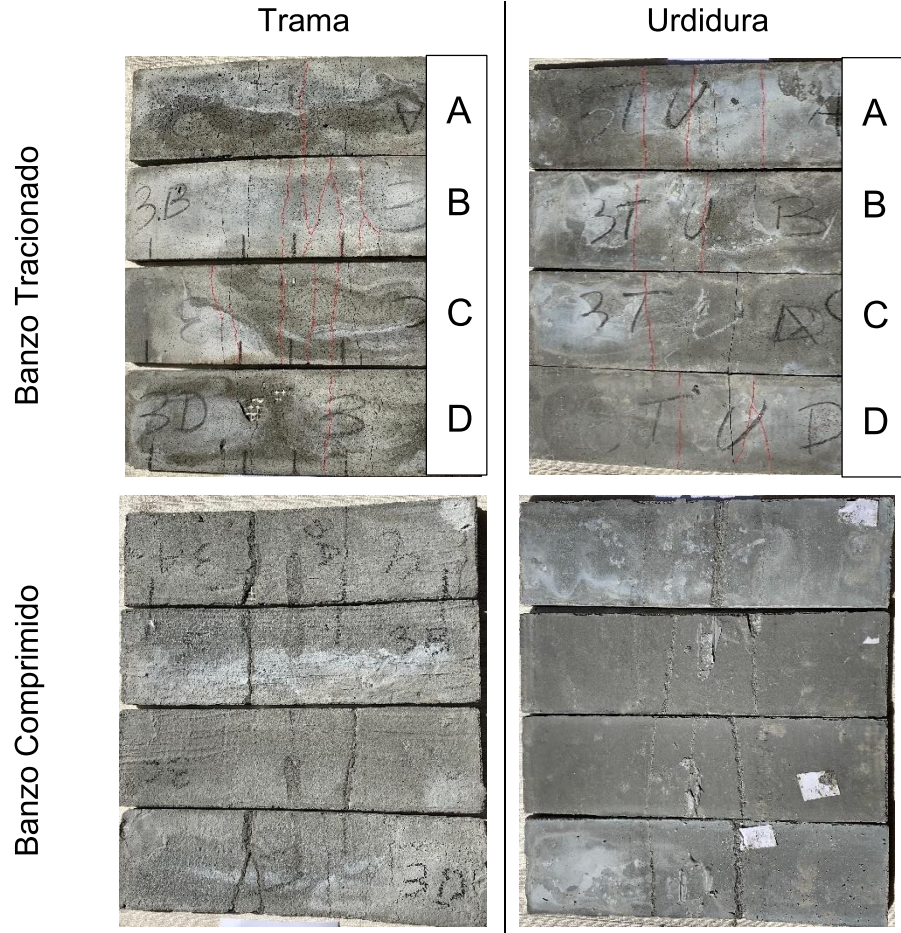
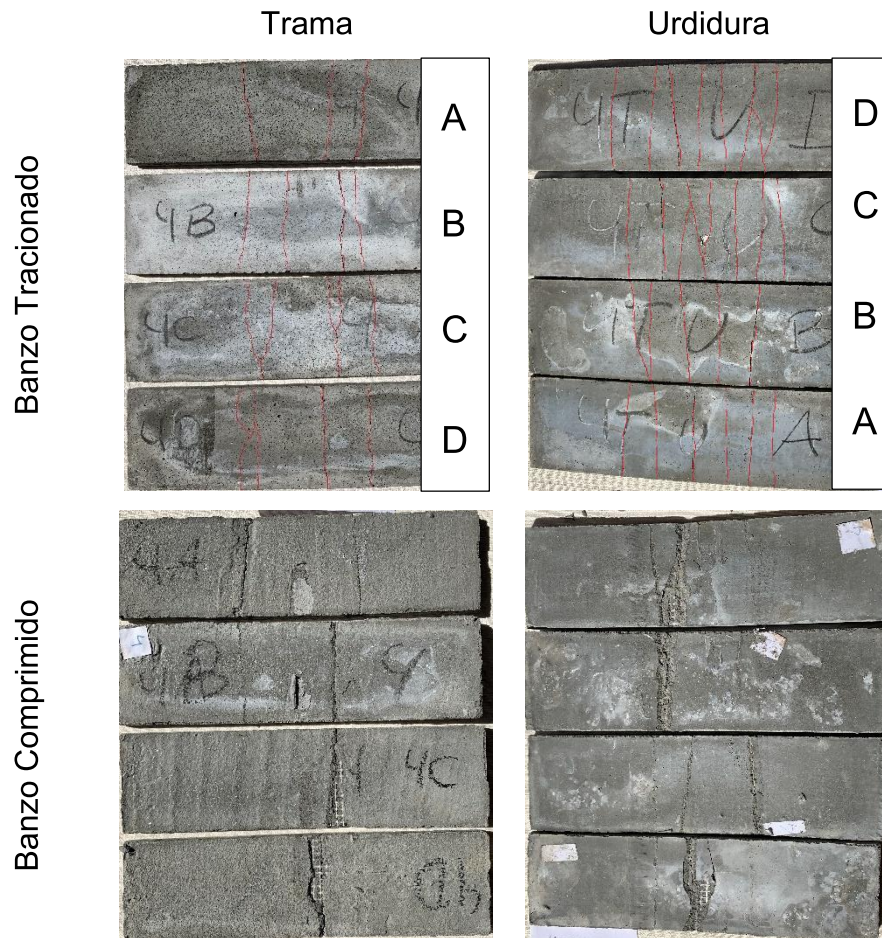


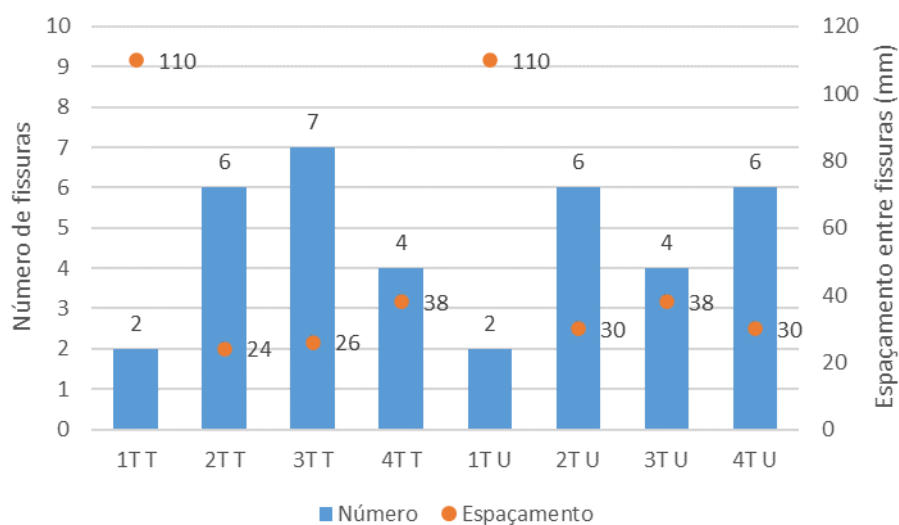
Figura 94 – Aspecto final dos corpos de prova com quatro camadas de reforço AR192 na direção da Trama e Urdidura após ensaio de flexão



Em relação a quantidade de fissuras e o espaçamento, a Figura 95 reuni as informações dos corpos de prova ensaiados aos 28 dias de cura.



Figura 95 – Número de fissuras e espaçamentos entre fissuras, 28 dias de cura



Em todos os corpos de prova reforçados com uma camada em ambas as orientações, nas idades de ensaio, houve formação uma, ou até duas fissuras em região localizado no terço médio central na face tracionada. Enquanto no banzo comprimido, também foram observadas fissuras que sinalizaram esforço excessivo de compressão na matriz. No entanto, foi possível relacionar que a ruptura da matriz ocorreu com elevado deslocamento do compósito gerado pelo escorregamento do têxtil.

Nos compósitos reforçados com duas a quatro camadas de têxtil com orientação da trama e urdidura, ocorrências das múltiplas fissuras concentradas no terço médio central na face tracionado foram manifestadas. Estas fissuras ocorreram progressivamente, o que sustentou a atuação no estágio IIA.

No banzo comprimido, ocorreu o rompimento pontual e parcial da matriz por excessivo esforço de compressão, situação passível de ser relacionada com características de compósito do tipo super reforçado, dado que, a falha ocorre por compressão do concreto na zona comprimida do elemento e não por rompimento total do reforço (KAMANI et al., 2019).

Com o acréscimo das camadas de reforço, as taxas de reforço em 0,862% e 1,15% e que caracterizam três e quatro camadas de têxtil, também compreenderam a situação do tipo super reforçado, pois as falhas foram associadas à com ruptura da matriz antes do rompimento do reforço (KAMANI et al., 2019).

Esta configuração de ruptura compreende o discutido por Kulas (2013), pois com o aumento da taxa de reforço, a ruptura do compósito ocorreu por excessiva tensão de compressão sem, o total rompimento do têxtil.

#### 4.3.2.2.1 Análise estatística

A fim de aprofundar a interpretação dos resultados dos corpos de prova analisados, foram realizadas análises estatísticas em relação a influência da idade de ensaio na resistência máxima e crítica à flexão, para as quantidades de uma e duas camadas do têxtil AR192 em ambas as orientações do têxtil. O método de análise de variância (ANOVA) foi utilizado e os resultados estão dispostos na Tabela 24 e Tabela 25 para os corpos de prova com reforço na orientação da trama e a Tabela 26 e Tabela 27 para resultados com o reforço na direção da urdidura.

Tabela 24 – Análise de variância da resistência à flexão crítica e máxima dos compósitos reforçados com uma camada do têxtil AR192 na direção da trama

##### **ANOVA - Resistência Crítica à Flexão**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre idades	16063,77	2	8031,886	4,770738	0,038676	4,256495
Dentro das idades	15152,16	9	1683,573			
Total	31215,93	11				

##### **ANOVA - Resistência Máxima à Flexão**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre idades	2554,712	2	1277,356	0,358515	0,708256	4,256495
Dentro das idades	32066,2	9	3562,911			
Total	34620,91	11				

Tabela 25 – Análise de variância da resistência à flexão crítica e máxima dos compósitos reforçados com duas camadas do têxtil AR192 na direção da trama

**ANOVA - Resistência Crítica à Flexão**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre idades	9543,095	2	4771,548	1,268604	0,327068	4,256495
Dentro das idades	33851,33	9	3761,259			
Total	43394,42	11				

**ANOVA - Resistência Máxima à Flexão**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre idades	29911,81	2	14955,9	3,593282	0,071268	4,256495
Dentro das idades	37459,66	9	4162,184			
Total	67371,46	11				

Tabela 26 – Análise de variância da resistência à flexão crítica e máxima dos compósitos reforçados com uma camada do têxtil AR192 na direção da urdidura

**ANOVA - Resistência Crítica à Flexão**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre idades	6681,815	2	3340,908	0,71999	0,512794	4,256495
Dentro das idades	41761,94	9	4640,215			
Total	48443,75	11				

**ANOVA - Resistência Máxima à Flexão**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre idades	4186,132	2	2093,066	0,526154	0,607988	4,256495
Dentro das idades	35802,44	9	3978,048			
Total	39988,57	11				

Tabela 27 – Análise de variância da resistência à flexão crítica e máxima dos compósitos reforçados com duas camadas do têxtil AR192 na direção da urdidura

**ANOVA - Resistência Crítica à Flexão**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre idades	21587,49	2	10793,74	6,245848	0,019901	4,256495
Dentro das idades	15553,32	9	1728,147			
Total	37140,81	11				

**ANOVA - Resistência Máxima à Flexão**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre idades	63556,76	2	31778,38	1,36521	0,303515	4,256495
Dentro das idades	209495,5	9	23277,28			
Total	273052,3	11				

Os resultados foram obtidos com um nível de significância de 5% e implicando a um nível de confiança de 95%, para as relações entre os valores das forças máximas e críticas entre as idades de cura, e estão reunidos de forma sintética para todas as tipologias analisadas no Quadro 9.

Quadro 9 – Síntese da análise de variância da resistência à flexão dos compósitos reforçados com o têxtil AR192 entre as idades ensaiadas

Orientação	Nº de camadas	Distinção da análise	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	Interpretação
Trama	1	Resistência crítica	4,770738	0,038676	4,256495	<b>há diferença significativa</b>
		Resistência máxima	0,358515	0,708256	4,256495	não há diferença significativa
	2	Resistência crítica	1,268604	0,327068	4,256495	não há diferença significativa
		Resistência máxima	3,593282	0,071268	4,256495	não há diferença significativa
Urdidura	1	Resistência crítica	0,71999	0,512794	4,256495	não há diferença significativa
		Resistência máxima	0,526154	0,607988	4,256495	não há diferença significativa
	2	Resistência crítica	6,245848	0,019901	4,256495	<b>há diferença significativa</b>
		Resistência máxima	1,36521	0,303515	4,256495	não há diferença significativa

Em relação a interpretação da resistência máxima, para todas as distinções analisadas, não se observou diferença significativa entre os valores máxima com o avanço da idade de cura da matriz.

De outro modo, ao se analisar a resistência crítica entre as idades de cura, os resultados apresentaram diferença significativa para a tipologia 2T U e 1T T, nos demais, não houve diferença significativa.

Durante o período analisado, a idade não influenciou na resposta da resistência máxima quando solicitado à flexão dos compósitos reforçados com o têxtil AR192, sendo assim, este comportamento sustentou a decisão de adoção para analisar somente aos 28 dias os corpos de prova contendo três e quatro camadas de têxtil.

No que se refere a influência da orientação do têxtil na resistência máxima à flexão, tendo em vista a proximidade entre os valores máximos de resistência entre as orientações, nas distintas situações de reforço analisadas. Análises estatísticas de variância (ANOVA) foram realizadas para verificar a existência de diferença significativa entre os resultados de resistência máxima sob influência da orientação do têxtil, considerando as condições de contorna da quantidade de camadas. Os resultados estão dispostos na Tabela 28 para uma camada, na Tabela 29 os resultados considerando duas camadas, Tabela 30 com três camadas e os resultados dos corpos de prova com quatro camadas de têxtil estão na Tabela 31.

Tabela 28 – Análise de variância da resistência à flexão máxima dos compósitos reforçados com uma camada do têxtil AR192 entre as direções de reforço

<b>ANOVA - Resistência Máxima à Flexão</b>						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Sentido do reforço	13782,66	3	4594,22	1,355584	0,291912	3,238872
Entre amostras	2635,51	1	2635,51	0,777641	0,390919	4,493998
Interações	6601,095	3	2200,365	0,649246	0,594814	3,238872
Dentro	54225,72	16	3389,108			
Total	77244,99	23				

Tabela 29 – Análise de variância da resistência à flexão máxima dos compósitos reforçados com duas camadas do têxtil AR192 entre as direções de reforço

**ANOVA - Resistência Máxima à Flexão**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Sentido do reforço	89695,08	2	44847,54	3,268835	0,061511	3,554557
Entre amostras	7960,684	1	7960,684	0,580236	0,456085	4,413873
Interações	3773,477	2	1886,739	0,13752	0,872424	3,554557
Dentro	246955,2	18	13719,73			
Total	348384,4	23				

Tabela 30 – Análise de variância da resistência à flexão máxima dos compósitos reforçados com três camadas do têxtil AR192 entre as direções de reforço

**ANOVA - Resistência Máxima à Flexão**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre sentido do reforço	17974,08	1	17974,08	1,109351	0,332779	5,987378
Dentro do grupo	97214,06	6	16202,34			
Total	115188,1	7				

Tabela 31 – Análise de variância da resistência à flexão máxima dos compósitos reforçados com quatro camadas do têxtil AR192 entre as direções de reforço

**ANOVA - Resistência Máxima à Flexão**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre sentido do reforço	664877,5	1	664877,5	27,573	0,001918	5,987378
Dentro do grupo	144680,1	6	24113,35			
Total	809557,5	7				

Considerando o nível de significância de 5%, com nível de confiança de 95%, os valores obtidos de F e de  $F_{\text{crítico}}$  para cada as quantidades de camada, bem com as respectivas interpretações estão sintetizadas no Quadro 10.

Quadro 10 – Síntese da análise de variância da resistência à flexão dos compósitos reforçados com o têxtil AR192 entre orientações do têxtil

Nº de camadas	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	Interpretação
Uma camada	1,355584	0,291912	3,238872	não há diferença significativa
Duas camadas	3,268835	0,061511	3,554557	não há diferença significativa
Três camadas	1,109351	0,332779	5,987378	não há diferença significativa
Quatro camadas	27,573	0,001918	5,987378	<b>há diferença significativa</b>

Os resultados apontaram que para o limite de até três camadas do têxtil AR192, a orientação não influenciou nos resultados de força máxima, visto que não houve diferença significativa entre os valores de resistência máxima e a orientação do têxtil.

Em contrapartida, ao se considerar a quantidade de quatro camadas de têxtil, os resultados da análise estatística indicaram a existência significativa de diferença entre os resultados da força máxima e a orientação do têxtil.

#### 4.3.2.3 Síntese dos resultados

Ao se observar os resultados experimentais, no que tange a resistência máxima à flexão com o têxtil AR192, houve aumento da força seguido pelo aumento da quantidade de camadas. Em relação a direção da trama, considerando as condições de contorno, a quantidade de três camadas parece ter atingido o limite máximo de reforço. E a quantidade de duas camadas, para ambas as orientações, parece ser o limite mínima de camadas de têxtil.

Em relação a resistência à tração direta, os resultados seguiram tendência similar aos obtidos à flexão, para ambas as orientações do têxtil, houve aumento da tensão máxima com a quantidade de camadas. Sendo a quantidade de quatro camadas, desenvolveu nos compósitos maior resistência à tração.

Os corpos de prova reforçados com uma camada de têxtil para ambas as orientações foram caracterizados com propriedades que não qualificam o compósito com propriedades de concreto têxtil. Dado que, os corpos de prova não apresentaram formação de múltiplas fissuras, tampouco manifestaram os estágios característicos do concreto têxtil. Além do mais, de modo geral, os corpos de prova com apenas uma camada de têxtil a resistência máxima dos compósitos foram iguais, ou ligeiramente superiores a resistência de fissuração da matriz (ZARGARAN et al., 2017).



Em relação a influência da idade de cura da matriz frente a resistência máxima à flexão, não foram identificadas diferenças significativas entre os resultados com o avanço da idade. Sendo assim, durante o período de 91 dias, não se observou influência na resistência máxima à flexão. A mesma tendência pôde ser indicada quando se analisou o comportamento à tração direta.

Ao se analisar a resistência máxima à flexão sob influência das orientações têxtil, não foram observadas diferenças significativas até a quantidade de três camadas. Ao se analisar o comportamento à tração direta, a mesma tendência foi observada até a quantidade de quatro camadas do têxtil.

Nos compósitos com duas camadas de têxtil na orientação da trama, a resistência máxima à flexão foi superior em 0,23% em relação a orientação da urdidura, o que não foi observado nos compósitos com as quantidades de três e quatro camadas, pois a urdidura apresentou força máxima superior em 11,92% e 96,6%, respectivamente, às encontradas com o têxtil na orientação da trama.

Em relação aos resultados de tração direta, em relação aos valores de tensão máxima dos compósitos obtidos na idade de 28 dias, os corpos de prova com uma e quatro camadas do têxtil na orientação da trama, atingiram valores superiores à urdidura em, respectivamente, 53,07% e 4,13%, por outro lado, os compósitos reforçados com duas e três camadas de têxtil na orientação da urdidura, alcançaram valores 2,5% e 11,09% superiores aos obtidos com a orientação na direção da trama.

O comportamento à flexão do TRC parece não ter sido influenciado pelo módulo de elasticidade e pela resistência à tração do têxtil, ao contrário de como descreve Hawkins et al. (2018), pois mesmo o fio da trama ter atingido maior resistência à tração e maior módulo de elasticidade em relação ao fio da urdidura, este comportamento não resultou em um compósito com a mesma tendência de desempenho, como expõe Zani et al. (2019), pois os compósitos com o têxtil na direção da trama não apresentaram as maiores resistências.

Em relação ao comportamento à tração, ao se comparar a resistência máxima com base na área do compósito, entre os resultados obtidos com o têxtil AR122 e AR192, os resultados na idade de 28 dias, os compósitos com duas camadas do têxtil AR192 na direção da trama e urdidura, respectivamente, foram 22,33% e 42,44% superiores ao têxtil AR122.

A mesma tendência ocorreu com os resultados à flexão, os compósitos com duas camadas do têxtil AR192 na idade de 28 dias, atingiram resultados máximos,

respectivamente, na direção da trama e urdidura 30,56% e 40,79% superiores aos obtidos com os compósitos com duas camadas do têxtil AR122.

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DO PAINEL

Após realização dos ensaios nos corpos de prova em escala reduzida, foram realizadas caracterizações do comportamento à flexão de corpos de prova de maior escala, denominados como painel, como requisito para se obter parâmetros aos modelos analíticos de dimensionamento do TRC.

Para isto, foram realizadas análises do comportamento à flexão em painéis com espessura de 20 e 30 mm, reforçados com têxtil AR192 na direção da trama e urdidura.

O têxtil AR192 foi adotada para esta análise, em virtude dos compósitos reforçados com este têxtil terem alcançado valores de resistência máxima superiores os obtidos com o têxtil AR122, para ambos os sentidos do têxtil, nos ensaios de resistência à tração e flexão.

Como os resultados à flexão, os compósitos de menor escala, até a quantidade de três camadas, para ambas as orientações do têxtil, são significativamente iguais, adotou-se como a análise preferencial o têxtil na posição de orientação da trama.

Além disso, o fio da trama apresentou valores de resistência e módulo de elasticidades superiores à urdidura e o módulo de elasticidades da trama atingiu valor superior a 70 GPa, como prerrogativa para inserção como reforço do concreto têxtil (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

Além do mais, em estudo realizado por Giese (2019), a autora utilizou e recomendou o posicionamento do têxtil na direção da trama de modo paralelo ao esforço de tração.

Os resultados destas análises estão reunidos na Tabela 32, junto com os valores da força crítica e máxima, deslocamento no instante de formação da primeira fissura e da força máxima, além dos respectivos momentos fletores.

Tabela 32 – Resultados da resistência à flexão dos painéis

Corpo de prova	$f_{cr}$ (N)	$\delta_{cr}$ (mm)	$M_{cr}$ (N.mm)	$f_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)	$M_{max}$ (N.mm)
2T T 20 A	785,9	1,19	119.849,75	2.236,6	139,42	341.081,50
2T T 20 B	869,0	1,21	132.522,50	2.840,4	138,35	433.161,00
<b>Média</b>	<b>827,5</b>	<b>1,20</b>	<b>126.186,13</b>	<b>2.538,5</b>	<b>138,88</b>	<b>387.121,25</b>
2T U 20 A	1.583,8	1,89	241.529,50	3.452,0	84,69	526.430,00
2T U 20 B	1.266,0	1,21	193.065,00	1.896,3	100,81	289.185,75
<b>Média</b>	<b>1.424,9</b>	<b>1,55</b>	<b>217.297,25</b>	<b>2.674,2</b>	<b>92,75</b>	<b>407.807,88</b>
3T T 20 A	1.185,1	0,48	180.727,75	3.087,8	127,70	470.889,50
3T T 20 B	974,7	1,01	148.641,75	4.284,6	145,77	653.401,50
<b>Média</b>	<b>1.079,9</b>	<b>0,74</b>	<b>164.684,75</b>	<b>3.686,2</b>	<b>136,73</b>	<b>562.145,50</b>
2T T 30 A	2.043,2	1,87	311.588,00	5.277,0	87,40	804.742,50
2T T 30 B	2.639,0	1,98	402.447,50	5.497,5	70,77	838.368,75
<b>Média</b>	<b>2.341,1</b>	<b>1,93</b>	<b>357.017,75</b>	<b>5.387,3</b>	<b>79,09</b>	<b>821.555,63</b>
Legenda: $f_{cr}$ Carga Crítica; $\delta_{cr}$ Deslocamento crítico; $M_{cr}$ Momento Crítico; $f_{max}$ Carga máxima; $\delta_{max}$ Deslocamento máximo; $M_{max}$ Momento máximo						

A quantidade de camadas influenciou na resistência máxima dos painéis, pois os corpos de prova com três camadas de têxtil atingiram força máxima média superior à situação com duas camadas. Este comportamento também foi observado com a força necessária para formar a primeira fissura. Estes comportamentos corroboram com os resultados obtidos nas amostras com escala reduzida, onde a força máxima acompanhou o aumento da taxa de reforço, quando analisado na direção da trama.

Quando analisada a força máxima dos corpos de prova com a quantidade de camadas, houve aumento de 45,21% da resistência à flexão, seguido pela redução do deslocamento em 1,55%, para com o painel com três camadas de têxtil.

A variação da espessura, mantendo a mesma quantidade de reforço, resultou em aumento da resistência máxima e crítico à flexão e diminuição da deformação no instante de força máxima, comportamento que satisfaz com a indicado nos estudos de Williams Portal et al. (2014) e Zargarán et al. (2017). O deslocamento e a força para formação da primeira fissura foram maiores, para espessura de 30 mm,

respectivamente em 60,83% e 182,91%, em relação a espessura de 20 mm. No que tange a influência na resistência máxima à flexão, o valor médio dos corpos de prova com 30 mm de espessura, houve aumento de 212,2% na resistência e diminuição em 56,94% no deslocamento em comparação os corpos de prova com espessura de 20 mm. Este comportamento corrobora com Zargaran et al. (2017), onde, a espessura do corpo prova afetou positivamente nos resultados à flexão.

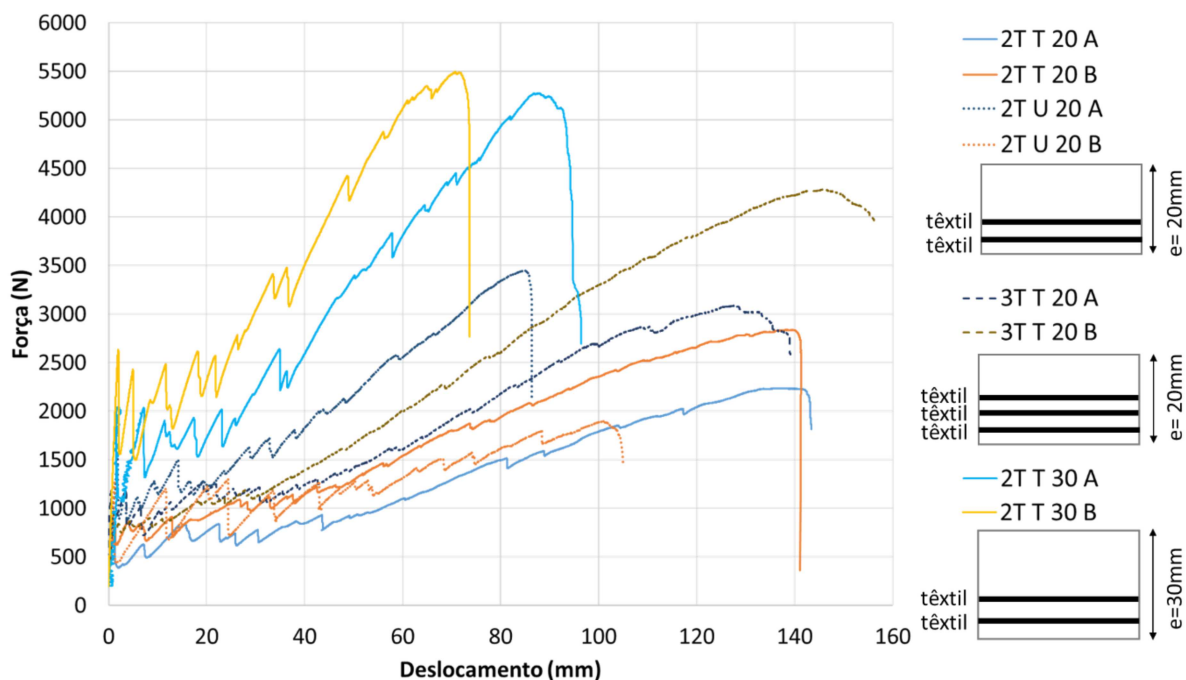
Ao se analisar a influência da orientação do têxtil, no sentido da urdidura, os corpos de prova atingiram valores de força máximos e crítica superiores aos exemplares com têxtil na direção da trama. Mesmo o fio da trama possuir maior resistência à tração e maior perímetro de contato com a matriz.

Na direção da urdidura, a primeira fissura foi formada com deslocamento e força maiores, respectivamente em 23,17% e 72,19%, quando comparado com a mesma quantidade de têxtil para a direção da trama. A força máxima superou em 5,35% e deslocamento diminuiu em 33,22% aos corpos de prova reforçadas com têxtil na direção da trama. (COLOMBO, 2015; ZANI et al., 2019).

Parece que a configuração enlaçada dos fios da urdidura desenvolveu efeito preponderante frente a resistência à flexão e ao deslocamento máximo, sobressaindo à menor resistência e menor perímetro do fio. Dado que, além da maior resistência à flexão, a urdidura atingiu menor deslocamento, o que pode ser atribuído a maior restrição ao escorregamento dos fios da urdidura causada pelo seu modo de fabricação (HAIK SASI; PELED, 2017).

Na Figura 96, são reunidos os diagramas de força vs deslocamento de todos os corpos de prova analisados.

Figura 96 – Diagramas Força x Deslocamento à flexão dos painéis



Os resultados do comportamento mecânico dos painéis sinalizaram atuação nos três estágios distintos, satisfazendo com isto as características do concreto têxtil submetido à flexão preconizadas por Peled, Bentur e Mobasher (2017).

O estágio I ocorreu nos corpos de prova, de modo geral, até deslocamento não superior a 2 mm, com o aumento da quantidade de têxtil, o deslocamento diminuiu e a carga necessária para formar a primeira fissura aumentou.

Com o surgimento da primeira fissura, o estágio IIA foi ingressado, pois houve quedas abruptas da força no diagrama com avanço do deslocamento, que indicaram a formação de múltiplas fissuras. Após este estágio, foi observado nos diagramas o ganho na capacidade de carga com aumento simultâneo do deslocamento, comportamento que indicou o não surgimento de que novas fissuras e apenas aumento da abertura das existentes, logo, esta ocorrência sinalizou a atuação do estágio IIB.

Sendo assim, como ocorrido nos corpos de prova de menor escala, os painéis apresentaram, de acordo com Valeri et al. (2020), comportamento dúctil após a formação da primeira fissura.

A carga máxima à flexão foi obtida quando a aderência do têxtil com a matriz não foi suficiente para suportar as cargas, pois a falha do compósito ocorreu com o escorregamento do têxtil, com redução gradativa da carga e aumento do

deslocamento até a ruptura total do compósito. Este comportamento caracterizou o estágio III (SCHUMANN et al., 2018).

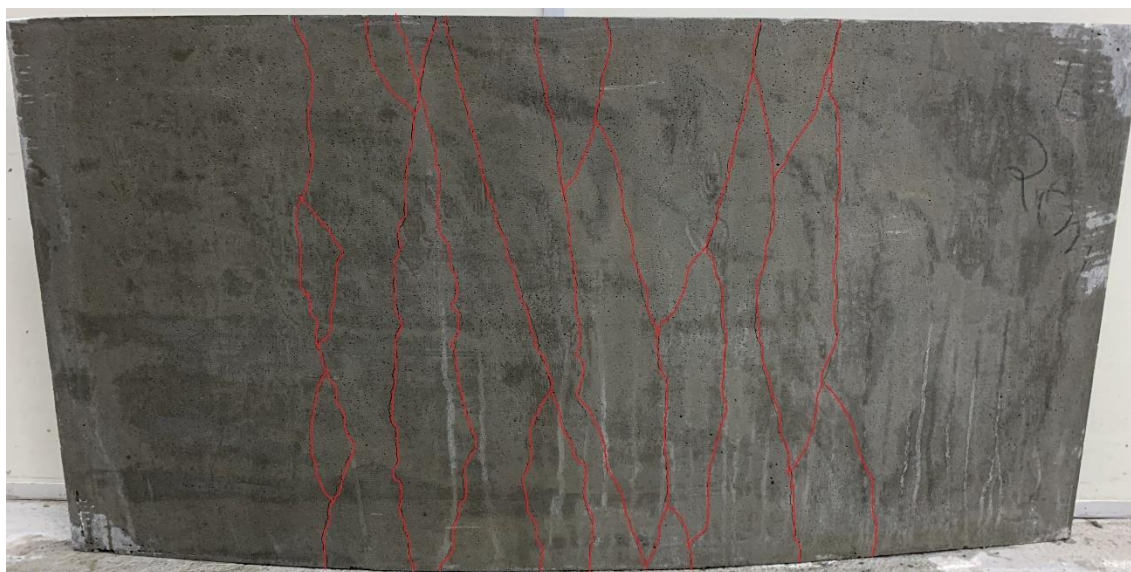
Importante destacar, que as variações entre os valores máximos de carga, podem ser atribuídos ao posicionamento do têxtil no interior da matriz, que ocorreram de forma manual, pode ter havido alguma diferença de posicionamento. Além do mais, conforme Giese (2019), existem ainda pequenas variações entre distâncias dos fios da trama e urdidura que são inerentes ao processo de fabricação do têxtil.

Os aspectos finais dos corpos de prova após ensaio de flexão são apresentados na Figura 97 à Figura 107, sendo demonstradas as faces tracionadas (inferior) e a comprimida (superior).

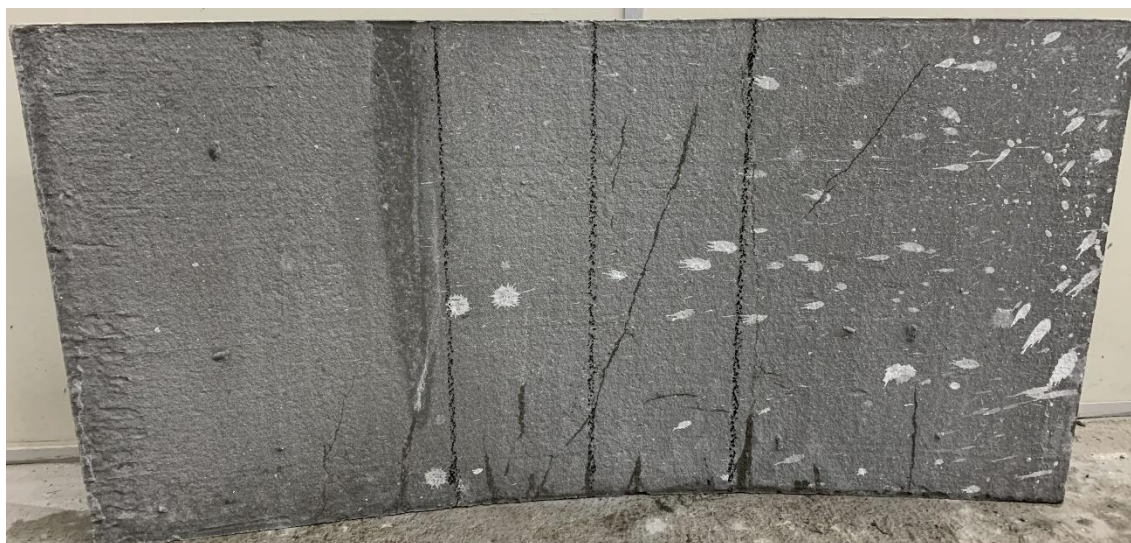
Em todos os corpos de prova analisados, a falha foi acompanhada com a propagação de múltiplas fissuras na face tracionada, concentradas no terço médio central. Em determinadas composições dos corpos de prova, foi possível observar ruptura da matriz por esforço excessivo de compressão.

Na Figura 97 e Figura 98 são apresentados os corpos de prova com duas camadas de têxtil com orientação da trama e espessura do compósito de 20 mm, após ensaio.

Figura 97 – Aspecto final dos corpos de prova AR192 2T A Trama após ensaio de flexão

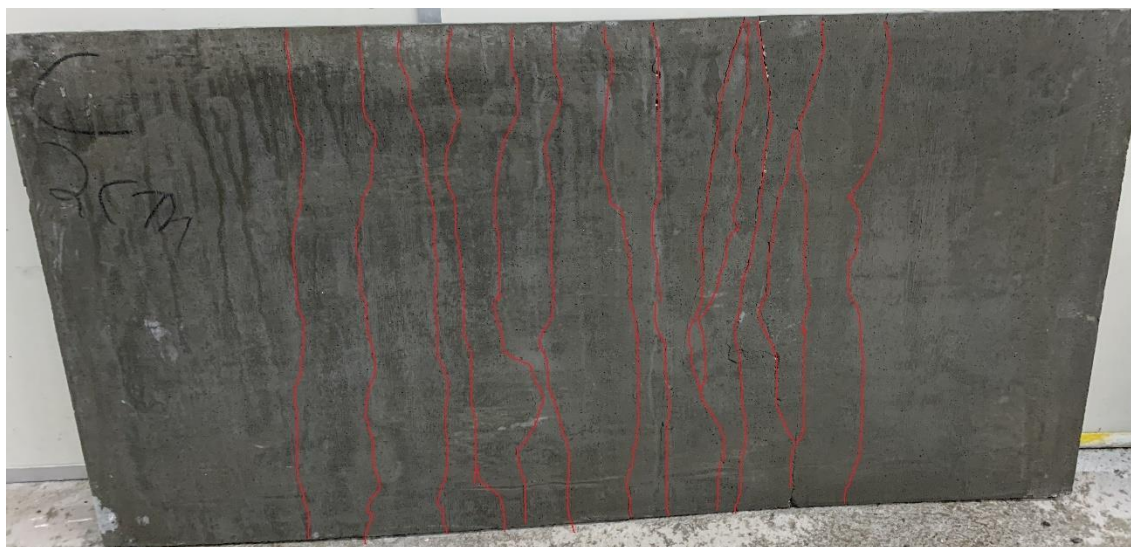


Face Tracionada



Face Comprimida

Figura 98 – Aspecto final dos corpos de prova AR192 2T B Trama após ensaio de flexão



Face Tracionada



Face Comprimida

Nestes corpos de prova a falha do compósito ocorreu com o escorregamento dos filamentos, precedido pela elevação da deformação, sem que a ruptura total dos filamentos ocorresse. O que caracterizou a falha dos compósitos por deficiências na aderência do têxtil com a matriz.

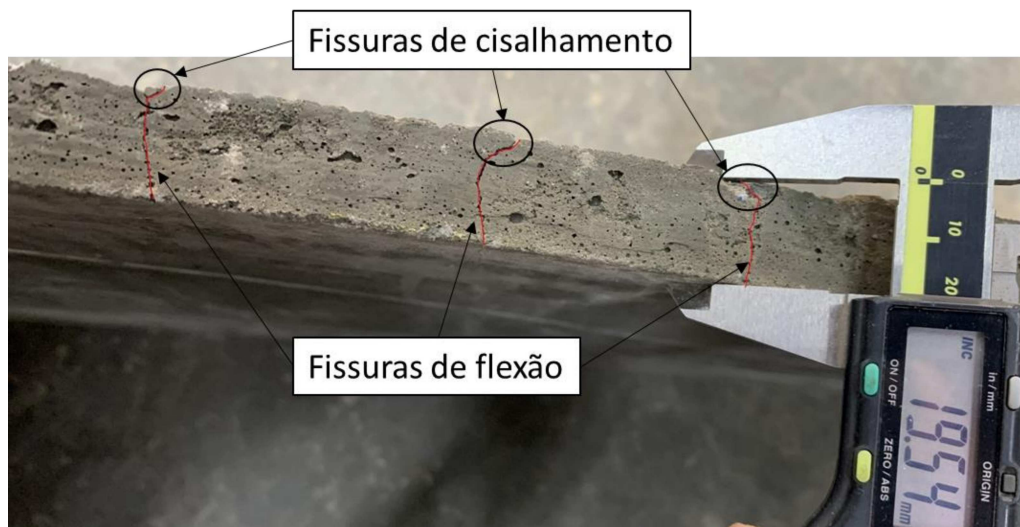
No corpo de prova B (Figura 97), foi observado o esmagamento parcial da matriz junto a face comprimida, no instante que ocorreu a falha parcial do têxtil, localizada na face oposta ao esmagamento da matriz. Esta manifestação foi caracterizada com característico de elementos sub-reforçados, pois a ruptura do



compósito ocorreu com falha do reforço por escorregamento, seguido pela ruptura por compressão da matriz (EL-SHERIF; WAKJIRA; EBEAD, 2020).

Nesta tipologia, identificou-se na seção longitudinal dos corpos de prova, ao longo da espessura, avanço das fissuras da face tracionada para a comprimida com configuração vertical e inclinada, como apresentado na Figura 99.

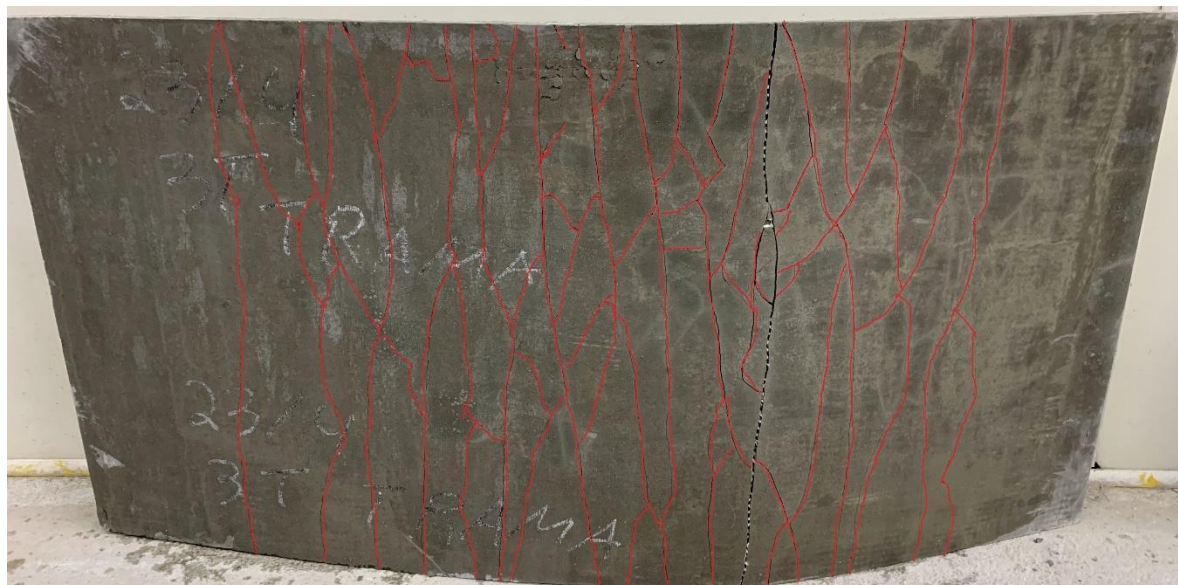
Figura 99 – Mecanismo de falha e fissura de cisalhamento e flexão



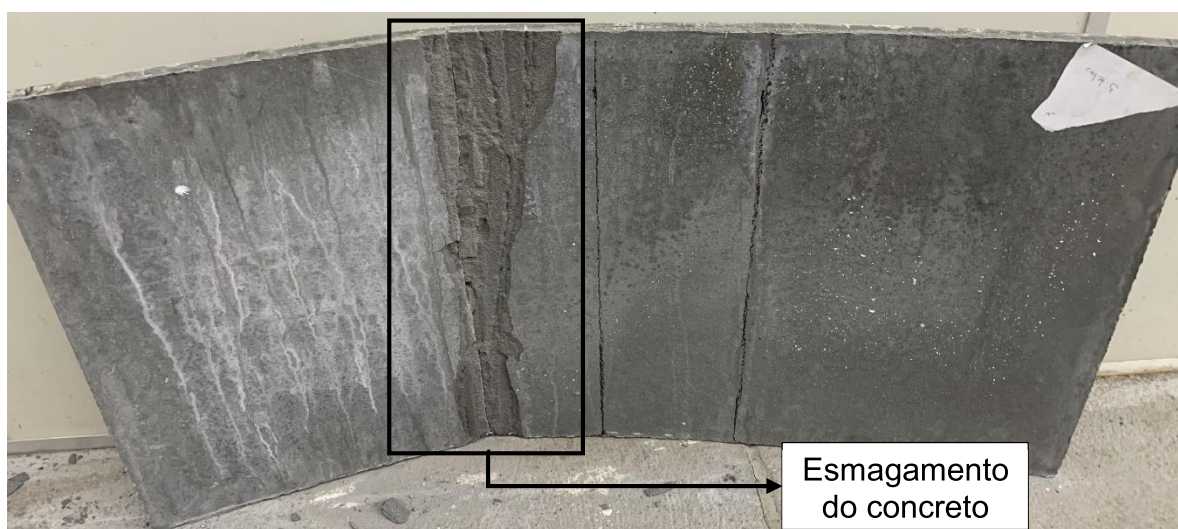
A configuração da fissura vertical, junto a face tracionada foi atribuída ao formato típico do esforço de flexão, à medida que se aproxima da face comprimida, a fissura migrou em um ângulo para a direção da introdução da carga, o que caracterizou esforço de cisalhamento (KAMANI; DOLATABADI; JEDDI, 2018).

Na Figura 100 e Figura 101 são apresentados os aspectos finais da face tracionada e comprimida dos corpos de prova A e B, respectivamente, reforçados com três camadas de têxtil na orientação da trama, após ensaio de flexão.

Figura 100 – Aspecto final dos corpos de prova AR192 3T Trama, amostra A após ensaio de flexão

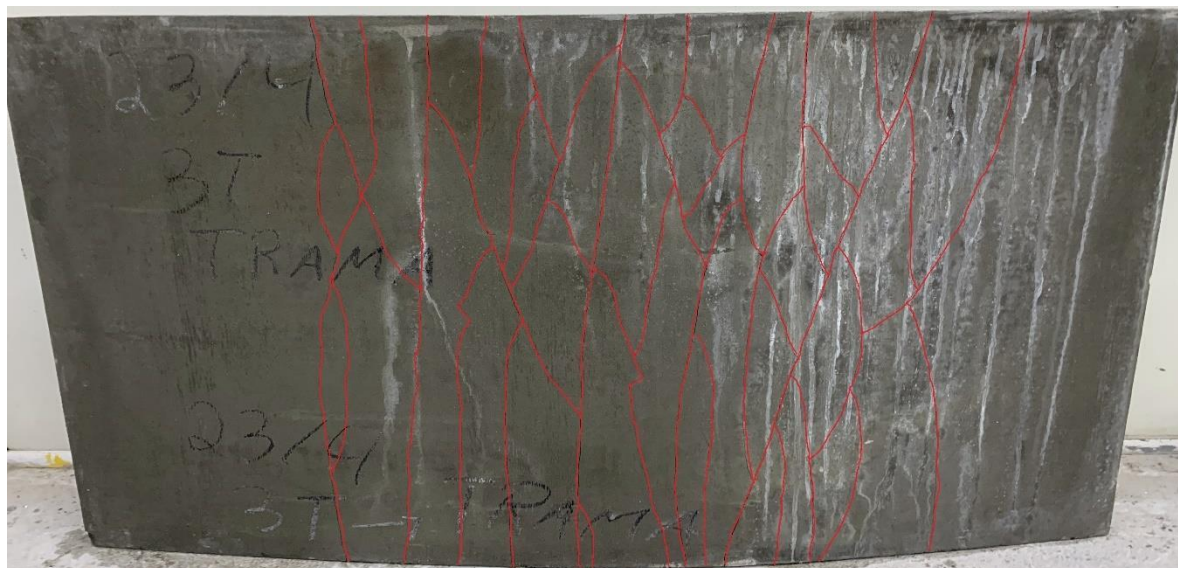


Face Tracionada

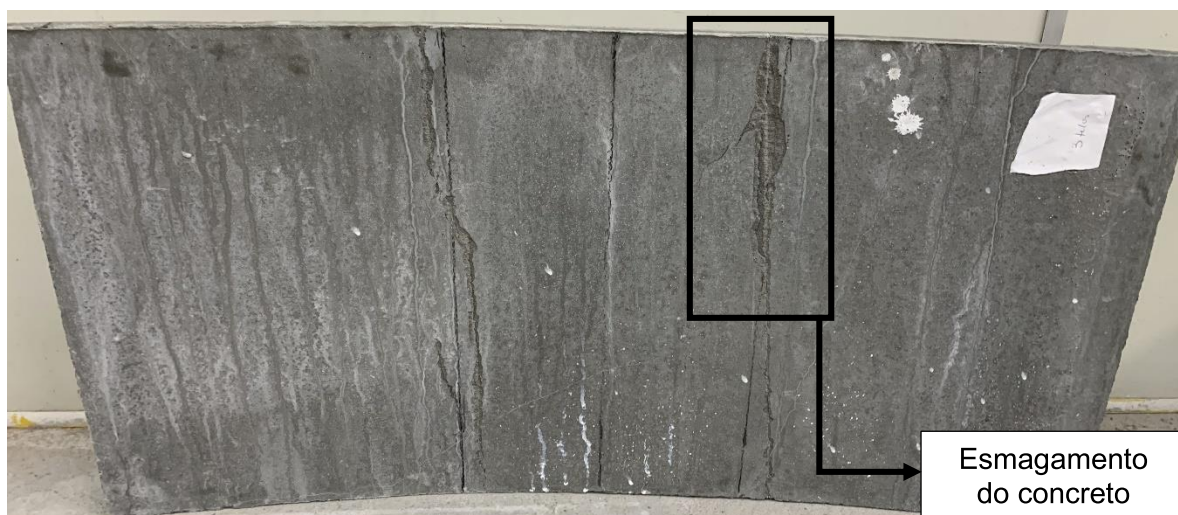


Face Comprimida

Figura 101 – Aspecto final dos corpos de prova AR192 3T Trama, amostra B após ensaio de flexão



Face Tracionada



Face Comprimida

Como observado nos compósitos com duas camadas de têxtil na direção da trama, a falha ocorreu com o escorregamento dos filamentos externos, sem ruptura total do têxtil. Ao passo que, também ocorreu esmagamento da matriz por excesso do esforço de compressão. Como anteriormente discutido por El-Sherif; Wakjira; Ebead (2020), sendo um comportamento típico de elementos sub-reforçados.

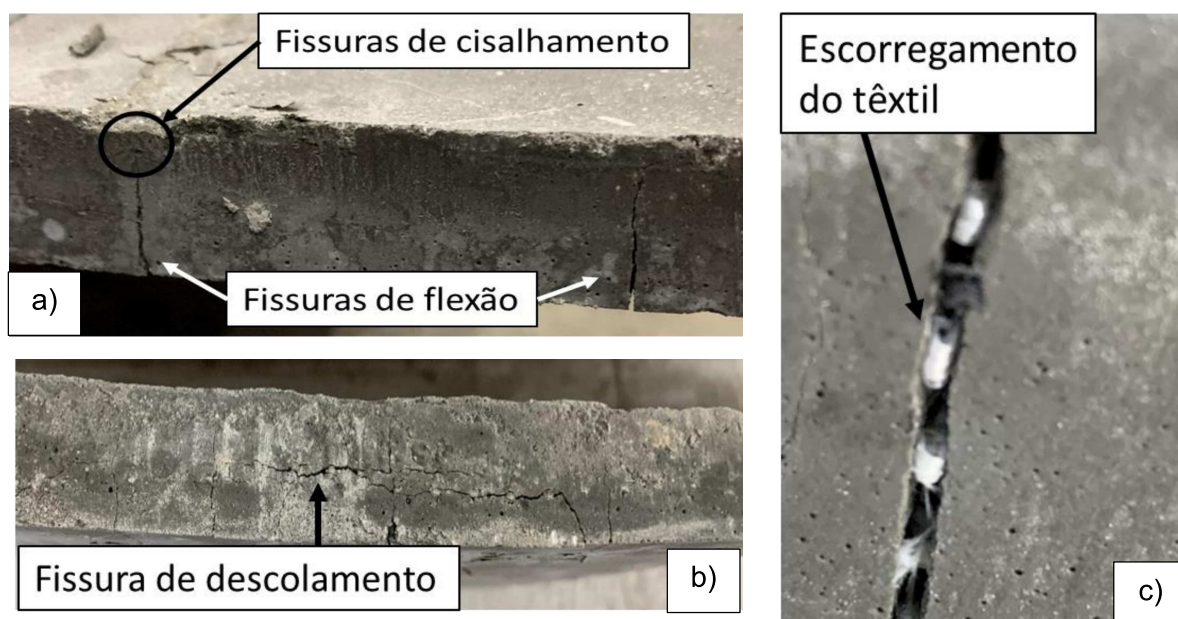
Na face tracionada, houve surgimento de múltiplas fissuras, enquanto, na face comprimida ocorreu esmagamento do concreto por compressão junto a fissura de falha do compósito.

Com o aumento da quantidade de reforço, a ruptura parcial da fração comprimida da seção transversal do compósito foi mais expressiva, quando comparada com os corpos de prova reforçadas com duas camadas para a mesma orientação do têxtil.

Sendo assim, entende-se que a falha dos painéis ocorreu por deficiências na aderência do têxtil com a matriz e por esmagamento da matriz e não por ruptura do têxtil.

Como ocorrido nos corpos de prova contendo duas camadas do têxtil na direção da trama, foram observados na seção longitudinal dos corpos de prova fissuras verticais e inclinadas, além de fissura paralela ao têxtil, estas ocorrências são destacadas na Figura 102, juntamente com a demonstração do escorregamento do têxtil.

Figura 102 – Mecanismo de falha do compósito, a) fissuras de cisalhamento e flexão; b) fissura de descolamento; c) escorregamento do têxtil



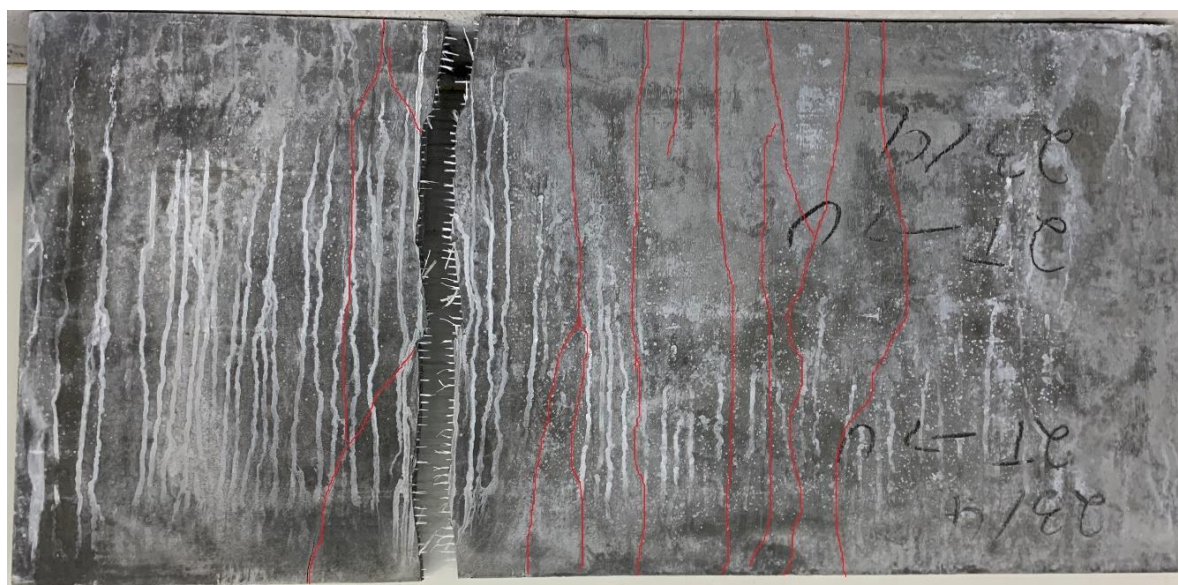
A Figura 102a demonstra fissuras verticais na seção longitudinal, as quais apresentaram similaridade com as ocorridas nos corpos de prova com duas camadas do têxtil na direção da trama, foi possível também evidenciar a ruptura parcial da matriz em local próximo a fissura de cisalhamento à flexão (KULAS, 2013).

Uma fissura longitudinal se formou paralela ao reforço (Figura 102b), segundo Kulas (2013), decorrente a pressão interna transversal do têxtil na matriz, o que provocou descolamento parcial da matriz na camada de cobrimento.

A falha do compósito por escorregamento do têxtil após a carga máxima foi evidenciada na Figura 102c, situação que após a retirada da carga, ocorreu a dobra dos fios do têxtil, situação que segundo Kamani, Dolatabadi e Jeddi, (2018), sinalizou o escorregamento do têxtil no interior da matriz.

Nos corpos de prova reforçados com duas camadas do têxtil na direção da urdidura, a Figura 103 e Figura 104 apresentam os aspectos finais dos corpos de prova após o ensaio de flexão.

Figura 103 – Aspecto final dos corpos de prova AR192 2T Urdidura após ensaio de flexão, amostra A

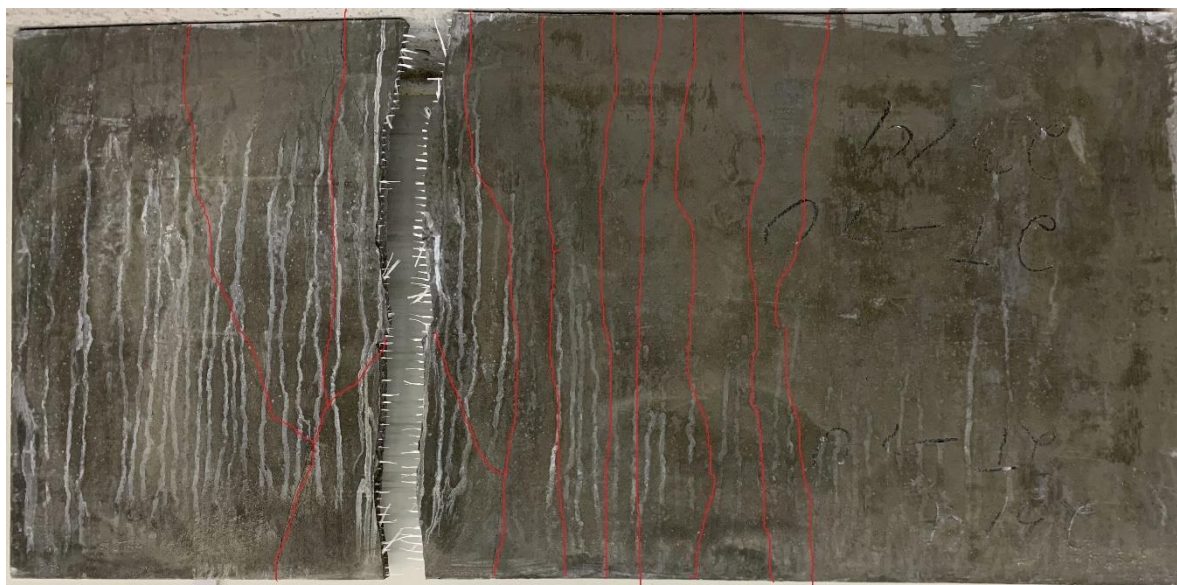


Face Tracionada



Face Comprimida

Figura 104 – Aspecto final dos corpos de prova AR192 2T Urdidura após ensaio de flexão, amostra B



Face Tracionada



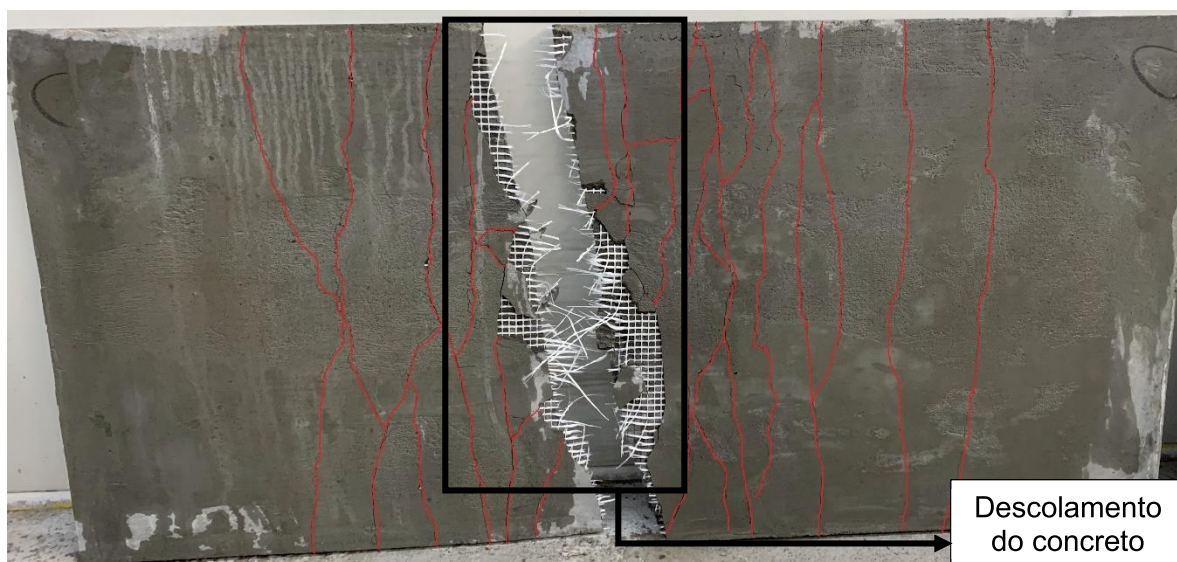
Face Comprimida

Ao contrário do que foi observado na forma de falha do painel contendo duas camadas do têxtil na direção da trama, nos corpos de prova com têxtil na orientação da urdidura, a falha do compósito resultou na ruptura total do têxtil.

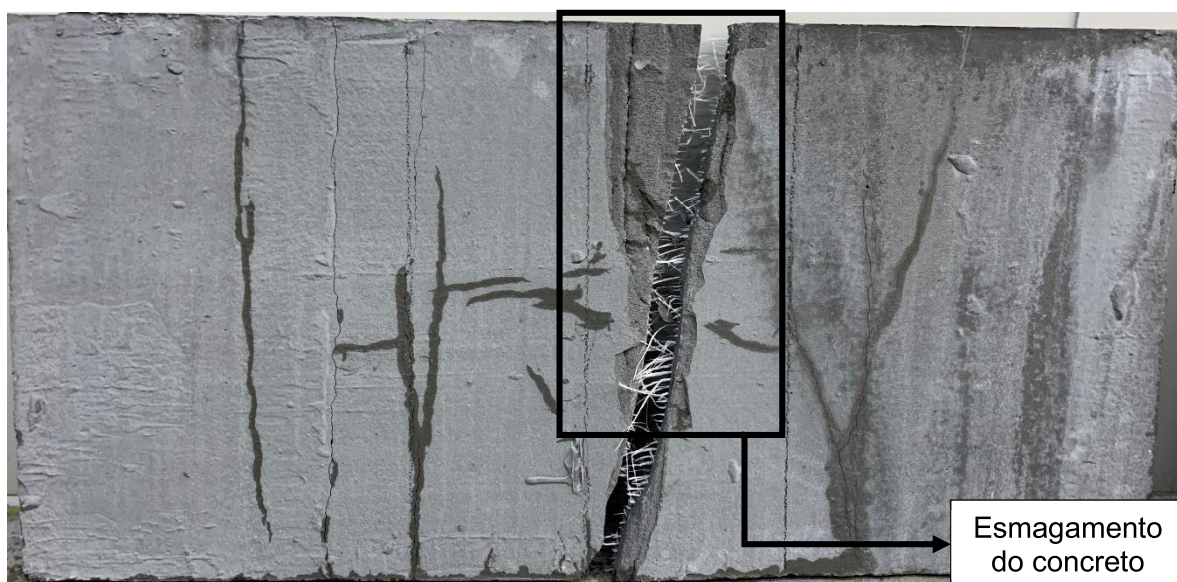
Em ambas as amostras, ocorreram o crescimento das fissuras na face tracionada com a ruptura total do reforço em uma determinada fissura, sem atingir o limite máxima à compressão da matriz, o que caracteriza a quantidade de reforço como sub-reforçada (ACI 440.1R.15, 2015).

Na Figura 105 e Figura 106 são apresentadas as faces tracionadas e comprimidas dos respectivos corpos de prova com espessura de 30 mm, reforçados com duas camadas de têxtil na direção da trama após o ensaio de flexão.

Figura 105 – Aspecto final dos corpos de prova AR192 2T Trama com espessura de 30 mm após ensaio de flexão corpo de prova A



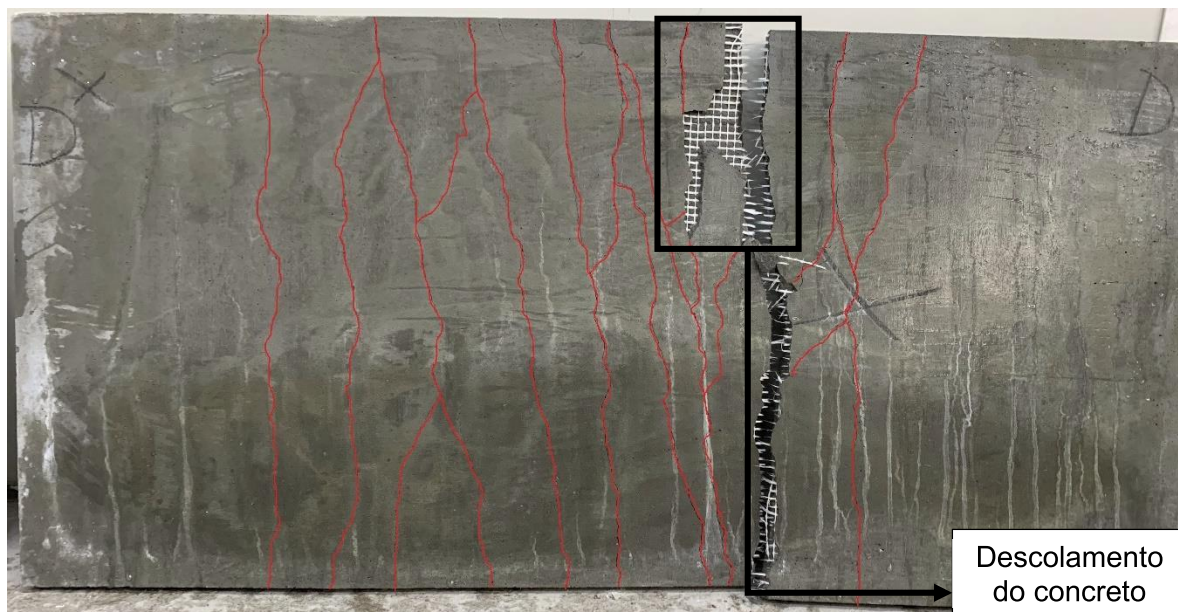
Face Tracionada



Face Comprimida



Figura 106 – Aspecto final dos corpos de prova AR192 2T Trama com espessura de 30 mm após ensaio de flexão, corpo de prova B



Face Tracionada



Face Comprimida

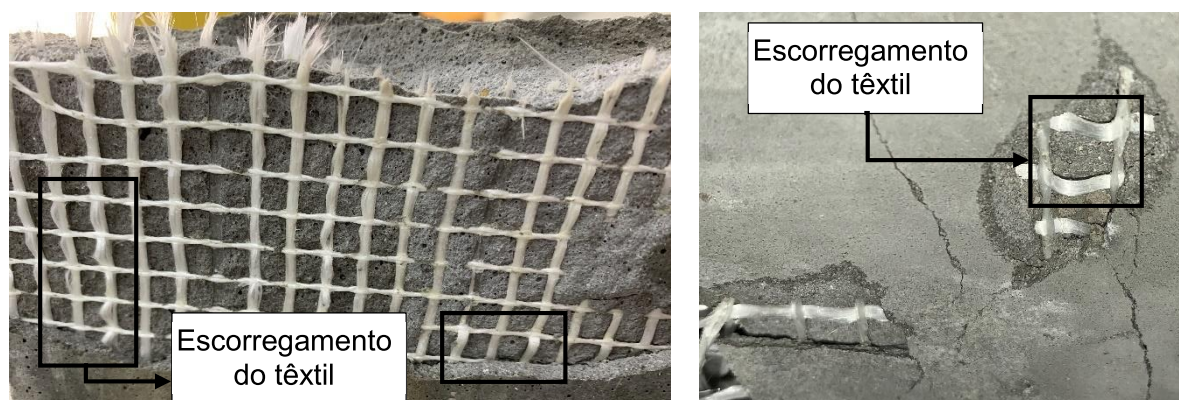
Observou semelhança na configuração de ruptura entre os corpos de prova com reforço orientado para a urdidura e os corpos de prova com espessura de 30 mm, pois além da manifestação de múltiplas fissuras localizadas no terço médio central da face tracionada, com manifestação parcial de esmagamento da matriz por compressão, a falha do compósito aconteceu com a ruptura total do têxtil concentrada

em uma fissura. Este comportamento também foi caracterizado como elemento sub-reforçado (ACI 440.1R.15, 2015).

Com o aumento na espessura, a configuração de falha do compósito não apresentou a mesma tendência do observado nos corpos de prova com espessura de 20 mm, pois o aumento na espessura promoveu a ruptura total do têxtil (KULAS, 2013).

Também foi evidenciado manifestação de descolamento parcial da matriz na espessura do cobrimento inferior do têxtil, juntamente com o escorregamento do têxtil como demonstrado na Figura 107.

Figura 107 – Escorregamento do têxtil

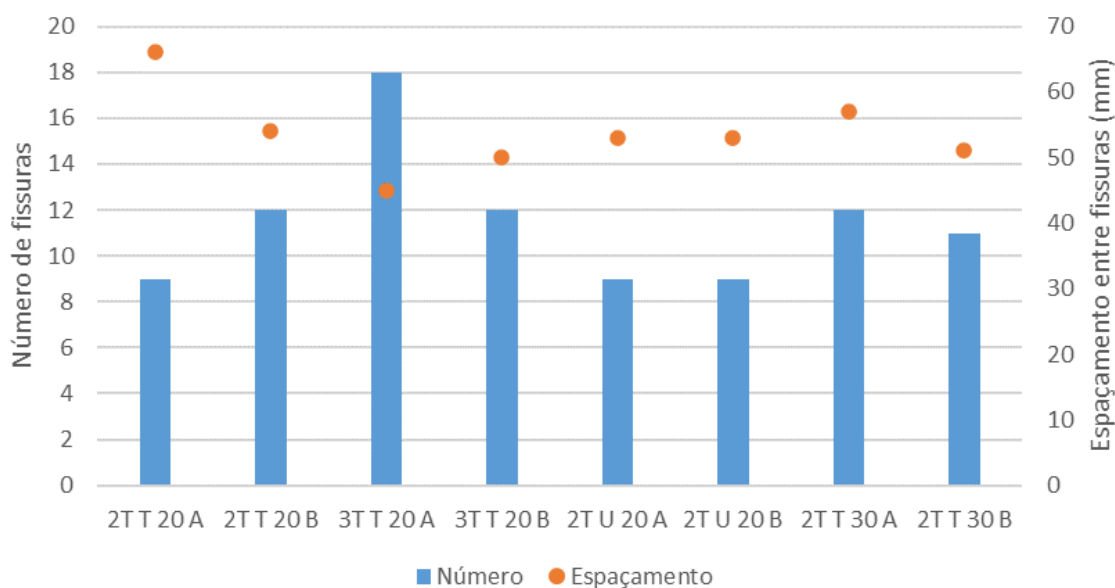


Pressões internas transversais causadas pelo têxtil também foram evidenciadas, no entanto, com maiores intensidades, ao ponto de desenvolver maior área descolada da matriz (KULAS, 2013).

Além do mais, a ocorrência do escorregamento do têxtil também foi evidenciada pela verificação da dobra do fio (KAMANI; DOLATABADI; JEDDI, 2018 e EL-SHERIF; WAKJIRA; EBEAD, 2020).

Na Figura 108 são reunidos o número das fissuras, bem como o espaçamento de todas os painéis analisados à flexão.

Figura 108 – Quantidade de fissuras e espaçamento



De modo geral, a quantidade de duas e três camadas e a orientação não influenciaram no número de fissuras e no espaçamento, tampouco entre espessuras dos painéis. A quantidade de fissuras se manteve entre 12 e 9 entre as distinções analisadas. Não sendo possíveis indicar influência na formação de fissuras.

Após os ensaios nos corpos de prova do TRC com o reforço orientado ao longo da direção da trama, os resultados apontaram valores de resistência e comportamento satisfatórios, que caracterizam o atendimento as propriedades desejadas do TRC.

#### 4.5 MODELO ANALÍTICO DE DIMENSIONAMENTO

A situação de uso do TRC, pode ser caracterizada em análise do comportamento à flexão, além do mais, como destacado por Vlach et al. (2018), os modelos teóricos de dimensionamento podem ser validados por ensaios experimentais de flexão, visto que simularam as condições próximas às reais do concreto têxtil.

Para tanto, os modelos de dimensionamento analíticos discorreram nos valores referentes à resistência máxima de flexão, logo, não levaram em consideração os valores da resistência crítica e deslocamento.

Importante destacar quem, como o têxtil AR192, em decorrência do comportamento mecânico isolado e em conjunto com a matriz, terem alcançados valores superiores ao têxtil AR122, o têxtil AR122 não foi considerado nesta análise.

Para determinação dos parâmetros de dimensionamento analítico, tomou como base apenas a orientação da trama, pois o comportamento mecânico, quando isolado, apresentou desempenho superior à orientação da urdidura, no que tange a resistência à tração e ao módulo de elasticidade. Além do mais, mesmo o módulo de elasticidade do fio na orientação da urdidura ter apresentado valor superior ao módulo de elasticidade da matriz cimentícia, porém inferior a 70 GPa, o que segundo Grie et al. (2006) e Peled (2018), pode não ser indicado como elemento de reforço estrutural.

Ademais, conforme Contamine, Junes e Si Larbi (2014), o índice de eficiência do reforço é influenciado pelo módulo de elasticidade do fio. Além disso, segundo Giese (2019), ao utilizar o têxtil na direção da trama de mesma tipologia do empregado neste estudo, para reforço de vigas de concreto armado, o têxtil na direção da trama apresentou comportamento mecânico de modo efetivo como reforço. Sendo assim, os autores indicam que o uso do têxtil na direção da trama se mostrou de modo eficaz no TRC.

Além do que, nos ensaios experimentais, os resultados demonstram que o uso da orientação da trama como reforço, resultou em compósitos de comportamento que satisfizeram as características desejadas do TRC.

#### **4.5.1 Modelo I**

A determinação dos valores teóricos de momento fletor para TRC, o modelo I de dimensionamento analítico foi utilizado, para isto, definiu-se o coeficiente de eficiência do têxtil ( $k_1$ ).

Como a resistência à tração do reforço têxtil no interior da matriz cimentícia foi menor do que a dos fios individuais, uma vez que a ligação das fibras externas com a matriz levou a uma distribuição não uniforme da tensão no fio, esses efeitos foram, portanto, quantificados pelo fator de eficiência  $k_1$  para cada combinação quantidade de têxtil (HAWKINS et al., 2018).

Dado que, conforme Hegger et al. (2006a), o valor de  $k_1$  pode ser diferente nas direções de orientação e nas diferentes quantidades de têxtil, deste modo, foi determinado experimentalmente a resistência à tração nos corpos de prova de TRC e dos fios isolados, tomando como base a resistência média dos materiais obtidos nos ensaios específicos.

Para determinação dos valores de  $k_1$ , relacionou-se os valores individuais da força máxima de ruptura de TRC ( $P_{TRC}$ ), com valores da tensão máxima média à tração do fio ( $\sigma_f$ ) e a área total do reforço ( $A_t$ ) referente a quantidade de camadas na amostra de TRC, representada na Equação 24, adaptada dos modelos de Hegger, Zell e Voss (2008), Du et al. (2017), Valeri, Ruiz e Muttoni (2018) e Rampini et al. (2019), anteriormente discutidos.

$$k_1 = \frac{P_{TRC}}{A_t \times \sigma_f} \quad \text{Equação 24}$$

A determinação do valor de  $k_1$  para a distinção uma camada de têxtil, contou-se com todas os corpos de prova de TRC válidas, independentemente da idade, em decorrência da pequena quantidade de resultados válidas de cada idade.

Os valores utilizados para determinação do  $k_1$ , assim como os valores do coeficiente de eficiência de cada amostra são reunidos na Tabela 33.

Tabela 33 – Coeficientes de eficiência para as amostras reforçadas com uma camada na direção da trama

Corpo de prova	Tensão de tração máxima TRC (N/mm <sup>2</sup> )	Força de tração máxima TRC (N)	Tensão média de tração do fio (N/mm <sup>2</sup> )	Área total dos fios (mm <sup>2</sup> )	$k_1$
7d 192 1T T A	4,04	2.908,80			1,126
7d 192 1T T D	3,37	2.426,4			0,939
28d 192 1T T B	4,43	3.189,6			1,235
28d 192 1T T C	3,53	2.541,6	1.247,91	2,07	0,984
91d 192 1T T A	2,83	2.037,6			0,789
91d 192 1T T D	3,23	2.325,6			0,900
Média	3,57	2.571,6			<b>0,996</b>

O valor médio do  $k_1$  obtido com a relação de todos os corpos de prova de TRC ensaiadas à tração, contendo uma camada de reforço na direção da trama foi de 0,996, valor superior ao obtido no estudo de Hawkins et al. (2018), no qual os autores determinaram o valor de 0,814 para uma camada de têxtil de vidro AR do tipo leno para a direção do fio trama.

A fim de validar o valor de  $k_1$ , relacionou-se o momento fletor último teórico ( $M_u$ ), obtido através das Equação 25 e Equação 26, com o momento fletor experimental.

$$F_{ctu} = A_t \times \sigma_f \times k_1 \times k_{0,\alpha} \times k_2 \quad \text{Equação 25}$$

$$M_u = k_{fl,p} \times F_{ctu} \times z \quad \text{Equação 26}$$

Para determinação da força máxima à tração ( $F_{ctu}$ ) e o momento fletor último teórico, foi considerado o valor médio de  $k_1$ , e atribuídos os respectivos valores para as constantes  $k_{0,\alpha} = 1$ ,  $k_2 = 1$  e  $k_{fl,p} = 1,0$  (VOSS, 2008 e SILVA; SILVA, 2020).

A distância do braço de alavanca interno ( $z$ ), foi determinada através da Equação 12, demonstrada no item 2.6.1, considerando os parâmetros da deformação máxima do fio ( $\varepsilon_{fu}$ ) e da deformação do concreto ( $\varepsilon_{cu}$ ), atribuído em 3‰, conforme ACI 440.1R.15 (2015) e a distância entre o centroide do reforço até a superfície comprimida, neste trabalho definida para todos os corpos de prova em 6 mm.

Tendo em vista, que os valores dos modelos teóricos podem não representar o comportamento efetivo do compósito (SILVA; SILVA, 2020). Determinou-se o erro relativo entre os valores de momento fletor teórico com o experimental dos corpos de prova ensaiados aos 28 dias, calculado conforme Equação 27.

$$\text{Erro relativo} = \frac{|Mu_{teórico} - Mu_{experimental}|}{Mu_{experimental}} \quad \text{Equação 27}$$

Os valores utilizados para estabelecer o momento fletor teórico, os respectivos erros relativos, são demonstrados na Tabela 34, juntamente com os erros relativos de cada corpo de prova, além dos valores médios.

Tabela 34 – Resultados do momento fletor teórico e erro relativo dos corpos de prova com uma camada de têxtil

Corpo de prova	Momento fletor experimental (Nmm)	Área total dos fios (mm <sup>2</sup> )	Força de tração teórica média (N)	Z (mm)	Momento fletor teórico (Nmm)	Erro relativo
A	24.475,00					0,02
B	24.018,50					0,00
C	21.296,00	3,45	4.288,07	5,6	24.013,19	0,13
D	19.651,50					0,22
Média	22.360,25					<b>0,09</b>

O erro relativo médio entre os valores do momento fletor teórico e o experimental foi de 0,09, sendo assim, destaca-se que houve uma diferença no

modelo teórico de dimensionamento analítico em 9% com os resultados experimentais dos corpos de prova reforçados com uma camada na direção da trama.

Os valores apontados para  $k_1$  para os TRC com idade de 28 dias reforçados com duas camadas de têxtil são Tabela 35.

Tabela 35 – Coeficientes de eficiência para as amostras reforçadas com duas camadas na direção da trama

Corpo de prova	Tensão de tração máxima TRC (N/mm <sup>2</sup> )	Força de tração máxima TRC (N)	Tensão média de tração do fio (N/mm <sup>2</sup> )	Área total dos fios(mm <sup>2</sup> )	$k_1$
28d 192 2T T A	6,99	5.032,80			0,974
28d 192 2T T B	5,79	4.168,80			0,807
28d 192 2T T C	5,63	4.053,60	1247,91	4,14	0,785
28d 192 2T T D	6,59	4.744,80			0,918
Média	6,25	4.500,00			<b>0,871</b>

Para os corpos de prova com duas camadas de reforço na direção da trama, o valor médio de  $k_1$  foi de 0,871. Valor inferior ao encontrado para os corpos de prova com uma camada de têxtil orientado na direção da trama.

Os resultados do momento fletor teórico obtidos, considerando os mesmos valores constantes utilizadas na análise com uma camada, foram adotadas para determinar os resultados dispostos na Tabela 36.

Tabela 36 – Resultados do momento fletor teórico e erro relativo para amostras com duas camadas de reforço na direção da trama

Corpo de prova	Momento fletor experimental (Nmm)	Área total dos fios (mm <sup>2</sup> )	Força de tração teórica média (N)	Z (mm)	Momento fletor teórico (Nmm)	Erro relativo
A	42.729,75					0,02
B	43.165,50					0,03
C	34.041,00	6,90	7.499,81	5,6	41.998,86	0,23
D	38.036,25					0,10
Média	39.493,13					<b>0,10</b>

O erro relativo médio entre os valores de momento fleto teórico e experimental foi de 0,10, ou seja, houve uma diferença relativa média de 10% entre os valores experimentais e os determinados pelo modelo teórico de dimensionamento analítico.

Ao serem relacionadas os resultados dos TRC contendo três camadas de têxtil, na idade de 28 dias, os valores determinados de  $k_1$  são apresentados na Tabela 37, bem como os parâmetros utilizados para alcançar o coeficiente.

Tabela 37 – Coeficientes de eficiência para as amostras reforçadas com três camadas na direção da trama

Amostra	Tensão de tração máxima TRC (N/mm <sup>2</sup> )	Força de tração máxima TRC (N)	Tensão média de tração do fio (N/mm <sup>2</sup> )	Área total dos fios (mm <sup>2</sup> )	$k_1$
28d 192 3T T A	7,78	5.601,60			0,723
28d 192 3T T B	7,72	5.558,40			0,717
28d 192 3T T C	7,83	5.637,60	1.247,91	6,21	0,727
28d 192 3T T D	7,68	5.529,60			0,714
Média	7,75	5.581,80			<b>0,720</b>

O valor médio do coeficiente  $k_1$  foi de 0,72, valor inferior aos encontrados com os TRC reforçados com uma e duas camadas de têxtil.

O erro relativo entre os resultados dos momentos fletores teóricos e experimentais são apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 – Resultados do momento fleto teórico e erro relativo para amostras com três camadas de reforço na direção da trama

Amostra	Momento fleto experimental (Nmm)	Área total dos fios (mm <sup>2</sup> )	Força de tração teórica média (N)	Z (mm)	Momento fleto teórico (Nmm)	Erro relativo
A	37.390,50					0,39
B	41.963,25					0,24
C	41.889,75	10,35	9.299,43	5,6	52.076,81	0,24
D	45.759,00					0,14
Média	41.750,63					<b>0,25</b>



No que tange ao erro relativo médio entre a relação do modelo teórico e o experimental, foi obtido o valor de 0,25.

Foi evidenciado que o coeficiente de eficiência  $k_1$  diminui ligeiramente com o aumento do número de camadas de têxtil, por consequência da redução no desempenho de ligação entre o têxtil e a matriz desenvolvido com o aumento da quantidade de camadas (DU et al., 2017).

Para uma camada de têxtil, o valor de  $k_1$  é 0,996, para duas camadas o valor médio de  $k_1$  é 0,871, enquanto que para três camadas de têxtil, o valor de  $k_1$  diminui para 0,72, este comportamento corrobora com os resultados de Hegger et al. (2006a), Hawkins et al. (2018). Portanto, o comportamento da ligação entre os fios e a matriz é diminuído com o aumento da taxa de reforço, o que acarretou menores valores dos coeficientes de eficiência do TRC.

#### 4.5.1.1 Painel de maior escala

Com base nos valores do coeficiente de eficiência proveniente das amostras de menor escala, buscou-se validar os resultados do momento fletor teórico com o momento fletor experimental dos painéis.

Considerando o valor de  $k_1$ , conforme número de camadas de têxtil obtidos para os corpos de prova de menor escala, para os painéis com 2 camadas de têxtil, adotou-se  $k_1 = 0,871$  e para os com 3 camadas, o valor  $k_1 = 0,72$ , foram utilizados para determinar os valores da força de tração e o momento fletor teórico para os painéis.

Na Tabela 39 são reunidos os valores dos momentos fletores experimentais dos corpos de prova e o momento fletor teórico, alcançados conforme área do reforço correspondente. Além do mais, são apresentados os erros relativos, calculados com a Equação 27, para cada corpo de prova, entre os valores teóricos e os experimentais.

Tabela 39 – Análise do momento fletor teórico, momento fletor experimental e erro relativo para amostras de painéis

Amostra	Momento fletor experimental (Nmm)	Área total dos fios (mm <sup>2</sup> )	k <sub>1</sub>	Força de tração teórica média (N)	Momento fletor teórico (Nmm)	Erro relativo
2T T 20 A	341.081,50					0,594
2T T 20 B	433.161,00	34,5	0,871	37.499,07	543.736,52	0,255
Média	387.121,25					0,405
3T T 20 A	470.889,50					0,294
3T T 20 B	653.401,50	51,75	0,720	46.497,13	609.112,40	0,068
Média	562.145,50					0,084
2T T 30 A	804.742,50					0,114
2T T 30 A	838.368,75	34,5	0,871	37.499,07	896.227,77	0,069
Média	821.555,63					0,091

A relação entre o momento fletor experimental e o teórico, ao considerar os painéis com espessura de 20 mm, resultaram no erro relativo médio de 0,405 e 0,084, respectivamente para os painéis reforçados com duas e três camadas de têxtil. Ao considerar os resultados do painel com 30 mm, o erro relativo médio foi de 0,091.

Percebeu-se com isto, que houve maior semelhança entre os resultados teóricos e experimentais para as tipologias de análise 2T T 30 e 3T T 20. E a tipologia 3T T 20, melhor se aproximou do momento fletor experimental médio com o teórico médio, pois apresentou menor erro relativo.

Importante observar que os resultados teóricos do momento fletor apresentaram baixo teor de conservadorismo, uma vez que todos os valores teóricos foram superiores aos resultados experimentais.

No entanto, o modelo se mostrou adequado para prever a resistência da seção sob flexão pura, onde a ruptura foi governada pela resistência do reforço, uma vez que nos ensaios de flexão foi observado falhas do têxtil combinada com esmagamento da matriz (HAWKINS et al., 2018).

De modo geral, os acúmulos de erros oriundos dos resultados experimentais da tensão de tração do TRC e do fio, de acordo com Araújo (2019), podem promover variações entre os resultados teórico.

Por fim, apesar da variação apresentada entre os erros relativos, somadas com a dificuldade de quantificar de modo exato o instante da ruptura, foi possível estabelecer que o modelo I de dimensionamento analítico apresentou comportamento concordante com os valores atingidos nos modelos experimentais com a configuração de três camadas para a espessura de 20 mm e duas camadas para a espessura de 30 mm.

#### 4.5.2 Modelo II

Este modelo de dimensionamento analítico, toma como base, de forma análoga, o comportamento do concreto armado sob a capacidade de flexão das vigas, e relacionado com o concreto reforçado com têxtil.

As condições de equilíbrio das seções transversais dos elementos à flexão, foram calculadas considerando as propriedades mecânicas da matriz e do têxtil. Ao passo que a capacidade de momento fletor das seções sub e super reforçadas foram possíveis de serem determinadas estimando o valor FPI.

Para este fim, alguns parâmetros foram adotados como constantes nas verificações do momento fleto teórico, os quais são apresentados no Quadro 11

Quadro 11 – Valores constantes considerados no estudo

Parâmetro	Constante
Área do fio ( $A_f$ )	0,23 mm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidade do fio ( $E_f$ )	81.090 MPa
Módulo de elasticidade da matriz ( $E_c$ )	33.400 MPa
Resistência à compressão da matriz ( $f_c$ )	65 MPa
Resistência à tração do fio ( $f_{fu}$ )	1.247,91 MPa
Deformação específica do fio ( $\epsilon_{fu}$ )	0,0155 mm/mm
Deformação específica da matriz ( $\epsilon_{cu}$ ) (ACI 440.1R-15, 2015)	0,003 mm/mm

O valor adotado para FPI obteve o menor erro relativo entre a força teórica e a experimental, dentre uma faixa de valores de FPI, calculado conforme a Equação 28.

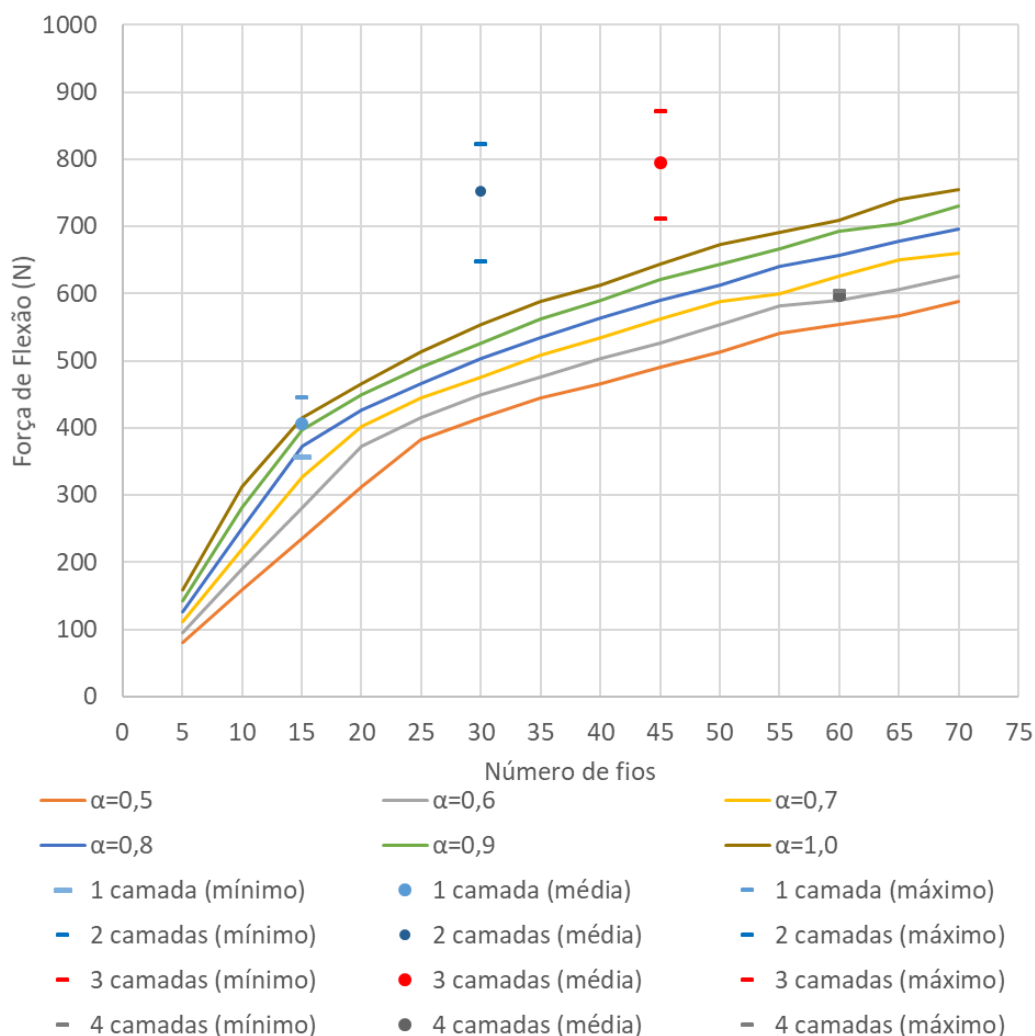
$$Erro\ relativo = \frac{|f_{teórico\ (média)} - f_{experimental}|}{f_{experimental}} \quad \text{Equação 28}$$

Os resultados dos corpos de prova de menor escala, com têxtil na direção da trama, foram analisados considerando os resultados obtidos para todas as quantidades de camadas ensaiadas e relacionados com o modelo teórico, a fim de se obter o valor de FPI que produziu o menor erro relativo.

Importante destacar que os valores experimentais dos corpos de prova com quatro camadas de têxtil não foram considerados nesta análise, uma vez que os resultados não oportunizaram o comportamento que pudesse caracterizar com propriedades de TRC.

Os valores teóricos da força máxima são resumidos na Figura 109, considerando os diferentes valores de FPI ( $\alpha$ ) e relacionados com os resultados experimentais para cada quantidade de camada do têxtil dos corpos de prova de menor escala.

Figura 109 – Capacidade da Força de flexão experimental e teórica em função do número de fio e do FPI



Os modelos teóricos foram sensíveis à proporção têxtil de tal forma, que a taxa de variação da força de flexão máxima foi em função da proporção de reforço, considerando a distância constante  $d$  em 6 mm. À medida que a taxa de reforço aumentou, consecutivamente, houve reflexo no crescimento da força (KAMANI; DOLATABADI; JEDDI, 2018).

Os valores dos erros relativos obtidos conforme a fixa de FPI de 0,5 a 1,0 estão reunidos na Tabela 40.

Tabela 40 – Erros relativos para os valores de FPI – amostras de escala reduzida

FPI ( $\alpha$ )	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Erro relativo	0,417	0,349	0,286	0,224	0,181	<b>0,159</b>

O menor erro relativo foi alcançado com o valor de FPI em 1,0, logo, quando relacionados com os resultados dos corpos de prova de menor escala para o têxtil com orientação da trama, sendo assim, foi possível visualizar que não houve perda da eficiência do reforço quando inserido na matriz, na ocasião de análise ao esforço de flexão. Os resultados dos valores da simulação teórico obtidos com o valor de FPI em 1,0, são apresentados na Tabela 41. Os resultados dos demais valores de FPI são apresentados no Apêndice E.

Tabela 41 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=1

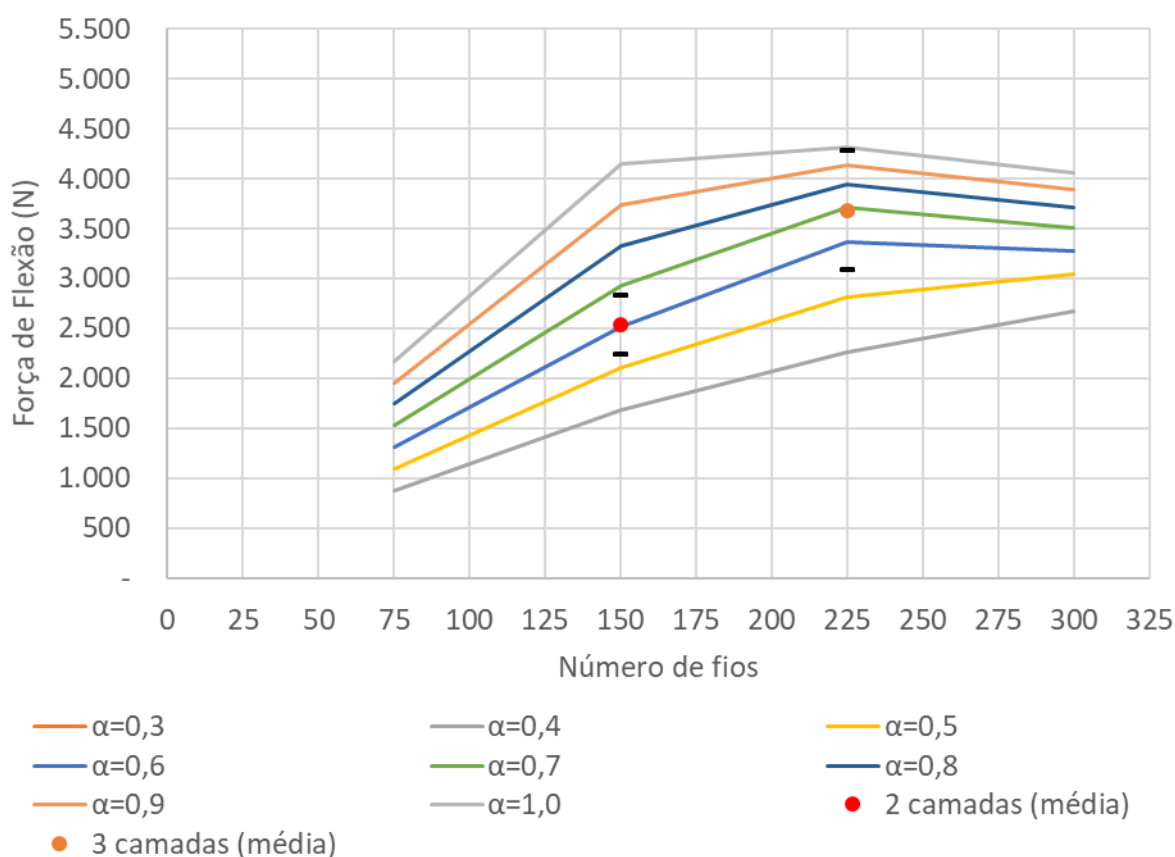
Distância “d” (mm)	Número de fios	Número de camadas	$c_b$ (mm)	Super reforçado			Sub reforçado			$M_n$ (teórico) (Nmm)	$f_{máx}$ (teórico) (N)	Situação do reforço
				c (mm)	$\epsilon_f$ (mm/mm)	$M_n$ (over) (Nmm)	c (mm)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	$M_n$ (under) (Nmm)			
6	5	1	0,973	0,646	0,0249	13.444,57	0,644	0,0019	8.302,51	8.302,51	158,14	Sub-reforçado
6	10	1	0,973	0,892	0,0172	18.317,55	0,889	0,0027	16.370,62	16.370,62	311,82	Sub-reforçado
6	15	1	0,973	1,073	0,0138	21.817,85	1,070	0,0034	24.296,18	21.817,85	415,58	Super reforçado
6	20	2	0,973	1,220	0,0117	24.455,15	1,217	0,0040	32.113,63	24.455,15	465,81	Super reforçado
6	25	2	0,973	1,346	0,0104	26.973,82	1,342	0,0045	39.843,06	26.973,82	513,79	Super reforçado
6	30	2	0,973	1,457	0,0094	29.066,48	1,453	0,0050	47.493,08	29.066,48	553,65	Super reforçado
6	35	3	0,973	1,557	0,0086	30.842,41	1,552	0,0054	55.077,09	30.842,41	587,47	Super reforçado
6	40	3	0,973	1,647	0,0079	32.207,02	1,642	0,0059	62.600,82	32.207,02	613,47	Super reforçado
6	45	3	0,973	1,730	0,0074	33.772,14	1,725	0,0063	70.068,59	33.772,14	643,28	Super reforçado
6	50	4	0,973	1,807	0,0070	35.332,89	1,802	0,0067	77.485,64	35.332,89	673,01	Super reforçado
6	55	4	0,973	1,879	0,007	38.698,15	1,874	0,0071	84.855,34	38.698,15	737,11	Super reforçado
6	60	4	0,973	1,947	0,0062	37.238,13	1,941	0,0075	92.184,86	37.238,13	709,30	Super reforçado
6	65	5	0,973	2,010	0,0060	38.891,05	2,004	0,0078	99.475,15	38.891,05	740,78	Super reforçado
6	70	5	0,973	2,070	0,0057	39.643,42	2,064	0,0082	106.725,26	39.643,42	755,11	Super reforçado

Legenda: d Distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração;  $c_b$  Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra em situação de equilíbrio das forças; c Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra;  $\epsilon_f$  Deformação de tração do fio;  $\epsilon_c$  Deformação de compressão da matriz;  $M_n$  Momento nominal;  $f_{máx}$  Força máxima de flexão

Quando considerando o fator FPI igual a 1, a quantidade de uma camada de têxtil, houve caracterização da situação super reforçada, o que indicou que a falha possa ter ocorrido por ruptura da matriz, ao invés do reforço. Ao serem relacionados os resultados teóricos com o aspecto final de ruptura dos corpos de prova ensaiadas, foi possível visualizar sinais de esmagamento da matriz por esforço excessivo de compressão no banzo comprimido, o que corroborou com os resultados teóricos.

Com base nos resultados dos corpos de prova de maior escala, com o intuito de validar as observações obtidas nestas tipologias, a Figura 110 apresenta um gráfico com os valores das forças de flexão dos painéis conforme variação da quantidade de têxtil para os diferentes valores de FPI ( $\alpha$ ), e relacionados com os resultados experimentais.

Figura 110 – Capacidade da Força de flexão experimental e teórica em função do número de fio e do FPI para amostras de painéis com espessura de 20 mm



Na Tabela 42 é apresentado os valores dos erros relativos entre a força média experimental com a força teórico à flexão, para cada valor de FPI, considerando os resultados dos painéis com espessura de 20 mm, para as diversas taxas de reforço.

Tabela 42 – Erros relativos para os valores de FPI para os painéis com espessura de 20 mm

FPI ( $\alpha$ )	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Erro relativo	0,36	0,203	<b>0,047</b>	0,081	0,192	0,297	0,403

O menor erro relativo foi obtido com FPI de 0,6, pois apresentou menor diferença entre os valores teóricos e experimentais, sendo assim este coeficiente se mostrou mais efetivo.

Os resultados dos valores da simulação teórico, considerando o valor de FPI em 0,6, são apresentados na Tabela 44 e os resultados obtidos com os demais valores de FPI estão apresentados no Apêndice F.

Ao confrontar os resultados experimentais à flexão dos corpos de prova dos painéis com espessura de 30 mm, com resultados teóricos alcançados conforme valores de FPI, foram obtidos os respectivos erros relativos de acordo com os valores de FPI, na Tabela 43 são apresentados os resultados dos erros relativos.

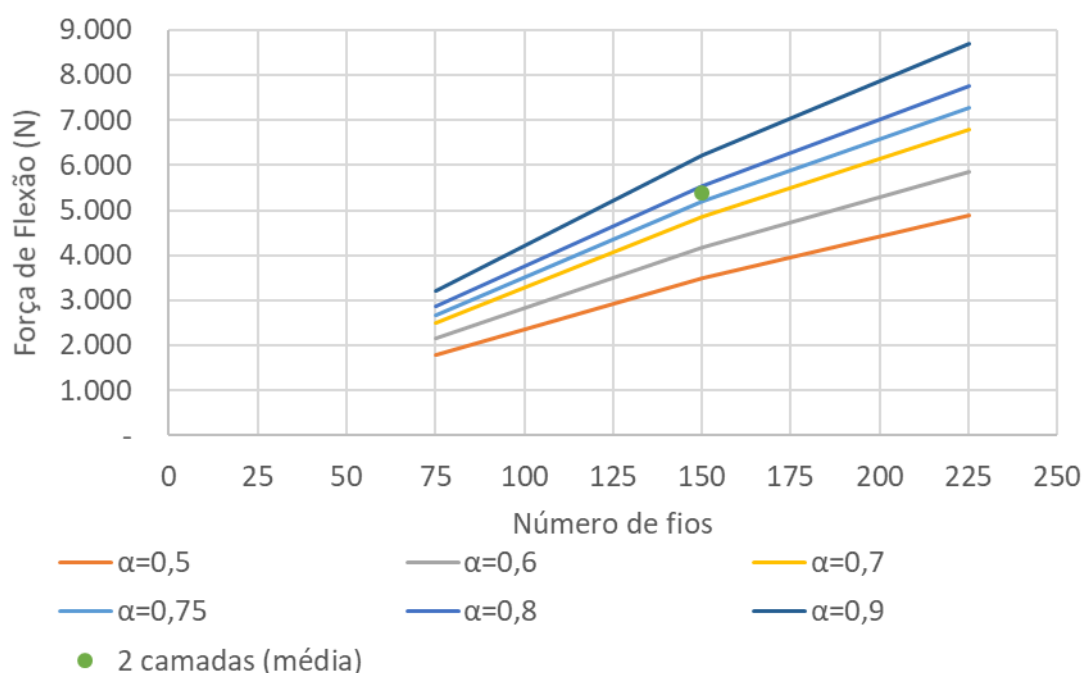
Tabela 43 – Erros relativos para os valores de FPI para os painéis com espessura de 30 mm

FPI ( $\alpha$ )	0,5	0,6	0,7	0,75	0,8	0,9
Erro relativo	0,352	0,225	0,098	0,035	<b>0,029</b>	0,155

Os valores teóricos de força máxima obtidos para os diferentes valores de FPI considerados na análise são relacionados na Figura 111, e foram comparados com os valores experimentais da força obtidos no ensaio de flexão.



Figura 111 – Capacidade da Força de flexão experimental e teórica em função do número de fio e do FPI para amostras de painéis com espessura de 30 mm



O menor erro relativo obtido entre o valor teórico e o experimental para os corpos de prova com espessura de 30 mm, foi quando considerado o FPI em 0,8. Dessa forma, o dimensionamento analítico, para estimar a carga de flexão, que melhor reproduziu os resultados experimentais foi quando considerado o fator de eficiência do reforço em 0,8.

Os valores finais da simulação teórico, quando considerado o valor de FPI em 0,8, estão dispostos na Tabela 45. Os resultados com os demais valores de FPI para o painel com espessura de 30 mm estão dispostos no Apêndice G.

Nos resultados da situação do reforço representados na Tabela 44 e Tabela 45, foi possível relacionar as configurações do modo de falha dos corpos de prova obtidas nos modelos teóricos com os encontrados nos ensaios. Nos painéis com espessura de 20 mm, os resultados teóricos indicaram a ruptura por falha do reforço para as configurações com duas e três camadas de têxtil, situação de sub-reforço. As evidências experimentais indicaram que a ruptura ocorreu por esmagamento da matriz seguida pelo escorregamento do têxtil, comportamento de falha que também foi caracterizada como sub-reforçado. Sendo, com isto, possível indicar que as configurações de ruptura dos corpos de prova ensaiados apresentaram similaridade com os resultados teórico.

De acordo com os valores de FPI estimados que mais se aproximaram dos resultados experimentais, para os corpos de prova de menor escala o valor de FPI de 1,0, foi o que melhor se enquadrou. Quando analisado os corpos de prova de maior escala, com espessura de 20 mm, o valor de FPI de 0,6, e para amostras com 30 mm foi o valor de FPI de 0,8, mais se aproximaram dos resultados experimentais.

Os valores dos erros relativos encontrados com o modelo II, foram similares aos encontrados por Kamani, Dolatabadi e Jeddi (2018) para têxtil de carbono com e sem revestimento de epóxi.

Como discriminado por Kamani, Dolatabadi e Jeddi (2018), a capacidade nominal do têxtil pareceu não poder ser utilizado, quando considerado a análise à flexão de painéis, sendo assim o emprego do fator FPI se mostrou eficiente para determinação da capacidade de carga dos painéis.

Dessa forma, o valor de FPI igual a 1,0 não poderia ser recomendado como potencial utilização, para determinação do momento fletor máximo para painéis de maior escala.

Portanto, o método de dimensionamento analítico se mostrou adequado, quando ponderado com valor de FPI entre 0,6 e 0,8, para uso em painéis com dimensões similares ensaiadas e consideradas as condições de contorno.

Tabela 44 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=0,6 (espessura de 20 mm)

Distância “d” (mm)	Número de fios	Número de camadas	$c_b$ (mm)	Super reforçado			Sub reforçado			$M_{n(\text{teórico})}$ (Nmm)	$f_{\text{máx}}$ (teórico) (N)	Situação do reforço
				c (mm)	$\epsilon_f$ (mm/mm)	$M_{n(\text{over})}$ (Nmm)	c (mm)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	$M_{n(\text{under})}$ (Nmm)			
16	75	1	2,595	1,43	0,0306	398.976,51	1,42	0,00153	200.540,38	200.540,38	1.315,02	Sub-reforçado
15,5	150	2	2,514	1,95	0,0209	521.537,29	1,94	0,00224	383.687,40	383.687,40	2.515,98	Sub-reforçado
14	225	3	2,270	2,23	0,0159	531.457,74	2,22	0,00294	513.793,25	513.793,25	3.369,14	Sub-reforçado
12,5	300	4	2,027	2,38	0,0127	499.965,19	2,37	0,00367	604.979,28	499.965,19	3.278,46	Super reforçado

Legenda: d Distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração;  $c_b$  Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra em situação de equilíbrio das forças; c Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra;  $\epsilon_f$  Deformação de tração do fio;  $\epsilon_c$  Deformação de compressão da matriz;  $M_n$  Momento nominal;  $f_{\text{máx}}$  Força máxima de flexão

Tabela 45 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=0,8 (espessura de 30 mm)

Distância “d” (mm)	Número de fios	Número de camadas	$c_b$ (mm)	Super reforçado			Sub reforçado			$M_{n(\text{teórico})}$ (Nmm)	$f_{\text{máx}}$ (teórico) (N)	Situação do reforço
				c (mm)	$\epsilon_f$ (mm/mm)	$M_{n(\text{over})}$ (Nmm)	c (mm)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	$M_{n(\text{under})}$ (Nmm)			
26	75	1	4,216	2,11	0,0339	960.309,33	2,11	0,00137	435.637,89	435.637,89	2.856,64	Sub-reforçado
25,5	150	2	4,135	2,91	0,0233	1.280.439,25	2,90	0,00200	844.984,82	844.984,82	5.540,88	Sub-reforçado
24	225	3	3,892	3,40	0,0182	1.398.877,48	3,39	0,00256	1.181.543,65	1.181.543,65	7.747,83	Sub-reforçado

Legenda: d Distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração;  $c_b$  Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra em situação de equilíbrio das forças; c Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra;  $\epsilon_f$  Deformação de tração do fio;  $\epsilon_c$  Deformação de compressão da matriz;  $M_n$  Momento nominal;  $f_{\text{máx}}$  Força máxima de flexão

#### 4.5.3 Síntese dos modelos analíticos de dimensionamento.

Com o intuito de relacionar de modo sintético os resultados dos momentos fletores teóricos obtidos com ambos os modelos de dimensionamento analítico, e entre os momentos fletores experimentais dos corpos de prova de maior escala, a Tabela 46 reúne os respectivos erros relativos, conforme as tipologias analisadas.

Tabela 46 – Comparativo entre modelos de dimensionamento

Amostra	$M_{\text{médio,exp}}$	Modelo I		Modelo II	
		$M_{n(\text{teórico})}$	Erro Relativo	$M_{n(\text{teórico})}$	Erro Relativo
2T T 20	387.121,25	543.736,52	0,405	383.686,95	0,009
3T T 20	562.145,50	609.112,40	0,084	513.783,85	0,086
2T T 30	821.555,63	896.227,77	0,091	844.984,20	0,029

Observou-se semelhança entre os valores dos erros relativos para a tipologia com 3 camadas de têxtil, dado que o erro relativo do modelo I atingiu valor de 0,084, enquanto o modelo II, obteve valor de 0,086.

Também pôde ser observada semelhança entre os erros relativos dos painéis com espessura de 30 mm. No modelo I, o erro relativo foi de 0,091, enquanto no modelo II, o erro foi de 0,029. Sendo com o modelo II, houve maior proximidade entre os resultados teóricos com o valor médio experimental.

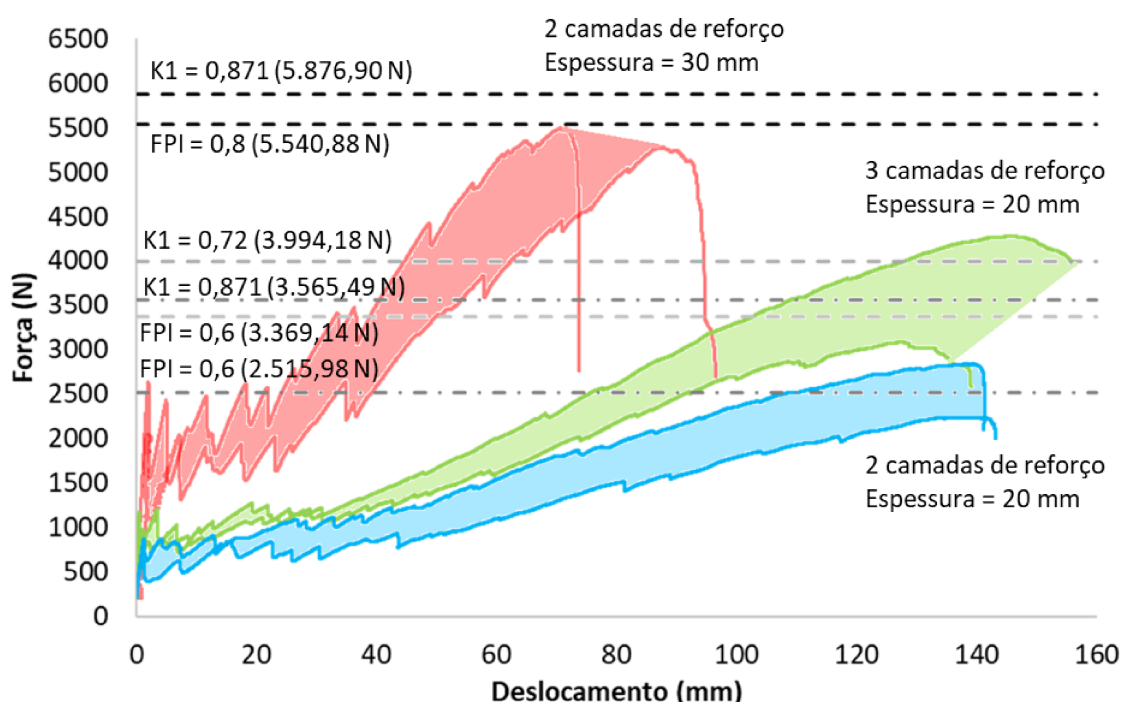
Quando analisadas as amostras com duas camadas de têxtil e espessura de 20 mm, não foram observadas semelhanças entre os erros relativos. Pois, por um lado, o modelo I atingiu erro relativo de 0,405, por outro lado, o modelo II, o erro obtido foi 0,009, sendo o último valor se aproximou a zero, o que destacou maior semelhança do valor teórico do modelo II, com o experimental.

Neste cenário, entende-se como admissível o limite máximo para o erro relativo em 0,15, sendo assim, todo valor inferior a este limite pode ser considerado aceitável ao comportamento experimental.

Percebeu-se com isto, sob análise do erro relativo, importante proximidade entre os resultados teórico do modelo II com os resultados dos modelos experimentais.

Na Figura 112, são apresentados os resultados dos diagramas força vs deslocamento dos modelos experimentais, onde são postadas as faixas dos valores experimentais dos corpos de prova com o têxtil orientado na direção da trama, juntamente, com os valores teóricos da força obtido por ambos os modelos analíticos de dimensionamento.

Figura 112 – Diagramas Força x Deslocamento dos resultados experimentais relacionados com os teóricos



De modo geral, foi possível evidenciar que os modelos analíticos de dimensionamento se mostraram capazes de estimar o momento fletor médio de painéis de TRC.

No entanto, ao considerar o resultado teórico do modelo I, o elevado erro relativo frente ao modelo II, poderia prejudicar a estimativa da carga de ruptura de painéis de TRC. Sendo assim, o modelo I apresentou valores menos condizentes com os resultados dos modelos experimentais.

Pôr consequência da maior proximidade entre os resultados do modelo II com os resultados médios experimentais, além indicar o modo de ruptura que o elemento possa desenvolver, é aceitável apontar, que o modelo II se mostrou mais adequado, para estimar a carga de ruptura do painel de TRC. Além do mais, demonstrou maior tendência conservadora do ponto de vista da resistência máxima, dado que os valores teóricos são inferiores ou ligeiramente superiores à força máxima experimental.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento desta pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1 CONCLUSÕES

As conclusões alcançadas no presente estudo são apresentadas e organizadas conforme os objetivos específicos correspondentes, como segue:

- Em relação a determinação experimental da resistência à tração do têxtil, conforme estabelece o objetivo:

Ao se analisar o comportamento mecânico dos têxteis utilizados neste estudo, percebeu-se que a resistência à tração e o módulo de elasticidade do têxtil AR192, na direção da trama, foram superiores a trama do têxtil AR122, tanto para o fio isolado, mesmo possuindo a mesma densidade linear, quanto o têxtil. Por outro lado, a orientação da urdidura do têxtil AR122 atingiu maiores valores de tensão de tração e módulo de elasticidade frente ao têxtil AR192.

Entre as direções da orientação do fio, em ambos os têxteis o comportamento foi semelhante, sendo que a direção da trama apresentou tensão de tração e módulo de elasticidade superiores aos valores obtidos na direção da urdidura.

- No objetivo específico B, visava analisar a interação dos têxteis com a matriz quando submetidos aos esforços de tração direta e na flexão:

Em geral, o emprego do têxtil AR192 resultou em compósitos de maior resistência à tração e à flexão frente ao têxtil AR122.

No cenário de reforço com apenas uma camada de têxtil, posicionada no centro da espessura do corpo de prova, não foi percebido influência do têxtil no comportamento mecânico do compósito, que pudesse caracterizar com propriedades de concreto têxtil. Sendo assim, a quantidade de apenas uma camada de têxtil, para ambas as tipologias de têxtil analisadas, não foram suficientes para serem utilizadas como reforço em matriz cimentícia.

No que tange a orientação do reforço, com a quantidade de até duas camadas para o têxtil AR122 e até três camadas do têxtil AR192, não foram percebidas diferenças nas resistências máximas entre as orientações do têxtil. No comportamento

à flexão, não houve diferença significativa entre as orientações, independentemente da idade analisada.

Ao considerar a idade do ensaio, de modo geral, também não foi observado influência da idade de cura da matriz na resistência máxima dos compósitos.

Nas situações de reforço com a quantidade de três e quatro camadas do têxtil AR192, foi possível perceber que a orientação da urdidura apresentou maior resistência, tanto no comportamento à tração quanto na flexão, pois na direção da trama houve maior escorregamento dos fios no interior da matriz, o que prejudicou o aumento da resistência mecânica.

Os resultados indicaram que o têxtil AR122 apresentou desempenho mecânico satisfatório nos compósitos reforçados com duas camadas e o têxtil AR192 até quatro camadas na orientação da urdidura e até três camadas na orientação da trama.

- Em relação ao objetivo específico C, o qual indica a caracterização de modo experimental, de painel reforçado com um têxtil, quanto ao comportamento mecânico à flexão;

Conclui-se que os resultados à flexão do painel acompanharam os resultados obtidos nas amostras com escala reduzida, sendo que houve aumento da força máxima com aumento da taxa de reforço e espessura do corpo de prova, quando analisado na direção da trama.

Em relação a orientação do têxtil com duas camadas, a orientação da urdidura atingiu maior resistência à flexão em relação a direção da trama.

Além do mais, o comportamento mecânico dos painéis correspondeu de modo satisfatório as propriedades constitutivas do concreto têxtil.

- No objetivo específico D, foi proposto a definição de modo experimentalmente o coeficiente de eficiência, da têxtil de vidro AR para balizar os modelos de dimensionamento analíticos;

Nas situações analisadas, a capacidade nominal do têxtil na orientação da trama não apresentou total eficiência quando inserida como reforço em matriz cimentícia, o que demonstrou a necessidade de ser considerado um fator de redução da eficiência da resistência à tração do têxtil.

Nas simulações da resistência à flexão, foi possível indicar o coeficiente de eficiência  $k_1$  em 0,72 em elementos reforçados com duas camadas e 0,871, quando reforçado com três camadas do têxtil AR192 na direção da trama.

Com relação ao coeficiente de eficiência com parâmetro do FPI, os resultados máximos teóricos foram relacionados com os valores experimentais e conclui-se que, para painéis com espessura de 20 mm, o valor de FPI pode ser considerado em 0,6, por atingir menor erro relativo. Quando em painéis com espessura de 30 mm, pode ser utilizado o valor de FPI igual a 0,8.

Por fim, a inserção dos coeficientes de eficiência estimou de modo satisfatório a resistência máxima de painéis de TRC reforçados com o têxtil AR192 na direção da trama.

- Por último, o objetivo E visava validar, de forma experimental, os dois modelos analíticos de dimensionamento com os parâmetros encontrados neste estudo;

Os modelos analíticos de dimensionamento se mostraram adequados e foram capazes de prever o momento fletor máximo teórico para amostras de TRC. No entanto, o modelo II de dimensionamento demonstrou maior grau de conservadorismo, visto que os resultados são próximos ou ligeiramente superiores aos valores médios obtidos nos modelos experimentais. Enquanto o modelo I obteve valores de momento fletor teóricos superiores ao modelo II, em todas as situações analisadas. Sendo assim, o uso do modelo II configurou ser mais adequado para estimar o momento fletor real, pois demonstrou maior proximidade com os resultados experimentais.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Verificou-se, durante a realização dessa pesquisa, oportunidades de melhoria e novas variáveis a serem analisadas, conforme as apresenta:

- a) Analisar a influência da impregnação de resina Epóxi e SBR nos têxteis de vidro AR, no comportamento mecânico à tração e à flexão;
- b) Investigar as alterações mecânicas do reforço têxtil sob influência do envelhecimento, tanto acelerado como natural;
- c) Avaliar o comportamento à flexão do têxtil AR122 como reforço em painéis;
- d) Relacionar os resultados experimentais do têxtil AR122 com os fatores de eficiência dos modelos analíticos de dimensionamento;
- e) Investigar a colaboração da inserção de fibras curvas de vidro AR como auxílio ao suporte de carga do reforço têxtil em matrizes cimentícias;
- f) Investigar o comportamento ao fogo dos painéis reforçados com têxtil de vidro AR.



## REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C947-03** (2017). Standard Test Method for Flexural Properties of Thin-Section Glass-Fiber-Reinforced Concrete (Using Simple Beam With Third-Point Loading). Concrete Products, v. 03, n. Reapproved 2016, p. 5–7, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**. Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, p. 238, 2014.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.1R.15**. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. 2015. v. 22
- ARAÚJO, M. F. DE S. B. **Simulação pelo método dos elementos finitos de peças em concreto têxtil**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.
- BARHUM, R.; MECHTCHERINE, V. Influence of short dispersed and short integral glass fibres on the mechanical behaviour of textile-reinforced concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 46, n. 4, p. 557–572, 2013.
- BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2017. v. 2nd edition
- BÖSCHE, A. et al. Textile-reinforced concrete for flexural strengthening of RC-structures-Part 1: structural behavior and design model. **Special Publication**, v. 251, p. 19–39, 2007.
- BRAMESHUBER, W. Introduction. **Seventh International Symposium of the Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS)**, p. 1–3, 2006.
- BRAMESHUBER, W. et al. **Concrete/Matrix**. W. Brameshuber, 2006.
- BROCKMANN, T. **Mechanical and Fracture Mechanical Properties of Fine Grained Concrete for TRC Structures**. 2007. v. Part II
- BUI THI THANH, M. et al. Experimental study on flexural and shear behaviour of sandwich panels using glass textile reinforced concrete and autoclaved aerated concrete. **Transport and Communications Science Journal**, v. 71, n. 1, p. 18–26, 2020.
- BUTLER, M.; MECHTCHERINE, V.; HEMPEL, S. Durability of textile reinforced concrete made with AR glass fibre: effect of the matrix composition. **Materials and Structures**, v. 43, n. 10, p. 1351–1368, 2010.
- CIBULKA, T.; MUSIL, L.; VODICKA, J. The application of textile reinforced lightweight aggregate concrete in ultra-thin slabs. **AIP Conference Proceedings**, v. 2210, n. February, 2020.

- COHEN, Z.; PELED, A. Controlled telescopic reinforcement system of fabric-cement composites - Durability concerns. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 10, p. 1495–1506, 2010.
- COLOMBO, I. G. et al. Textile Reinforced Concrete: experimental investigation on design parameters. **Materials and Structures**, v. 46, n. 11, p. 1933–1951, 2013.
- COLOMBO, I. G. **Multilayer Precast Façade Panel: Structural Optimization for Energy Retrofitting Co-supervisor**. Politecnico di Milano, 2015.
- COLOMBO, I. G.; COLOMBO, M.; DI PRISCO, M. TRC precast Façade sandwich panel for energy retrofitting of existing buildings. **American Concrete Institute, ACI Special Publication**, v. 2015-Janua, n. SP 305, p. 1–19, 2015a.
- COLOMBO, I. G.; COLOMBO, M.; DI PRISCO, M. Bending behaviour of Textile Reinforced Concrete sandwich beams. **Construction and Building Materials**, 2015b.
- COLOMBO, I. G.; COLOMBO, M.; DI PRISCO, M. Precast TRC sandwich panels for energy retrofitting of existing residential buildings: full-scale testing and modelling. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 52, n. 5, p. 1–16, 2019.
- CONTAMINE, R.; JUNES, A.; SI LARBI, A. Tensile and in-plane shear behaviour of textile reinforced concrete: Analysis of a new multiscale reinforcement. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 405–413, 2014.
- CONTAMINE, R.; SI LARBI, A.; HAMELIN, P. Contribution to direct tensile testing of textile reinforced concrete (TRC) composites. **Materials Science and Engineering A**, v. 528, n. 29–30, p. 8589–8598, 2011.
- DE MUNCK, M. et al. Influence of Weathering Conditions on TRC Sandwich Renovation Panels. In: **RILEM Bookseries -Strain-Hardening Cement-Based Composites**. 2018. p. 659–667.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG **DIN 1045-1, D**. Concrete, reinforced and prestressed concrete structures. In: 2008.
- DU, Y. et al. Experimental study on basalt textile reinforced concrete under uniaxial tensile loading. **Construction and Building Materials**, v. 138, p. 88–100, 2017.
- EL-SHERIF, H. E.; WAKJIRA, T. G.; EBEAD, U. Flexural strengthening of reinforced concrete beams using hybrid near-surface embedded/externally bonded fabric-reinforced cementitious matrix. **Construction and Building Materials**, v. 238, p. 117748, 2020.
- ENGBERTS, E.; FYDRO, B. V. Large-size façade elements of textile reinforced concrete. **1st International Conference Textile Reinforced Concrete**, p. 309–318, 2006.
- GIESE, A. C. H. **Utilização de argamassa reforçada com têxtil de fibra de vidro álcali resistente para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.
- GOLIATH, K. B.; CARDOSO, D. C. T.; SILVA, F. DE A. Bearing behavior of Carbon-Textile-Reinforced Concrete Beams. **Carbon-und Textilebetontage**, p. 42–47, 2020.

GRIES, T. et al. **Textiles**. 1. ed. W. Brameshuber, 2006.

GRIES, T.; OFFERMANN, P.; PELED, A. Textiles. In: **State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC: Textile Reinforced Concrete**. 2006. p. 11–28.

HAIK, R.; ADIEL SASI, E.; PELED, A. Influence of three-dimensional (3D) fabric orientation on flexural properties of cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 80, p. 1–9, 2017.

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**, v. 158, p. 243–256, 2018.

HAMILKO GIESE, A. C. et al. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with textile reinforced mortar. **Journal of Building Engineering**, n. lii, p. 101873, out. 2020.

HANISCH, V. **Influence of machine settings on mechanical performance of yarn and textile structures**. RILEM Publications SARL, 2006

HANISCH, V. et al. Influence of Machine Settings on Mechanical. **1st International Conference Textile Reinforced Concrete (ICTRC)**, p. 1–10, 2006.

HAWKINS, W. et al. An Analytical Failure Envelope for the Design of Textile Reinforced Concrete Shells. **Structures**, v. 15, n. June, p. 56–65, 2018.

HEGGER, J. et al. Load-bearing behaviour and simulation of textile reinforced concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 39, n. 292, p. 765–776, 2006a.

HEGGER, J. et al. Mechanical behaviour of textile reinforced concrete. **State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC: Textile Reinforced Concrete**, p. 133–183, 2006b.

HEGGER, J. et al. **Classification of Approaches To Dimensioning and Assessment of Lightweight Trc Structures**. FERRO-11–11th International Symposium on Ferrocement and 3rd ICTRC-International Conference on Textile Reinforced Concrete. **Anais**.2015

HEGGER, J. et al. Innovative design concepts: Application of textile reinforced concrete to shell structures. **Structural Concrete**, n. August, p. 637–646, 2017.

HEGGER, J.; KULAS, C.; HORSTMANN, M. Realization of TRC Façades with Impregnated AR-Glass Textiles. **Key Engineering Materials**, v. 466, p. 121–130, 2011.

HEGGER, J.; KULAS, C.; HORSTMANN, M. Spatial Textile Reinforcement Structures for Ventilated and Sandwich Facade Elements. **Advances in Structural Engineering**, v. 15, n. 4, p. 665–676, 2012.

HEGGER, J.; SCHNEIDER, M.; KULAS, C. Dimensioning of TRC with application to ventilated facade systems. **International RILEM Conference on Material Science**, v. I, p. 393–403, 2010.

HEGGER, J.; VOSS, S. Textile reinforced concrete under biaxial loading. **6th Rilem Symposium on Fiber Reinforced Concrete (FRC), BEFIB 2004**, n. September, p. 1463–1472, 2004.

HEGGER, J.; VOSS, S. Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete. **Engineering Structures**, v. 30, n. 7, p. 2050–2056, 2008.

HEGGER, J.; WILL, N. Textile-reinforced concrete: Design models. In: **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. Elsevier, 2016. p. 189–207.

HEGGER, P. J.; ZELL, D. M.; VOSS, D. S. **Dimensioning of TRC structures**. GRC 2008. **Anais**.2008

Internacional Organization for Standardization ISO 10406-1 - Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete - Test Methods. 2015.

KAMANI, R. et al. Bending load capacity of carbon fiber reinforced concrete beams as a function of fiber performance index (FPI). **Journal of the Textile Institute**, v. 110, n. 4, p. 581–589, 2019.

KAMANI, R.; DOLATABADI, M. K.; JEDDI, A. A. A. Flexural design of textile-reinforced concrete (TRC) using warp-knitted fabric with improving fiber performance index (FPI). **Journal of the Textile Institute**, v. 109, n. 4, p. 492–500, 2018.

KÖCKRITZ, U. et al. **INNOVATIVE TECHNOLOGY FOR THE MANUFACTURE OF Process integration Coating module**. 1st International Conference Textile Reinforced Concrete (ICTRC). **Anais**...2006

KONG, K. et al. Comparative characterization of the durability behaviour of textile-reinforced concrete (TRC) under tension and bending. **Composite Structures**, v. 179, p. 107–123, 2017.

KULAS, C. **Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile**. RWTH Aachen University, 2013.

KULAS, C. Actual applications and potential of textile-reinforced concrete. p. 1–11, 2015.

LAIBLOVÁ, L. et al. Technical Textiles as an Innovative Material for Reinforcing of Elements from High Performance Concretes (HPC). **Advanced Materials Research**, v. 1054, p. 1–6, 2014.

LAIBLOVÁ, L. et al. Comparison of different types of glass reinforcement for HPC façade elements from mechanical and economical aspects. **Key Engineering Materials**, v. 722 KEM, p. 286–291, 2017.

LIU, S. et al. Experimental study and analytical modeling on tensile performance of basalt textile reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 267, p. 120972, 2021.

MECHTCHERINE, V. Novel cement-based composites for the strengthening and repair of concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 365–373, 2013.

MECHTCHERINE, V.; SCHNEIDER, K.; BRAMESHUBER, W. Mineral-based matrices for textile-reinforced concrete. In: **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. 2016. p. 34–52.

MOBASHER, B. Development of Design Procedures for Flexural Applications of Textile Composite Systems Based on Tension Stiffening Models. **6th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS6)**, 2011a.

MOBASHER, B. Textile fiber composites: Testing and mechanical behavior. In: **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. 2016. p. 105–154.

MOBASHER, B.; PAHILAJANI, J.; PELED, A. Analytical simulation of tensile response of fabric reinforced cement based composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 1, p. 77–89, 2006.

MUELLER, U. et al. Reactive powder concrete for façade elements – A sustainable approach. **Journal of Façade Design and Engineering**, v. Preprint, n. Preprint, p. 1–14, 2016.

MÜLLER, E.; SCHEERER, S.; CURBACH, M. Strengthening of existing concrete structures: Design models. In: TRIANTAFILLOU, T. C. (Ed.). **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. 2016. p. 323–359.

NEVES, R.; FELICÍSSIMO, D. Control of cracking in textile reinforced concrete with unresin carbon fibers. **Materials**, v. 13, n. 14, 2020.

NGUYEN, K. T. Q. et al. Fire safety of composites in prefabricated buildings: From fibre reinforced polymer to textile reinforced concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 187, n. January, p. 107815, 2020.

O'HEGARTY, R.; KINNANE, O. Review of precast concrete sandwich panels and their innovations. **Construction and Building Materials**, v. 233, p. 117145, 2020.

ORTOLAN, V. K.; MANCIO, M.; TUTIKIAN, B. F. Evaluation of the influence of the pH of concrete pore solution on the corrosion resistance of steel reinforcement. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 1, n. 1, p. 10, 2016.

PARK, J. et al. Flexural Strength of Alkali Resistant Glass Textile Reinforced Concrete Beam with Prestressing. v. 11, n. 7, p. 988–992, 2017.

PELED, A. Bonds in textile reinforced concrete composites. **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**, p. 63–99, 2016.

PELED, A. Material Design of TRC and TRC Impact Resistance. In: **RILEM Bookseries -Strain-Hardening Cement-Based Composites**. 2018. p. 351–358.

PELED, A.; BENTUR, A.; MOBASHER, B. **Textile Reinforced Concrete**. 2017. CRC Press; 1 edition, 2017.

PELED, A.; MOBASHER, B.; BENTUR, A. Durability of TRC. In: **Textile Reinforced Concrete**. 2017. p. 365–421.

PURNELL, P. et al. Durability. **State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC: Textile Reinforced Concrete**, p. 187–210, 2006.

RAMPINI, M. C. et al. Mechanical behaviour of TRC composites: Experimental and analytical approaches. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 9, n. 7, 2019.

RAUPACH, M. et al. **Epoxy-Impregnated Textiles in Concrete – Load Bearing Capacity and Durability**. 1st International Conference Textile Reinforced Concrete (ICTRC). **Anais...**2006

REINHARDT, H. . et al. Composite Materials. **Textile Reinforced Concrete - State-of-the-art Report**, p. 83–187, 2006.

REMPEL, S. et al. Extremely Light and Slender Precast Pedestrian-Bridge Made Out of Textile-Reinforced Concrete (TRC). In: **High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet**. Cham: Springer International Publishing, 2018. v. 33p. 2530–2537.

REMPEL, S.; HEGGER, J. **Slender Façade Structures Made of Textile-Reinforced High Performance Concrete**. 3rd ICTRC International Conference On Textile Reinforced Concrete. **Anais...**2015

REMPEL, S.; KULAS, C.; HEGGER, J. Bearing Behavior of Impregnated Textile. **FERRO-11 – 11th International Symposium on Ferrocement and 3rd ICTRC - International Conference on Textile Reinforced Concrete**, n. 1, p. 71–78, 2015.

REMPEL, S.; RICKER, M.; HEGGER, J. Safety Concept for Textile-Reinforced Concrete Structures with Bending Load. **Applied Sciences**, v. 10, n. 20, p. 7328, 20 out. 2020.

RILEM. Recommendation of **RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete: Uniaxial tensile test: test method to determine the load bearing behavior of tensile specimens made of textile reinforced concrete**Materials and Structures, 2016.

SCHEERER, S.; SCHLADITZ, F.; CURBACH, M. Textile reinforced concrete - from the idea to a high performance material. p. 15–34, 2015.

SCHLADITZ, F. et al. Bending load capacity of reinforced concrete slabs strengthened with textile reinforced concrete. **Engineering Structures**, v. 40, p. 317–326, 2012.

SCHNABEL, A.; GRIES, T. Production of non-crimp fabrics for composites. In: **Non-Crimp Fabric Composites**. [s.l.] Elsevier, 2011. p. 3–41.

SCHNEIDER, H. N.; SCHÄTZKE, C.; BERGMANN, I. **Textile Reinforced Concrete – Applications and prototypes**. 1st International Conference Textile Reinforced Concrete (ICTRC). **Anais...**2006

SCHOLZEN, A.; CHUDOBA, R.; HEGGER, J. Thin-walled shell structures made of textile-reinforced concrete: Part I: Structural design and construction. **Structural Concrete**, v. 16, n. 1, p. 106–114, 2015a.

SCHOLZEN, A.; CHUDOBA, R.; HEGGER, J. Thin-walled shell structures made of textile-reinforced concrete: Part II: Experimental characterization, ultimate limit state assessment and numerical simulation. **Structural Concrete**, v. 16, n. 1, p. 115–124, 2015b.

SCHUMANN, A. et al. Parking slabs made of carbon reinforced concrete. **Structural Concrete**, v. 19, n. 3, p. 647–655, 2018.

SCHÜTZE, E.; LORENZ, E.; CURBACH, M. Test methods for textile reinforced concrete. **11th International Symposium on Ferrocement and Textile Reinforced Concrete 3rd ICTRC**, p. 307–318, 2015.

SHAMS, A. et al. Innovative sandwich structures made of high performance concrete and foamed polyurethane. **Composite Structures**, v. 121, p. 271–279, 2015.

SILVA, R. M. DE C.; SILVA, F. DE A. Carbon textile reinforced concrete: materials and structural analysis. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 53, n. 1, 2020.

SOUZA, L. O.; SOUZA, L. M. S.; SILVA, F. A. Mechanics and Cracking Mechanisms in Natural Curauá Textile Reinforced Concrete. In: **RILEM Bookseries -Strain-Hardening Cement-Based Composites**. 2018. p. 359–366.

TOMAZI KNY, G. et al. **Concreto Têxtil em Elementos para Distribuição de Energia Elétrica Textile Concrete in Electric Power Distribution Elements**. 59 Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...2017**

TRIANAFILLOU, T. C. **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. 2016.

TROCHOUTSOU, N. et al. Mechanical Characterisation of Flax and Jute Textile-Reinforced Mortars. **Construction and Building Materials**, v. 271, p. 121564, 2021.

VALERI, P. et al. Textile reinforced concrete for sustainable structures: Future perspectives and application to a prototype pavilion. **Structural Concrete**, n. January, p. 1–17, 2020.

VALERI, P.; FERNÁNDEZ RUIZ, M.; MUTTONI, A. Tensile response of textile reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 258, p. 119517, 2020.

VALERI, P.; RUIZ, M. F.; MUTTONI, A. Experimental research on Textile Reinforced Concrete for the development of design tools. p. 1–8, 2018.

VERVLOET, J. et al. Buckling Behaviour of Structural Insulating Sandwich Walls with Textile Reinforced Cement Faces. In: **RILEM Bookseries -Strain-Hardening Cement-Based Composites**. 2018. p. 535–543.

VERVLOET, J. et al. Experimental and numerical evaluation of textile reinforced cement (TRC) sandwich walls in compression: A geometrical study. **Construction and Building Materials**, v. 240, p. 117904, 2020.

VLACH, T. et al. The effect of surface treatments of textile reinforcement on mechanical parameters of HPC facade elements. **Key Engineering Materials**, v. 677, p. 203–206, 2016.

VLACH, T. et al. Soft Insert for Support Modeling of Slightly Textile Reinforced Concrete. **Key Engineering Materials**, v. 760, p. 158–163, 2018.

VOGEL, F. Production and Use of the Textile Reinforced Concrete. **Advanced Materials Research**, v. 982, n. October 2007, p. 59–62, 2014.

VOGEL, F.; HOLČAPEK, O.; KONVALINKA, P. Study of the Strength Development of the Cement Matrix for Textile Reinforced Concrete. **Advanced Materials Research**, v. 1054, p. 99–103, 2014.

VOSS, S. **Ingenieurmodelle zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton**. RWTH Aachen University, 2008.

VOSS, S.; HEGGER, J. Dimensioning of textile reinforced concrete structures. **Proceedings of 1st international RILEM conference on textile reinforced concrete.**, p. 151–60, 2006.

WANG, B. et al. Study on the mechanical property of textile reinforced self-stressing concrete sheets. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 1–10, 2016.

WEILAND, S. et al. Textile Reinforced Concrete for Flexural Strengthening of RC-Structures – Part 2: Application on a Concrete Shell. **Design & Applications of Textile-Reinforced Concrete. Proceedings of the ACI Fall Convention**, p. 33–49, 2007.

WILLIAMS PORTAL, N. et al. Sustainable Potential of Textile-Reinforced Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 7, p. Content ID 04014207, 2014.

WILLIAMS PORTAL, N. et al. Tensile behaviour of textile reinforcement under accelerated ageing conditions. **Journal of Building Engineering**, v. 5, p. 57–66, 2016.

WILLIAMS PORTAL, N. et al. Bending behaviour of novel Textile Reinforced Concrete-foamed concrete (TRC-FC) sandwich elements. **Composite Structures**, v. 177, p. 104–118, 2017.

WILLIAMS PORTAL, N.; NYHOLM THRANE, L.; LUNDGREN, K. Flexural behaviour of textile reinforced concrete composites: experimental and numerical evaluation. **Materials and Structures**, v. 50, n. 1, p. 4, 2017.

YAO, Y. et al. Tension stiffening in textile-reinforced concrete under high speed tensile loads. **Cement and Concrete Composites**, v. 64, p. 49–61, 2015.

YOU, J. et al. Experimental study on the flexural behavior of steel-textile-reinforced concrete: Various textile reinforcement details. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 4, 2020.

ZANI, G. et al. Bending behavior of cement-based multi-layered roof elements. **Engineering Structures**, v. 190, n. March, p. 101–115, 2019.

ZARGARAN, M. et al. Minimum reinforcement ratio in TRC panels for deflection hardening flexural performance. **Construction and Building Materials**, v. 137, p. 459–469, 2017.



**APÊNDICE A – TABELAS DOS RESULTADOS RELATIVOS RESISTÊNCIA À  
TRAÇÃO DIRETA DO TÊXTIL AR122**

Tabela A.1 – Resultados da resistência à tração direta dos compósitos reforçados com uma camada do têxtil AR122 na direção da Trama

Corpo de prova	$\sigma_{c,cr}$ (MPa)	$\sigma_{cu}$ (MPa)	$\sigma_{t,cr}$ (MPa)	$\sigma_{tu}$ (MPa)
7d 122 1T T A	2,10	2,75	1095,65	1434,78
7d 122 1T T B	-	-	-	-
7d 122 1T T C	2,16	2,16	1126,96	1126,96
7d 122 1T T D	-	-	-	-
<b>Média</b>	<b>2,13</b>	<b>2,46</b>	<b>1111,30</b>	<b>1283,48</b>
28d 122 1T T A	-	-	-	-
28d 122 1T T B	1,62	2,32	845,22	1210,43
28d 122 1T T C	2,15	2,22	1121,74	1158,26
28d 122 1T T D	2,49	2,49	1299,13	1299,13
<b>Média</b>	<b>2,09</b>	<b>2,34</b>	<b>1090,43</b>	<b>1220,87</b>
91d 122 1T T A	3,54	3,54	1846,96	1846,96
91d 122 1T T B	1,57	2,36	819,13	1231,30
91d 122 1T T C	-	-	-	-
91d 122 1T T D	3,44	3,44	1794,78	1794,78
<b>Média</b>	<b>2,85</b>	<b>3,11</b>	<b>1486,96</b>	<b>1622,61</b>

Legenda:  $\sigma_{c,cr}$  tensão crítica do compósito.  $\sigma_{cu}$  tensão máxima do compósito.  $\sigma_{t,cr}$  tensão crítica do reforço.  $\sigma_{tu}$  tensão máxima do reforço.

Tabela A.2 – Resultados da resistência à tração direta dos compósitos reforçados com duas camadas do têxtil AR122 na direção da Trama

Corpo de prova	$\sigma_{c,cr}$ (MPa)	$\sigma_{cu}$ (MPa)	$\sigma_{t,cr}$ (MPa)	$\sigma_{tu}$ (MPa)
7d 122 2T T A	3,63	4,20	946,96	1095,65
7d 122 2T T B	-	-	-	-
7d 122 2T T C	2,98	4,51	777,39	1176,52
7d 122 2T T D	2,80	3,60	730,43	939,13
<b>Média</b>	<b>3,13</b>	<b>4,10</b>	<b>816,52</b>	<b>1069,57</b>
28d 122 2T T A	4,18	4,92	1090,43	1283,48
28d 122 2T T B	-	-	-	-
28d 122 2T T C	3,20	4,32	834,78	1126,96
28d 122 2T T D	4,20	4,74	1095,65	1236,52
<b>Média</b>	<b>3,86</b>	<b>4,66</b>	<b>1006,96</b>	<b>1215,65</b>
91d 122 2T T A	2,84	2,99	740,87	780,00
91d 122 2T T B	-	-	-	-
91d 122 2T T C	2,90	3,56	756,52	928,70
91d 122 2T T D	-	-	-	-
<b>Média</b>	<b>2,87</b>	<b>3,37</b>	<b>748,70</b>	<b>879,13</b>

Legenda:  $\sigma_{c,cr}$  tensão crítica do compósito.  $\sigma_{cu}$  tensão máxima do compósito.  $\sigma_{t,cr}$  tensão crítica do reforço.  $\sigma_{tu}$  tensão máxima do reforço.

Tabela A.3 – Resultados da resistência à tração direta dos compósitos reforçados com uma camada do têxtil AR122 na direção da Urdidura

Corpo de prova	$\sigma_{c,cr}$ (MPa)	$\sigma_{cu}$ (MPa)	$\sigma_{t,cr}$ (MPa)	$\sigma_{tu}$ (MPa)
7d 122 1T U A	-	-	-	-
7d 122 1T U B	-	-	-	-
7d 122 1T U C	2,35	2,35	1226,09	1226,09
7d 122 1T U D	2,71	2,71	1413,91	1413,91
<b>Média</b>	<b>2,53</b>	<b>2,53</b>	<b>1320,00</b>	<b>1320,00</b>
28d 122 1T U A	2,71	2,71	1413,91	1413,91
28d 122 1T U B	-	-	-	-
28d 122 1T U C	2,81	2,99	1466,09	1560,00
28d 122 1T U D	-	-	-	-
<b>Média</b>	<b>2,76</b>	<b>2,85</b>	<b>1440,00</b>	<b>1486,96</b>
91d 122 1T U A	5,26	5,26	2744,35	2744,35
91d 122 1T U B	2,80	2,80	1460,87	1460,87
91d 122 1T U C	5,32	5,32	2775,65	2775,65
91d 122 1T U D	-	-	-	-
<b>Média</b>	<b>4,46</b>	<b>4,46</b>	<b>2326,96</b>	<b>2326,96</b>

Legenda:  $\sigma_{c,cr}$  tensão crítica do compósito.  $\sigma_{cu}$  tensão máxima do compósito.  $\sigma_{t,cr}$  tensão crítica do reforço.  $\sigma_{tu}$  tensão máxima do reforço.

Tabela A.4 – Resultados da resistência à tração direta dos compósitos reforçados com duas camadas do têxtil AR122 na direção da Urdidura

Corpo de prova	$\sigma_{c,cr}$ (MPa)	$\sigma_{cu}$ (MPa)	$\sigma_{t,cr}$ (MPa)	$\sigma_{tu}$ (MPa)
7d 122 2T U A	3,18	3,18	829,57	829,57
7d 122 2T U B	2,92	3,84	761,74	1001,74
7d 122 2T U C	-	-	-	-
7d 122 2T U D	1,27	3,61	331,30	941,74
<b>Média</b>	<b>2,45</b>	<b>3,54</b>	<b>639,13</b>	<b>923,48</b>
28d 122 2T U A	3,02	3,86	787,83	1006,96
28d 122 2T U B	1,94	3,31	506,09	863,48
28d 122 2T U C	-	-	-	-
28d 122 2T U D	1,54	3,46	401,74	902,61
<b>Média</b>	<b>2,17</b>	<b>3,54</b>	<b>566,09</b>	<b>923,48</b>
91d 122 2T U A	3,44	3,68	897,39	960,00
91d 122 2T U B	-	-	-	-
91d 122 2T U C	1,92	3,43	500,87	894,78
91d 122 2T U D	-	-	-	-
<b>Média</b>	<b>2,68</b>	<b>3,55</b>	<b>699,13</b>	<b>926,09</b>

Legenda:  $\sigma_{c,cr}$  tensão crítica do compósito.  $\sigma_{cu}$  tensão máxima do compósito.  $\sigma_{t,cr}$  tensão crítica do reforço.  $\sigma_{tu}$  tensão máxima do reforço.

## APÊNDICE B – TABELAS DOS RESULTADOS RELATIVOS RESISTÊNCIA À FLEXÃO DO TÊXTIL AR122

Tabela B.1 – Resultados da resistência à flexão dos compósitos reforçados com uma camada do têxtil AR122 na direção da trama

Corpo de prova	$f_{cr}$ (N)	$\delta_{cr}$ (mm)	$M_{cr}$ (N.mm)	$f_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)	$M_{max}$ (N.mm)
7d 122 1T T A	304,5	0,546	15.986,25	335,8	16,355	17.629,50
7d 122 1T T B	345,7	1,025	18.149,25	345,7	1,025	18.149,25
<b>Média</b>	<b>325,1</b>	<b>0,786</b>	<b>17.067,75</b>	<b>340,8</b>	<b>8,690</b>	<b>17.889,38</b>
28d 122 1T T A	437,2	1,091	22.953,00	437,2	1,0911	22.953,00
28d 122 1T T B	162,1	0,885	8.510,25	379,5	19,423	19.923,75
28d 122 1T T C	397,8	0,582	20.884,50	397,8	0,5818	20.884,50
28d 122 1T T D	430,5	0,964	22.601,25	430,5	0,964	22.601,25
<b>Média</b>	<b>356,9</b>	<b>0,881</b>	<b>19.629,50</b>	<b>411,3</b>	<b>5,515</b>	<b>22.618,75</b>
91d 122 1T T A	448,6	0,496	23.551,50	448,6	0,496	23.551,50
91d 122 1T T B	468,5	0,581	24.596,25	468,5	0,581	24.596,25
91d 122 1T T C	452,9	0,501	23.777,25	452,9	0,501	23.777,25
91d 122 1T T D	418,0	0,546	21.945,00	418,0	0,546	21.945,00
<b>Média</b>	<b>447,0</b>	<b>0,531</b>	<b>23467,50</b>	<b>447,0</b>	<b>0,531</b>	<b>23.467,50</b>

Legenda:  $f_{cr}$  Carga Crítica;  $\delta_{cr}$  Deslocamento crítico;  $M_{cr}$  Momento Crítico;  $f_{max}$  Carga máxima;  $\delta_{max}$  Deslocamento máximo;  $M_{max}$  Momento máximo

Tabela B.2 – Resultados da resistência à flexão dos compósitos reforçados com duas camadas do têxtil AR122 na direção da trama

Corpo de prova	$f_{cr}$ (N)	$\delta_{cr}$ (mm)	$M_{cr}$ (N.mm)	$f_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)	$M_{max}$ (N.mm)
7d 122 2T T A	284,5	0,786	14.936,25	622,2	20,911	32.665,50
7d 122 2T T B	319,7	0,415	16.784,25	473,7	15,997	24.869,25
7d 122 2T T C	326,8	0,497	17.157,00	573,6	20,280	30.114,00
7d 122 2T T D	365,6	0,629	19.194,00	554,5	18,269	29.111,25
<b>Média</b>	<b>324,2</b>	<b>0,582</b>	<b>17.017,88</b>	<b>556,0</b>	<b>18,864</b>	<b>29.190,00</b>
28d 122 2T T A	399,7	0,480	20.984,25	513,4	14,569	26.953,50
28d 122 2T T B	419,4	0,652	22.018,50	573,2	17,895	30.093,00
28d 122 2T T C	347,4	0,913	18.238,50	460,8	16,504	24.192,00
28d 122 2T T D	338,9	0,657	17.792,25	541,6	17,227	28.434,00
<b>Média</b>	<b>376,4</b>	<b>0,676</b>	<b>19.758,38</b>	<b>522,3</b>	<b>16,549</b>	<b>27.418,13</b>
91d 122 2T T A	394,7	0,398	20.721,75	521,2	15,914	27.363,00
91d 122 2T T B	451,2	0,388	23.688,00	610,0	13,130	32.025,00
91d 122 2T T C	444,4	0,521	23.331,00	526,0	13,411	27.615,00
91d 122 2T T D	376,0	0,652	19.740,00	584,5	14,508	30.686,25
<b>Média</b>	<b>416,6</b>	<b>0,489</b>	<b>21.870,19</b>	<b>560,4</b>	<b>14,241</b>	<b>29.422,31</b>

Legenda:  $f_{cr}$  Carga Crítica;  $\delta_{cr}$  Deslocamento crítico;  $M_{cr}$  Momento Crítico;  $f_{max}$  Carga máxima;  $\delta_{max}$  Deslocamento máximo;  $M_{max}$  Momento máximo

Tabela B.3 – Resultados da resistência à flexão dos compósitos reforçados com uma camada do têxtil AR122 na direção da urdidura

Corpo de prova	$f_{cr}$ (N)	$\delta_{cr}$ (mm)	$M_{cr}$ (N.mm)	$f_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)	$M_{max}$ (N.mm)
7d 122 1T U A	276,6	0,619	14.521,50	276,6	0,619	14.521,50
7d 122 1T U B	325,1	0,597	17.067,75	325,1	0,597	17.067,75
7d 122 1T U C	387,2	0,578	20.328,00	387,2	0,578	20.328,00
7d 122 1T U D	379,0	0,575	19.897,50	379,0	0,575	19.897,50
<b>Média</b>	<b>342,0</b>	<b>0,592</b>	<b>17.953,69</b>	<b>342,0</b>	<b>0,592</b>	<b>17.953,69</b>
28d 122 1T U A	418,9	1,344	21.992,25	418,9	1,344	21.992,25
28d 122 1T U B	402,2	1,395	21.115,50	402,2	1,395	21.115,50
28d 122 1T U C	478,8	1,341	25.137,00	478,8	1,341	25.137,00
28d 122 1T U D	441,4	1,283	23.173,50	441,4	1,283	23.173,50
<b>Média</b>	<b>435,3</b>	<b>1,341</b>	<b>22.854,56</b>	<b>435,3</b>	<b>1,341</b>	<b>22.854,56</b>
91d 122 1T U A	476,9	1,237	25.037,25	476,9	1,237	25.037,25
91d 122 1T U B	452,0	1,240	23.730,00	452,0	1,240	23.730,00
91d 122 1T U C	290,9	7,683	15.272,25	290,9	7,683	15.272,25
91d 122 1T U D	493,0	1,248	25.882,50	493,0	1,248	25.882,50
<b>Média</b>	<b>428,2</b>	<b>2,852</b>	<b>22.480,50</b>	<b>428,2</b>	<b>2,852</b>	<b>22.480,50</b>
Legenda: $f_{cr}$ Carga Crítica; $\delta_{cr}$ Deslocamento crítico; $M_{cr}$ Momento Crítico; $f_{max}$ Carga máxima; $\delta_{max}$ Deslocamento máximo; $M_{max}$ Momento máximo						

Tabela B.4 – Resultados da resistência à flexão dos compósitos reforçados com duas camadas do têxtil AR122 na direção da urdidura

Corpo de prova	$f_{cr}$ (N)	$\delta_{cr}$ (mm)	$M_{cr}$ (N.mm)	$f_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)	$M_{max}$ (N.mm)
7d 122 2T U A	381,9	0,320	20.049,75	506,6	9,810	26.596,50
7d 122 2T U B	381,7	0,355	20.039,25	381,7	0,355	20.039,25
7d 122 2T U C	318,5	0,402	16.721,25	500,3	16,224	26.265,75
7d 122 2T U D	307,9	0,822	16.164,75	448,3	16,257	23.535,75
<b>Média</b>	<b>347,5</b>	<b>0,475</b>	<b>18.243,75</b>	<b>459,2</b>	<b>10,661</b>	<b>24.109,31</b>
28d 122 2T U A	387,0	0,860	20.317,50	387,0	0,860	20.317,50
28d 122 2T U B	375,9	0,633	19.734,75	499,1	15,769	26.202,75
28d 122 2T U C	380,9	0,619	19.997,25	433,0	15,488	22.732,50
28d 122 2T U D	374,3	0,949	19.650,75	458,3	17,269	24.060,75
<b>Média</b>	<b>379,5</b>	<b>0,765</b>	<b>19.925,06</b>	<b>444,4</b>	<b>12,346</b>	<b>23.328,38</b>
91d 122 2T U A	402,7	0,705	21.141,75	540,2	10,133	28.360,50
91d 122 2T U B	445,8	0,572	23.404,50	445,8	0,572	23.404,50
91d 122 2T U C	463,9	0,746	24.354,75	463,9	0,746	24.354,75
91d 122 2T U D	383,6	0,544	20.139,00	583,2	13,122	30.618,00
<b>Média</b>	<b>424,0</b>	<b>0,642</b>	<b>22.260,00</b>	<b>508,3</b>	<b>6,143</b>	<b>26.684,44</b>
Legenda: $f_{cr}$ Carga Crítica; $\delta_{cr}$ Deslocamento crítico; $M_{cr}$ Momento Crítico; $f_{max}$ Carga máxima; $\delta_{max}$ Deslocamento máximo; $M_{max}$ Momento máximo						



**APÊNDICE C – TABELAS DOS RESULTADOS RELATIVOS RESISTÊNCIA À  
TRAÇÃO DIRETA DO TÊXTIL AR192**

Tabela C.1 – Resultados da resistência à tração direta dos compósitos reforçados com uma camada do têxtil AR192 na direção da Trama

Corpo de prova	$\sigma_{c,cr}$ (MPa)	$\sigma_{cu}$ (MPa)	$\sigma_{t,cr}$ (MPa)	$\sigma_{tu}$ (MPa)
7d 192 1T T A	2,98	4,04	1036,52	1405,22
7d 192 1T T B	-	-	-	-
7d 192 1T T C	-	-	-	-
7d 192 1T T D	1,90	3,37	660,87	1172,17
<b>Média</b>	<b>2,44</b>	<b>3,70</b>	<b>848,70</b>	<b>1288,70</b>
28d 192 1T T A	-	-	-	-
28d 192 1T T B	4,43	4,43	1540,87	1540,87
28d 192 1T T C	2,6	3,53	904,35	1227,83
28d 192 1T T D	-	-	-	-
<b>Média</b>	<b>3,51</b>	<b>3,98</b>	<b>1222,61</b>	<b>1384,35</b>
91d 192 1T T A	2,19	2,83	761,74	984,35
91d 192 1T T B	-	-	-	-
91d 192 1T T C	-	-	-	-
91d 192 1T T D	2,95	3,23	1026,09	1123,48
<b>Média</b>	<b>2,57</b>	<b>3,03</b>	<b>893,91</b>	<b>1053,91</b>

Legenda:  $\sigma_{c,cr}$  tensão crítica do compósito.  $\sigma_{cu}$  tensão máxima do compósito.  $\sigma_{t,cr}$  tensão crítica do reforço.  $\sigma_{tu}$  tensão máxima do reforço.

Tabela C.2 – Resultados da resistência à tração direta dos compósitos reforçados com duas camadas do têxtil AR192 na direção da Trama

Corpo de prova	$\sigma_{c,cr}$ (MPa)	$\sigma_{cu}$ (MPa)	$\sigma_{t,cr}$ (MPa)	$\sigma_{tu}$ (MPa)
7d 192 2T T A	3,02	7,28	525,22	1266,09
7d 192 2T T B	3,46	6,74	601,74	1172,17
7d 192 2T T C	2,77	6,49	481,74	1128,70
7d 192 2T T D	1,95	7,33	339,13	1274,78
<b>Média</b>	<b>2,80</b>	<b>6,96</b>	<b>486,96</b>	<b>1210,43</b>
28d 192 2T T A	-	-	-	-
28d 192 2T T B	2,95	5,79	513,04	1006,96
28d 192 2T T C	3,23	5,63	561,74	979,13
28d 192 2T T D	3,20	6,59	556,52	1146,09
<b>Média</b>	<b>3,13</b>	<b>6,00</b>	<b>543,77</b>	<b>1044,06</b>
91d 192 2T T A	3,61	6,37	627,83	1107,83
91d 192 2T T B	-	-	-	-
91d 192 2T T C	3,25	5,63	565,22	979,13
91d 192 2T T D	-	-	-	-
<b>Média</b>	<b>3,43</b>	<b>6,00</b>	<b>596,52</b>	<b>1043,48</b>

Legenda:  $\sigma_{c,cr}$  tensão crítica do compósito.  $\sigma_{cu}$  tensão máxima do compósito.  $\sigma_{t,cr}$  tensão crítica do reforço.  $\sigma_{tu}$  tensão máxima do reforço.

Tabela C.3 – Resultados da resistência à tração direta dos compósitos reforçados com três camadas do têxtil AR192 na direção da Trama

Corpo de prova	$\sigma_{c,cr}$ (MPa)	$\sigma_{cu}$ (MPa)	$\sigma_{t,cr}$ (MPa)	$\sigma_{tu}$ (MPa)
28d 192 3T T A	4,28	7,78	496,23	902,03
28d 192 3T T B	3,65	7,72	423,19	895,07
28d 192 3T T C	3,06	7,83	354,78	907,83
28d 192 3T T D	3,09	7,68	358,26	890,43
<b>Média</b>	<b>3,52</b>	<b>7,75</b>	<b>408,12</b>	<b>898,84</b>

Legenda:  $\sigma_{c,cr}$  tensão crítica do compósito.  $\sigma_{cu}$  tensão máxima do compósito.  $\sigma_{t,cr}$  tensão crítica do reforço.  $\sigma_{tu}$  tensão máxima do reforço.

Tabela C.4 – Resultados da resistência à tração direta dos compósitos reforçados com quatro camadas do têxtil AR192 na direção da Trama

Corpo de prova	$\sigma_{c,cr}$ (MPa)	$\sigma_{cu}$ (MPa)	$\sigma_{t,cr}$ (MPa)	$\sigma_{tu}$ (MPa)
28d 192 4T T A	2,74	10,07	238,26	875,65
28d 192 4T T B	-	-	-	-
28d 192 4T T C	-	-	-	-
28d 192 4T T D	-	-	-	-
<b>Média</b>	<b>2,74</b>	<b>10,07</b>	<b>238,26</b>	<b>875,65</b>

Legenda:  $\sigma_{c,cr}$  tensão crítica do compósito.  $\sigma_{cu}$  tensão máxima do compósito.  $\sigma_{t,cr}$  tensão crítica do reforço.  $\sigma_{tu}$  tensão máxima do reforço.

Tabela C.5 – Resultados da resistência à tração direta dos compósitos reforçados com uma camada do têxtil AR192 na direção da Urdidura

Corpo de prova	$\sigma_{c,cr}$ (MPa)	$\sigma_{cu}$ (MPa)	$\sigma_{t,cr}$ (MPa)	$\sigma_{tu}$ (MPa)
7d 192 1T U A	3,89	3,89	1353,04	1353,04
7d 192 1T U B	-	-	-	-
7d 192 1T U C	3,40	3,40	1182,61	1182,61
7d 192 1T U D	3,50	3,50	1217,39	1217,39
<b>Média</b>	<b>3,60</b>	<b>3,60</b>	<b>1251,01</b>	<b>1251,01</b>
28d 192 1T U A	-	-	-	-
28d 192 1T U B	2,33	2,78	810,43	966,96
28d 192 1T U C	1,47	2,41	511,30	838,26
28d 192 1T U D	-	-	-	-
<b>Média</b>	<b>1,90</b>	<b>2,60</b>	<b>660,87</b>	<b>902,61</b>
91d 192 1T U A	-	-	-	-
91d 192 1T U B	2,23	2,23	775,65	775,65
91d 192 1T U C	1,33	3,09	462,61	1074,78
91d 192 1T U D	1,43	2,85	497,39	991,30
<b>Média</b>	<b>1,66</b>	<b>2,72</b>	<b>578,55</b>	<b>947,25</b>

Legenda:  $\sigma_{c,cr}$  tensão crítica do compósito.  $\sigma_{cu}$  tensão máxima do compósito.  $\sigma_{t,cr}$  tensão crítica do reforço.  $\sigma_{tu}$  tensão máxima do reforço.

Tabela C.6 – Resultados da resistência à tração direta dos compósitos reforçados com duas camadas do têxtil AR192 na direção da Urdidura

Corpo de prova	$\sigma_{c,cr}$ (MPa)	$\sigma_{cu}$ (MPa)	$\sigma_{t,cr}$ (MPa)	$\sigma_{tu}$ (MPa)
7d 192 2T U A	3,34	5,65	580,87	982,61
7d 192 2T U B	4,02	6,52	699,13	1133,91
7d 192 2T U C	-	-	-	-
7d 192 2T U D	3,60	6,08	626,09	1057,39
<b>Média</b>	<b>3,65</b>	<b>6,08</b>	<b>635,36</b>	<b>1057,97</b>
28d 192 2T U A	-	-	-	-
28d 192 2T U B	1,94	6,44	337,39	1120,00
28d 192 2T U C	-	-	0,00	0,00
28d 192 2T U D	4,20	5,85	730,43	1017,39
<b>Média</b>	<b>3,07</b>	<b>6,15</b>	<b>533,91</b>	<b>1068,70</b>
91d 192 2T U A	4,51	5,91	784,35	1027,83
91d 192 2T U B	4,62	5,86	803,48	1019,13
91d 192 2T U C	-	-	-	-
91d 192 2T U D	2,43	5,94	422,61	1033,04
<b>Média</b>	<b>3,85</b>	<b>5,90</b>	<b>670,14</b>	<b>1026,67</b>

Legenda:  $\sigma_{c,cr}$  tensão crítica do compósito.  $\sigma_{cu}$  tensão máxima do compósito.  $\sigma_{t,cr}$  tensão crítica do reforço.  $\sigma_{tu}$  tensão máxima do reforço.

Tabela C.7 – Resultados da resistência à tração direta dos compósitos reforçados com três camadas do têxtil AR192 na direção da Urdidura

Corpo de prova	$\sigma_{c,cr}$ (MPa)	$\sigma_{cu}$ (MPa)	$\sigma_{t,cr}$ (MPa)	$\sigma_{tu}$ (MPa)
28d 192 3T U A	-	-	-	-
28d 192 3T U B	-	-	-	-
28d 192 3T U C	5,76	8,66	667,83	1004,06
28d 192 3T U D	4,86	8,56	563,48	992,46
<b>Média</b>	<b>5,31</b>	<b>8,61</b>	<b>615,65</b>	<b>998,26</b>

Legenda:  $\sigma_{c,cr}$  tensão crítica do compósito.  $\sigma_{cu}$  tensão máxima do compósito.  $\sigma_{t,cr}$  tensão crítica do reforço.  $\sigma_{tu}$  tensão máxima do reforço.

Tabela C.8 – Resultados da resistência à tração direta dos compósitos reforçados com quatro camadas do têxtil AR192 na direção da Urdidura

Corpo de prova	$\sigma_{c,cr}$ (MPa)	$\sigma_{cu}$ (MPa)	$\sigma_{t,cr}$ (MPa)	$\sigma_{tu}$ (MPa)
28d 192 4T U A	3,44	8,68	299,13	754,78
28d 192 4T U B	5,10	11,13	443,48	967,83
28d 192 4T U C	3,74	9,93	325,22	863,48
28d 192 4T U D	2,31	8,94	200,87	777,39
<b>Média</b>	<b>3,65</b>	<b>9,67</b>	<b>317,17</b>	<b>840,87</b>

Legenda:  $\sigma_{c,cr}$  tensão crítica do compósito.  $\sigma_{cu}$  tensão máxima do compósito.  $\sigma_{t,cr}$  tensão crítica do reforço.  $\sigma_{tu}$  tensão máxima do reforço.

## APÊNDICE D – TABELAS DOS RESULTADOS RELATIVOS A RESISTÊNCIA À FLEXÃO DO TÊXTIL AR192

Tabela D.1 – Resultados da resistência à flexão dos compósitos reforçados com uma camada do têxtil AR192 na direção da trama

Corpo de prova	$f_{cr}$ (N)	$\delta_{cr}$ (mm)	$M_{cr}$ (N.mm)	$f_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)	$M_{max}$ (N.mm)
7d 192 1T T A	363,9	0,461	19.104,75	409,4	23,059	21.493,50
7d 192 1T T B	360,1	0,754	18.905,25	360,1	0,754	18.905,25
7d 192 1T T C	320,9	0,507	16.847,25	320,9	0,507	16.847,25
7d 192 1T T D	324,2	0,673	17.020,50	517,6	26,551	27.174,00
<b>Média</b>	<b>342,3</b>	<b>0,599</b>	<b>17.969,44</b>	<b>402,0</b>	<b>12,717</b>	<b>21.105,00</b>
28d 192 1T T A	445,0	0,537	24.475,00	445,0	0,537	24.475,00
28d 192 1T T B	436,7	0,598	24.018,50	436,7	0,598	24.018,50
28d 192 1T T C	387,2	0,485	21.296,00	387,2	0,485	21.296,00
28d 192 1T T D	357,3	1,159	19.651,50	357,3	1,159	19.651,50
<b>Média</b>	<b>406,6</b>	<b>0,695</b>	<b>22.360,25</b>	<b>406,6</b>	<b>0,695</b>	<b>22.360,25</b>
91d 192 1T T A	423,0	0,656	22.207,50	423,0	0,656	22.207,50
91d 192 1T T B	355,7	0,310	18.674,25	381,6	11,510	20.034,00
91d 192 1T T C	467,3	0,608	24.533,25	467,3	0,608	24.533,25
91d 192 1T T D	468,0	0,590	24.570,00	468,0	0,590	24.570,00
<b>Média</b>	<b>428,5</b>	<b>0,541</b>	<b>22.496,25</b>	<b>435,0</b>	<b>3,341</b>	<b>22.836,19</b>

Legenda:  $f_{cr}$  Carga Crítica;  $\delta_{cr}$  Deslocamento crítico;  $M_{cr}$  Momento Crítico;  $f_{max}$  Carga máxima;  $\delta_{max}$  Deslocamento máximo;  $M_{max}$  Momento máximo

Tabela D.2 – Resultados da resistência à flexão dos compósitos reforçados com duas camadas do têxtil AR192 na direção da trama

Corpo de prova	$f_{cr}$ (N)	$\delta_{cr}$ (mm)	$M_{cr}$ (N.mm)	$f_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)	$M_{max}$ (N.mm)
7d 192 2T T A	308,4	0,413	16.962,00	701,4	26,339	38.577,00
7d 192 2T T B	311,2	0,476	17.116,00	620,4	20,665	34.122,00
7d 192 2T T C	344,0	0,589	18.920,00	661,8	25,869	36.399,00
7d 192 2T T D	297,1	0,436	16.340,50	548,0	20,891	30.140,00
<b>Média</b>	<b>315,2</b>	<b>0,479</b>	<b>17.334,63</b>	<b>632,9</b>	<b>23,441</b>	<b>34.809,50</b>
28d 192 2T T A	306,0	1,195	16.065,00	813,9	25,544	42.729,75
28d 192 2T T B	380,6	0,509	19.981,50	822,2	23,621	43.165,50
28d 192 2T T C	366,7	0,402	19.251,75	648,4	23,502	34.041,00
28d 192 2T T D	212,3	0,288	11.145,75	724,5	27,119	38.036,25
<b>Média</b>	<b>316,4</b>	<b>0,598</b>	<b>16.611,00</b>	<b>752,2</b>	<b>24,947</b>	<b>39.493,13</b>
91d 192 2T T A	345,2	0,422	18.123,00	642,5	24,543	33.731,25
91d 192 2T T B	478,5	0,412	25.121,25	631,7	24,575	33.164,25
91d 192 2T T C	360,5	0,418	18.926,25	707,7	25,410	37.154,25
91d 192 2T T D	318,2	0,490	16.705,50	696,0	25,207	36.540,00
<b>Média</b>	<b>375,6</b>	<b>0,436</b>	<b>19.719,00</b>	<b>669,5</b>	<b>24,934</b>	<b>35.147,44</b>
Legenda: $f_{cr}$ Carga Crítica; $\delta_{cr}$ Deslocamento crítico; $M_{cr}$ Momento Crítico; $f_{max}$ Carga máxima; $\delta_{max}$ Deslocamento máximo; $M_{max}$ Momento máximo						

Tabela D.3 – Resultados da resistência à flexão dos compósitos reforçados com três camadas do têxtil AR192 na direção da trama

Corpo de prova	$f_{cr}$ (N)	$\delta_{cr}$ (mm)	$M_{cr}$ (N.mm)	$f_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)	$M_{max}$ (N.mm)
28d 192 3T T A	259,6	0,251	13.629,00	712,2	24,006	37.390,50
28d 192 3T T B	238,4	0,287	12.516,00	799,3	28,769	41.963,25
28d 192 3T T C	151,0	0,151	7.927,50	797,9	34,081	41.889,75
28d 192 3T T D	242,0	0,373	12.705,00	871,6	33,254	45.759,00
<b>Média</b>	<b>222,8</b>	<b>0,266</b>	<b>11.694,38</b>	<b>795,3</b>	<b>30,028</b>	<b>41.750,63</b>
Legenda: $f_{cr}$ Carga Crítica; $\delta_{cr}$ Deslocamento crítico; $M_{cr}$ Momento Crítico; $f_{max}$ Carga máxima; $\delta_{max}$ Deslocamento máximo; $M_{max}$ Momento máximo						

Tabela D.4 – Resultados da resistência à flexão dos compósitos reforçados com quatro camadas do têxtil AR192 na direção da trama

Corpo de prova	$f_{cr}$ (N)	$\delta_{cr}$ (mm)	$M_{cr}$ (N.mm)	$f_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)	$M_{max}$ (N.mm)
28d 192 4T T A	222,2	1,119	11.665,50	592,8	29,750	31.122,00
28d 192 4T T B	236,8	1,467	12.432,00	603,0	23,095	31.657,50
28d 192 4T T C	273,0	0,576	14.332,50	597,1	24,283	31.347,75
28d 192 4T T D	268,2	0,345	14.080,50	594,7	20,068	31.221,75
<b>Média</b>	<b>250,1</b>	<b>0,877</b>	<b>13.127,63</b>	<b>596,9</b>	<b>24,299</b>	<b>31.337,25</b>
Legenda: $f_{cr}$ Carga Crítica; $\delta_{cr}$ Deslocamento crítico; $M_{cr}$ Momento Crítico; $f_{max}$ Carga máxima; $\delta_{max}$ Deslocamento máximo; $M_{max}$ Momento máximo						



Tabela D.5 – Resultados da resistência à flexão dos compósitos reforçados com uma camada do têxtil AR192 na direção da urdidura

Corpo de prova	$f_{cr}$ (N)	$\delta_{cr}$ (mm)	$M_{cr}$ (N.mm)	$f_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)	$M_{max}$ (N.mm)
7d 192 1T U A	386,3	0,505	20.280,75	386,3	0,505	20.280,75
7d 192 1T U B	459,0	0,592	24.097,50	459,0	0,592	24.097,50
7d 192 1T U C	438,4	0,810	23.016,00	438,4	0,810	23.016,00
7d 192 1T U D	330,4	1,139	17.346,00	467,4	17,395	24.538,50
<b>Média</b>	<b>403,5</b>	<b>0,762</b>	<b>21.185,06</b>	<b>437,8</b>	<b>4,826</b>	<b>22.983,19</b>
28d 192 1T U A	413,7	1,154	21.719,25	413,7	1,154	21.719,25
28d 192 1T U B	463,9	1,233	24.354,75	463,9	1,233	24.354,75
28d 192 1T U C	396,4	1,388	20.811,00	396,4	1,388	20.811,00
28d 192 1T U D	372,1	1,146	19.535,25	372,1	1,146	19.535,25
<b>Média</b>	<b>411,5</b>	<b>1,230</b>	<b>21.605,06</b>	<b>411,5</b>	<b>1,230</b>	<b>21.605,06</b>
91d 192 1T U A	521,5	0,516	27.378,75	521,5	0,516	27.378,75
91d 192 1T U B	512,1	0,537	26.885,25	512,1	0,537	26.885,25
91d 192 1T U C	478,0	0,354	25.095,00	478,0	0,354	25.095,00
91d 192 1T U D	316,8	0,376	16.632,00	316,8	0,376	16.632,00
<b>Média</b>	<b>457,1</b>	<b>0,446</b>	<b>23.997,75</b>	<b>457,1</b>	<b>0,446</b>	<b>23.997,75</b>
Legenda: $f_{cr}$ Carga Crítica; $\delta_{cr}$ Deslocamento crítico; $M_{cr}$ Momento Crítico; $f_{max}$ Carga máxima; $\delta_{max}$ Deslocamento máximo; $M_{max}$ Momento máximo						

Tabela D.6 – Resultados da resistência à flexão dos compósitos reforçados com duas camadas do têxtil AR192 na direção da urdidura

Corpo de prova	$f_{cr}$ (N)	$\delta_{cr}$ (mm)	$M_{cr}$ (N.mm)	$f_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)	$M_{max}$ (N.mm)
7d 192 2T U A	288,3	0,332	15.135,75	493,6	20,753	25.914,00
7d 192 2T U B	293,7	0,465	15.419,25	681,9	27,208	35.799,75
7d 192 2T U C	358,2	0,445	18.805,50	665,6	19,915	34.944,00
7d 192 2T U D	229,7	0,810	12.059,25	501,7	23,221	26.339,25
<b>Média</b>	<b>292,5</b>	<b>0,513</b>	<b>15.354,94</b>	<b>585,7</b>	<b>22,774</b>	<b>30.749,25</b>
28d 192 2T U A	366,3	0,804	19.230,75	586,5	18,948	30.791,25
28d 192 2T U B	393,3	0,443	20.648,25	1.070,1	21,234	56.180,25
28d 192 2T U C	338,6	0,439	17.776,50	702,3	19,341	36.870,75
28d 192 2T U D	393,9	0,567	20.679,75	643,0	19,921	33.757,50
<b>Média</b>	<b>373,0</b>	<b>0,563</b>	<b>19.583,81</b>	<b>750,5</b>	<b>19,861</b>	<b>39.399,94</b>
91d 192 2T U A	384,0	0,925	20.160,00	484,0	16,144	25.410,00
91d 192 2T U B	431,7	0,396	22.664,25	731,9	17,955	38.424,75
91d 192 2T U C	408,2	0,521	21.430,50	658,7	21,565	34.581,75
91d 192 2T U D	334,4	0,419	17.556,00	562,1	18,739	29.510,25
<b>Média</b>	<b>389,6</b>	<b>0,565</b>	<b>20.452,69</b>	<b>609,2</b>	<b>18,601</b>	<b>31.981,69</b>
Legenda: $f_{cr}$ Carga Crítica; $\delta_{cr}$ Deslocamento crítico; $M_{cr}$ Momento Crítico; $f_{max}$ Carga máxima; $\delta_{max}$ Deslocamento máximo; $M_{max}$ Momento máximo						

Tabela D.7 – Resultados da resistência à flexão dos compósitos reforçados com três camadas do têxtil AR192 na direção da urdidura

Corpo de prova	$f_{cr}$ (N)	$\delta_{cr}$ (mm)	$M_{cr}$ (N.mm)	$f_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)	$M_{max}$ (N.mm)
28d 192 3T U A	642,1	0,426	33.710,25	1.095,1	18,932	57.492,75
28d 192 3T U B	498,8	0,392	26.187,00	923,9	23,784	48.504,75
28d 192 3T U C	595,8	0,573	31.279,50	690,8	20,170	36.267,00
28d 192 3T U D	535,3	0,538	28.103,25	850,4	25,289	44.646,00
<b>Média</b>	<b>568,0</b>	<b>0,482</b>	<b>29.820,00</b>	<b>890,1</b>	<b>22,044</b>	<b>46.727,63</b>
Legenda: $f_{cr}$ Carga Crítica; $\delta_{cr}$ Deslocamento crítico; $M_{cr}$ Momento Crítico; $f_{max}$ Carga máxima; $\delta_{max}$ Deslocamento máximo; $M_{max}$ Momento máximo						

Tabela D.8 – Resultados da resistência à flexão dos compósitos reforçados com quatro camadas do têxtil AR192 na direção da urdidura

Corpo de prova	$f_{cr}$ (N)	$\delta_{cr}$ (mm)	$M_{cr}$ (N.mm)	$f_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)	$M_{max}$ (N.mm)
28d 192 4T U A	505,6	2,771	26.544,00	1.074,1	25,512	56.390,25
28d 192 4T U B	447,7	0,319	23.504,25	1.029,6	24,299	54.054,00
28d 192 4T U C	414,3	0,753	21.750,75	1.500,6	20,996	78.781,50
28d 192 4T U D	440,5	0,495	23.126,25	1.089,6	26,246	57.204,00
<b>Média</b>	<b>452,0</b>	<b>1,085</b>	<b>23.731,31</b>	<b>1.173,5</b>	<b>24,263</b>	<b>61.607,44</b>
Legenda: $f_{cr}$ Carga Crítica; $\delta_{cr}$ Deslocamento crítico; $M_{cr}$ Momento Crítico; $f_{max}$ Carga máxima; $\delta_{max}$ Deslocamento máximo; $M_{max}$ Momento máximo						

**APÊNDICE E – TABELAS DOS RESULTADOS RELATIVOS AOS DE MAIS  
VALORES DE FPI PARA AS AMOSTRAS DE MENOR ESCALA**

Tabela E.1 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=0,5

Distância "d" (mm)	Número de fios	Número de camadas	$c_b$ (mm)	Super reforçado			Sub reforçado			$M_{n(\text{teórico})}$ (Nmm)	$f_{\text{máx}}$ (teórico) (N)	Situação do reforço
				c (mm)	$\epsilon_f$ (mm/mm)	$M_{n(\text{over})}$ (Nmm)	c (mm)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	$M_{n(\text{under})}$ (Nmm)			
6	5	1	0,973	0,464	0,0357	9.736,43	0,463	0,0013	4.194,55	4.194,75	79,90	Sub reforçado
6	10	1	0,973	0,646	0,0249	13.444,57	0,644	0,0019	8.302,51	8.302,35	158,14	Sub reforçado
6	15	1	0,973	0,781	0,0201	16.155,91	0,778	0,0023	12.357,62	12.357,45	235,38	Sub reforçado
6	20	2	0,973	0,892	0,0172	18.317,55	0,889	0,0027	16.370,62	16.370,55	311,82	Sub reforçado
6	25	2	0,973	0,988	0,0152	20.123,94	0,985	0,0031	20.348,47	20.123,78	383,31	Super reforçado
6	30	2	0,973	1,073	0,0138	21.817,85	1,070	0,0034	24.296,18	21.817,95	415,58	Super reforçado
6	35	3	0,973	1,150	0,0127	23.321,47	1,146	0,0037	28.218,30	23.321,55	444,22	Super reforçado
6	40	3	0,973	1,220	0,0117	24.455,15	1,217	0,0040	32.113,63	24.455,03	465,81	Super reforçado
6	45	3	0,973	1,286	0,0110	25.767,01	1,282	0,0042	35.987,91	25.767,00	490,80	Super reforçado
6	50	4	0,973	1,346	0,0104	26.973,82	1,342	0,0045	39.843,06	26.973,98	513,79	Super reforçado
6	55	4	0,973	1,403	0,010	28.434,99	1,399	0,0047	43.677,40	28.435,05	541,62	Super reforçado
6	60	4	0,973	1,457	0,0094	29.066,48	1,453	0,0050	47.493,08	29.066,63	553,65	Super reforçado
6	65	5	0,973	1,508	0,0089	29.724,34	1,504	0,0052	51.292,26	38.891,05	740,78	Super reforçado
6	70	5	0,973	1,557	0,0086	30.842,41	1,552	0,0054	55.077,09	39.643,42	755,11	Super reforçado

Legenda: d Distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração;  $c_b$  Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra em situação de equilíbrio das forças; c Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra;  $\epsilon_f$  Deformação de tração do fio;  $\epsilon_c$  Deformação de compressão da matriz;  $M_n$  Momento nominal;  $f_{\text{máx}}$  Força máxima de flexão

Tabela E.2 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=0,6

Distância "d" (mm)	Número de fios	Número de camadas	$c_b$ (mm)	Super reforçado			Sub reforçado			$M_n$ (teórico) (Nmm)	$f_{m\acute{a}x}$ (teórico) (N)	Situação do reforço
				c (mm)	$\epsilon_f$ (mm/mm)	$M_n$ (over) (Nmm)	c (mm)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	$M_n$ (under) (Nmm)			
6	5	1	0,973	0,507	0,0325	10.611,03	0,505	0,0014	5.021,40	5.021,63	95,65	Sub reforçado
6	10	1	0,973	0,704	0,0226	14.595,57	0,701	0,0021	9.930,29	9.930,38	189,15	Sub reforçado
6	15	1	0,973	0,850	0,0182	17.485,97	0,847	0,0026	14.769,73	14.769,83	281,33	Sub reforçado
6	20	2	0,973	0,970	0,0156	19.847,80	0,967	0,0030	19.555,20	19.555,20	372,48	Sub reforçado
6	25	2	0,973	1,073	0,0138	21.817,85	1,070	0,0034	24.296,18	21.817,95	415,58	Super reforçado
6	30	2	0,973	1,165	0,0125	23.589,58	1,161	0,0037	28.998,71	23.589,83	449,33	Super reforçado
6	35	3	0,973	1,247	0,0114	24.980,32	1,243	0,0041	33.667,08	24.980,55	475,82	Super reforçado
6	40	3	0,973	1,323	0,0106	26.428,31	1,318	0,0044	38.304,45	26.428,50	503,40	Super reforçado
6	45	3	0,973	1,392	0,0099	27.656,63	1,388	0,0047	42.911,68	27.656,48	526,79	Super reforçado
6	50	4	0,973	1,457	0,0094	29.066,48	1,453	0,0050	47.493,08	29.066,63	553,65	Super reforçado
6	55	4	0,973	1,518	0,009	30.502,75	1,513	0,0053	52.052,96	30.502,50	581,00	Super reforçado
6	60	4	0,973	1,575	0,0084	30.952,87	1,571	0,0055	56.585,28	30.952,95	589,58	Super reforçado
6	65	5	0,973	1,630	0,0080	31.831,49	1,625	0,0058	61.099,23	31.831,28	606,31	Super reforçado
6	70	5	0,973	1,681	0,0077	32.894,58	1,676	0,0061	65.594,24	32.894,40	626,56	Super reforçado

Legenda: d Distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração;  $c_b$  Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra em situação de equilíbrio das forças; c Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra;  $\epsilon_f$  Deformação de tração do fio;  $\epsilon_c$  Deformação de compressão da matriz;  $M_n$  Momento nominal;  $f_{m\acute{a}x}$  Força máxima de flexão

Tabela E.3 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=0,7

Distância "d" (mm)	Número de fios	Número de camadas	$c_b$ (mm)	Super reforçado			Sub reforçado			$M_n$ (teórico) (Nmm)	$f_{m\acute{a}x}$ (teórico) (N)	Situação do reforço
				c (mm)	$\epsilon_f$ (mm/mm)	$M_n$ (over) (Nmm)	c (mm)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	$M_n$ (under) (Nmm)			
6	5	1	0,973	0,545	0,0300	11.403,07	0,544	0,0016	5.845,24	5.845,35	111,34	Sub reforçado
6	10	1	0,973	0,756	0,0208	15.626,04	0,754	0,0022	11.549,85	11.550,00	220,00	Sub reforçado
6	15	1	0,973	0,912	0,0167	18.653,05	0,909	0,0028	17.169,06	17.169,08	327,03	Sub reforçado
6	20	2	0,973	1,040	0,0143	21.141,17	1,037	0,0033	22.720,64	21.141,23	402,69	Super reforçado
6	25	2	0,973	1,150	0,0127	23.321,47	1,146	0,0037	28.218,30	23.321,55	444,22	Super reforçado
6	30	2	0,973	1,247	0,0114	24.980,32	1,243	0,0041	33.667,08	24.980,55	475,82	Super reforçado
6	35	3	0,973	1,334	0,0105	26.707,23	1,330	0,0044	39.074,33	26.707,28	508,71	Super reforçado
6	40	3	0,973	1,414	0,0097	28.065,32	1,410	0,0048	44.442,07	28.065,45	534,58	Super reforçado
6	45	3	0,973	1,488	0,0091	29.491,91	1,483	0,0051	49.777,33	29.491,88	561,75	Super reforçado
6	50	4	0,973	1,557	0,0086	30.842,41	1,552	0,0054	55.077,09	30.842,18	587,47	Super reforçado
6	55	4	0,973	1,621	0,008	31.440,19	1,616	0,0058	60.349,06	31.440,15	598,86	Super reforçado
6	60	4	0,973	1,681	0,0077	32.894,58	1,676	0,0061	65.594,24	32.894,40	626,56	Super reforçado
6	65	5	0,973	1,738	0,0074	34.131,06	1,733	0,0063	70.812,30	34.131,30	650,12	Super reforçado
6	70	5	0,973	1,792	0,0070	34.657,42	1,787	0,0066	76.006,25	34.657,35	660,14	Super reforçado

Legenda: d Distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração;  $c_b$  Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra em situação de equilíbrio das forças; c Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra;  $\epsilon_f$  Deformação de tração do fio;  $\epsilon_c$  Deformação de compressão da matriz;  $M_n$  Momento nominal;  $f_{m\acute{a}x}$  Força máxima de flexão

Tabela E.4 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=0,8

Distância "d" (mm)	Número de fios	Número de camadas	$c_b$ (mm)	Super reforçado			Sub reforçado			Mn(teórico) (Nmm)	f <sub>máx</sub> (teórico) (N)	Situação do reforço
				c (mm)	$\epsilon_f$ (mm/mm)	Mn(over) (Nmm)	c (mm)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	Mn(under) (Nmm)			
6	5	1	0,973	0,581	0,0280	12.138,84	0,579	0,0017	6.666,88	6.666,98	126,99	Sub reforçado
6	10	1	0,973	0,805	0,0194	16.610,24	0,802	0,0024	13.163,09	13.163,33	250,73	Sub reforçado
6	15	1	0,973	0,970	0,0156	19.847,80	0,967	0,0030	19.555,20	19.555,20	372,48	Sub reforçado
6	20	2	0,973	1,105	0,0133	22.387,89	1,101	0,0035	25.868,48	22.388,10	426,44	Super reforçado
6	25	2	0,973	1,220	0,0117	24.455,15	1,217	0,0040	32.113,63	24.455,03	465,81	Super reforçado
6	30	2	0,973	1,323	0,0106	26.428,31	1,318	0,0044	38.304,45	26.428,50	503,40	Super reforçado
6	35	3	0,973	1,414	0,0097	28.065,32	1,410	0,0048	44.442,07	28.065,45	534,58	Super reforçado
6	40	3	0,973	1,498	0,0090	29.613,34	1,494	0,0052	50.533,77	29.613,15	564,06	Super reforçado
6	45	3	0,973	1,575	0,0084	30.952,87	1,571	0,0055	56.585,28	30.952,95	589,58	Super reforçado
6	50	4	0,973	1,647	0,0079	32.207,02	1,642	0,0059	62.600,82	32.207,18	613,47	Super reforçado
6	55	4	0,973	1,714	0,008	35.733,22	1,709	0,0062	68.578,86	35.733,08	680,63	Super reforçado
6	60	4	0,973	1,777	0,0071	34.466,11	1,772	0,0065	74.523,99	34.466,25	656,50	Super reforçado
6	65	5	0,973	1,837	0,0068	35.632,01	1,831	0,0069	80.440,79	35.631,75	678,70	Super reforçado
6	70	5	0,973	1,893	0,0065	36.556,46	1,887	0,0072	86.328,52	36.556,28	696,31	Super reforçado

Legenda: d Distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração;  $c_b$  Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra em situação de equilíbrio das forças; c Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra;  $\epsilon_f$  Deformação de tração do fio;  $\epsilon_c$  Deformação de compressão da matriz;  $M_n$  Momento nominal;  $f_{máx}$  Força máxima de flexão



Tabela E.5 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=0,9

Distância "d" (mm)	Número de fios	Número de camadas	$c_b$ (mm)	Super reforçado			Sub reforçado			$M_n$ (teórico) (Nmm)	$f_{m\acute{a}x}$ (teórico) (N)	Situação do reforço
				c (mm)	$\epsilon_f$ (mm/mm)	$M_n$ (over) (Nmm)	c (mm)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	$M_n$ (under) (Nmm)			
6	5	1	0,973	0,614	0,0263	12.803,39	0,612	0,0018	7.486,04	7.485,98	142,59	Sub reforçado
6	10	1	0,973	0,850	0,0182	17.485,97	0,847	0,0026	14.769,73	14.769,83	281,33	Sub reforçado
6	15	1	0,973	1,023	0,0146	20.834,12	1,020	0,0032	21.931,14	20.834,10	396,84	Super reforçado
6	20	2	0,973	1,165	0,0125	23.589,58	1,161	0,0037	28.998,71	23.589,83	449,33	Super reforçado
6	25	2	0,973	1,286	0,0110	25.767,01	1,282	0,0042	35.987,91	25.767,00	490,80	Super reforçado
6	30	2	0,973	1,392	0,0099	27.656,63	1,388	0,0047	42.911,68	27.656,48	526,79	Super reforçado
6	35	3	0,973	1,488	0,0091	29.491,91	1,483	0,0051	49.777,33	29.491,88	561,75	Super reforçado
6	40	3	0,973	1,575	0,0084	30.952,87	1,571	0,0055	56.585,28	30.952,95	589,58	Super reforçado
6	45	3	0,973	1,656	0,0079	32.592,15	1,651	0,0059	63.348,46	32.592,00	620,80	Super reforçado
6	50	4	0,973	1,730	0,0074	33.772,14	1,725	0,0063	70.068,59	33.772,20	643,28	Super reforçado
6	55	4	0,973	1,800	0,007	34.994,26	1,794	0,0067	76.748,67	34.994,40	666,56	Super reforçado
6	60	4	0,973	1,865	0,0067	36.396,92	1,860	0,0070	83.384,85	36.396,68	693,27	Super reforçado
6	65	5	0,973	1,927	0,0063	36.937,46	1,921	0,0074	89.992,17	36.937,43	703,57	Super reforçado
6	70	5	0,973	1,985	0,0061	38.380,87	1,979	0,0077	96.565,06	38.380,65	731,06	Super reforçado

Legenda: d Distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração;  $c_b$  Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra em situação de equilíbrio das forças; c Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra;  $\epsilon_f$  Deformação de tração do fio;  $\epsilon_c$  Deformação de compressão da matriz;  $M_n$  Momento nominal;  $f_{m\acute{a}x}$  Força máxima de flexão

**APÊNDICE F – TABELAS DOS RESULTADOS RELATIVOS AOS DEMAIS  
VALORES DE FPI PARA AS AMOSTRAS DE MAIOR ESCALA (PAINEL) COM  
ESPESSURA DE 20 MM**

Tabela F.1 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=0,3 (espessura de 20 mm)

Distância “d” (mm)	Número de fios	Número de camadas	$c_b$ (mm)	Super reforçado			Sub reforçado			$M_n$ (teórico) (Nmm)	$f_{máx}$ (teórico) (N)	Situação do reforço
				c (mm)	$\epsilon_f$ (mm/mm)	$M_n$ (over) (Nmm)	c (mm)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	$M_n$ (under) (Nmm)			
16	75	1	2,595	1,02	0,0436	286.676,15	1,02	0,00107	101.131,25	101.131,25	663,16	Sub reforçado
15,5	150	2	2,514	1,45	0,0310	417.031,63	1,45	0,00150	206.869,16	206.869,16	1.356,52	Sub reforçado
14	225	3	2,270	1,61	0,0230	390.222,15	1,61	0,00202	260.835,96	260.835,96	1.710,40	Sub reforçado
12,5	300	4	2,027	1,74	0,0186	372.610,27	1,73	0,00251	308.000,41	308.000,41	2.019,67	Sub reforçado

Legenda: d Distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração;  $c_b$  Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra em situação de equilíbrio das forças; c Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra;  $\epsilon_f$  Deformação de tração do fio;  $\epsilon_c$  Deformação de compressão da matriz;  $M_n$  Momento nominal;  $f_{máx}$  Força máxima de flexão

Tabela F.2 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=0,4 (espessura de 20 mm)

Distância “d” (mm)	Número de fios	Número de camadas	$c_b$ (mm)	Super reforçado			Sub reforçado			$M_n$ (teórico) (Nmm)	$f_{máx}$ (teórico) (N)	Situação do reforço
				c (mm)	$\epsilon_f$ (mm/mm)	$M_n$ (over) (Nmm)	c (mm)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	$M_n$ (under) (Nmm)			
16	75	1	2,595	1,18	0,0379	331.161,09	1,17	0,00124	134.411,14	134.411,14	881,38	Sub reforçado
15,5	150	2	2,514	1,61	0,0258	432.398,00	1,61	0,00180	257.685,93	257.685,93	1.689,74	Sub reforçado
14	225	3	2,270	1,85	0,0198	445.314,79	1,84	0,00236	345.800,85	345.800,85	2.267,55	Sub reforçado
12,5	300	4	2,027	1,98	0,0159	421.919,90	1,98	0,00293	407.797,02	407.797,02	2.674,08	Sub reforçado

Legenda: d Distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração;  $c_b$  Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra em situação de equilíbrio das forças; c Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra;  $\epsilon_f$  Deformação de tração do fio;  $\epsilon_c$  Deformação de compressão da matriz;  $M_n$  Momento nominal;  $f_{máx}$  Força máxima de flexão

Tabela F.3 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=0,5 (espessura de 20 mm)

Distância “d” (mm)	Número de fios	Número de camadas	$c_b$ (mm)	Super reforçado			Sub reforçado			Mn(teórico) (Nmm)	$f_{m\acute{a}x}$ (teórico) (N)	Situação do reforço
				c (mm)	$\epsilon_f$ (mm/mm)	Mn(over) (Nmm)	c (mm)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	Mn(under) (Nmm)			
16	75	1	2,595	1,31	0,0336	365.993,04	1,31	0,00138	167.511,64	167.511,64	1.098,44	Sub reforçado
15,5	150	2	2,514	1,79	0,0230	479.956,76	1,78	0,00204	320.887,58	320.887,58	2.104,18	Sub reforçado
14	225	3	2,270	2,05	0,0175	489.596,17	2,04	0,00266	430.098,42	430.098,42	2.820,32	Sub reforçado
12,5	300	4	2,027	2,19	0,0141	465.002,03	2,19	0,00331	506.732,57	465.002,03	3.049,19	Super reforçado

Legenda: d Distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração;  $c_b$  Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra em situação de equilíbrio das forças; c Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra;  $\epsilon_f$  Deformação de tração do fio;  $\epsilon_c$  Deformação de compressão da matriz;  $M_n$  Momento nominal;  $f_{m\acute{a}x}$  Força máxima de flexão

Tabela F.4 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=0,7 (espessura de 20 mm)

Distância “d” (mm)	Número de fios	Número de camadas	$c_b$ (mm)	Super reforçado			Sub reforçado			Mn(teórico) (Nmm)	$f_{m\acute{a}x}$ (teórico) (N)	Situação do reforço
				c (mm)	$\epsilon_f$ (mm/mm)	Mn(over) (Nmm)	c (mm)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	Mn(under) (Nmm)			
16	75	1	2,595	1,54	0,0282	427.977,79	1,53	0,00166	233.411,27	233.411,27	1.530,57	Sub reforçado
15,5	150	2	2,514	2,09	0,0192	557.257,40	2,09	0,00243	446.128,45	446.128,45	2.925,43	Sub reforçado
14	225	3	2,270	2,39	0,0146	567.109,29	2,38	0,00320	597.014,49	567.109,29	3.718,75	Super reforçado
12,5	300	4	2,027	2,55	0,0117	534.832,35	2,54	0,00399	702.393,63	534.832,35	3.507,10	Super reforçado

Legenda: d Distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração;  $c_b$  Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra em situação de equilíbrio das forças; c Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra;  $\epsilon_f$  Deformação de tração do fio;  $\epsilon_c$  Deformação de compressão da matriz;  $M_n$  Momento nominal;  $f_{m\acute{a}x}$  Força máxima de flexão

Tabela F.5 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=0,8 (espessura de 20 mm)

Distância "d" (mm)	Número de fios	Número de camadas	$c_b$ (mm)	Super reforçado			Sub reforçado			Mn(teórico) (Nmm)	$f_{m\acute{a}x}$ (teórico) (N)	Situação do reforço
				c (mm)	$\epsilon_f$ (mm/mm)	Mn(over) (Nmm)	c (mm)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	Mn(under) (Nmm)			
16	75	1	2,595	1,64	0,0263	455.206,25	1,63	0,00178	266.181,70	266.181,70	1.745,45	Sub reforçado
15,5	150	2	2,514	2,23	0,0179	591.921,69	2,22	0,00261	508.368,58	508.368,58	3.333,56	Sub reforçado
14	225	3	2,270	2,54	0,0136	601.507,01	2,53	0,00344	679.719,11	601.507,01	3.944,31	Super reforçado
12,5	300	4	2,027	2,71	0,0109	566.905,89	2,70	0,00429	799.061,73	566.905,89	3.717,42	Super reforçado

Legenda: d Distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração;  $c_b$  Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra em situação de equilíbrio das forças; c Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra;  $\epsilon_f$  Deformação de tração do fio;  $\epsilon_c$  Deformação de compressão da matriz;  $M_n$  Momento nominal;  $f_{m\acute{a}x}$  Força máxima de flexão

Tabela F.6 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=0,9 (espessura de 20 mm)

Distância "d" (mm)	Número de fios	Número de camadas	$c_b$ (mm)	Super reforçado			Sub reforçado			Mn(teórico) (Nmm)	$f_{m\acute{a}x}$ (teórico) (N)	Situação do reforço
				c (mm)	$\epsilon_f$ (mm/mm)	Mn(over) (Nmm)	c (mm)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	Mn(under) (Nmm)			
16	75	1	2,595	1,73	0,0247	480.042,70	1,73	0,00188	298.808,62	298.808,62	1.959,40	Sub reforçado
15,5	150	2	2,514	2,35	0,0168	623.340,25	2,34	0,00279	570.364,75	570.364,75	3.740,10	Sub reforçado
14	225	3	2,270	2,67	0,0127	629.887,55	2,66	0,00368	762.165,40	629.887,55	4.130,41	Super reforçado
12,5	300	4	2,027	2,85	0,0102	594.474,42	2,84	0,00459	895.328,00	594.474,42	3.898,19	Super reforçado

Legenda: d Distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração;  $c_b$  Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra em situação de equilíbrio das forças; c Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra;  $\epsilon_f$  Deformação de tração do fio;  $\epsilon_c$  Deformação de compressão da matriz;  $M_n$  Momento nominal;  $f_{m\acute{a}x}$  Força máxima de flexão

Tabela F.7 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=1,0 (espessura de 20 mm)

Distância "d" (mm)	Número de fios	Número de camadas	$c_b$ (mm)	Super reforçado			Sub reforçado			$M_n(\text{teórico})$ (Nmm)	$f_{\text{máx}}$ (teórico) (N)	Situação do reforço
				c (mm)	$\epsilon_f$ (mm/mm)	$M_n(\text{over})$ (Nmm)	c (mm)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	$M_n(\text{under})$ (Nmm)			
16	75	1	2,595	1,82	0,0234	504.350,69	1,81	0,00200	331.435,54	331.435,54	2.173,35	Sub reforçado
15,5	150	2	2,514	2,47	0,0159	653.761,89	2,46	0,00295	632.016,50	632.016,50	4.144,37	Sub reforçado
14	225	3	2,270	2,80	0,0120	659.171,69	2,79	0,00390	844.052,01	659.171,69	4.322,44	Super reforçado
12,5	300	4	2,027	2,98	0,0096	619.403,18	2,97	0,00488	991.077,64	619.403,18	4.061,66	Super reforçado

Legenda: d Distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração;  $c_b$  Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra em situação de equilíbrio das forças; c Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra;  $\epsilon_f$  Deformação de tração do fio;  $\epsilon_c$  Deformação de compressão da matriz;  $M_n$  Momento nominal;  $f_{\text{máx}}$  Força máxima de flexão

**APÊNDICE G – TABELAS DOS RESULTADOS RELATIVOS AOS DEMAIS  
VALORES DE FPI PARA AS AMOSTRAS DE MAIOR ESCALA (PAINEL) COM  
ESPESSURA DE 30 MM**

Tabela G.1 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=0,5 (espessura de 30 mm)

Distância “d” (mm)	Número de fios	Número de camadas	$c_b$ (mm)	Super reforçado			Sub reforçado			$M_n$ (teórico) (Nmm)	$f_{máx}$ (teórico) (N)	Situação do reforço
				c (mm)	$\epsilon_f$ (mm/mm)	$M_n$ (over) (Nmm)	c (mm)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	$M_n$ (under) (Nmm)			
26	75	1	4,216	1,69	0,0434	772.532,43	1,68	0,0011	273.816,41	273.816,41	1.795,52	Sub reforçado
25,5	150	2	4,135	2,33	0,0299	1.034.845,59	2,32	0,0015	532.277,29	532.277,29	3.490,34	Sub reforçado
24	225	3	3,892	2,73	0,0234	1.134.789,05	2,72	0,0020	745.676,14	745.676,14	4.889,68	Sub reforçado

Legenda: d Distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração;  $c_b$  Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra em situação de equilíbrio das forças; c Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra;  $\epsilon_f$  Deformação de tração do fio;  $\epsilon_c$  Deformação de compressão da matriz;  $M_n$  Momento nominal;  $f_{máx}$  Força máxima de flexão

Tabela G.2 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=0,6 (espessura de 30 mm)

Distância “d” (mm)	Número de fios	Número de camadas	$c_b$ (mm)	Super reforçado			Sub reforçado			$M_n$ (teórico) (Nmm)	$f_{máx}$ (teórico) (N)	Situação do reforço
				c (mm)	$\epsilon_f$ (mm/mm)	$M_n$ (over) (Nmm)	c (mm)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	$M_n$ (under) (Nmm)			
26	75	1	4,216	1,84	0,0394	839.985,49	1,83	0,00119	327.933,90	327.933,90	2.150,39	Sub reforçado
25,5	150	2	4,135	2,54	0,0272	1.126.561,51	2,53	0,00172	636.924,53	636.924,53	4.176,55	Sub reforçado
24	225	3	3,892	2,97	0,0212	1.229.555,87	2,96	0,00220	891.711,56	891.711,56	5.847,29	Sub reforçado

Legenda: d Distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração;  $c_b$  Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra em situação de equilíbrio das forças; c Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra;  $\epsilon_f$  Deformação de tração do fio;  $\epsilon_c$  Deformação de compressão da matriz;  $M_n$  Momento nominal;  $f_{máx}$  Força máxima de flexão



Tabela G.3 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=0,7 (espessura de 30 mm)

Distância “d” (mm)	Número de fios	Número de camadas	$c_b$ (mm)	Super reforçado			Sub reforçado			Mn(teórico) (Nmm)	f <sub>máx</sub> (teórico) (N)	Situação do reforço
				c (mm)	$\epsilon_f$ (mm/mm)	Mn(over) (Nmm)	c (mm)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	Mn(under) (Nmm)			
26	75	1	4,216	1,98	0,0363	901.260,57	1,98	0,0013	381.836,13	381.836,13	2.503,84	Sub reforçado
25,5	150	2	4,135	2,73	0,0250	1.204.993,17	2,72	0,0019	741.169,94	741.169,94	4.860,13	Sub reforçado
24	225	3	3,892	3,20	0,0196	1.321.915,36	3,18	0,0024	1.037.015,08	1.037.015,08	6.800,10	Sub reforçado

Legenda: d Distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração;  $c_b$  Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra em situação de equilíbrio das forças; c Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra;  $\epsilon_f$  Deformação de tração do fio;  $\epsilon_c$  Deformação de compressão da matriz; M<sub>n</sub> Momento nominal; f<sub>máx</sub> Força máxima de flexão

Tabela G.4 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=0,75 (espessura de 30 mm)

Distância “d” (mm)	Número de fios	Número de camadas	$c_b$ (mm)	Super reforçado			Sub reforçado			Mn(teórico) (Nmm)	f <sub>máx</sub> (teórico) (N)	Situação do reforço
				c (mm)	$\epsilon_f$ (mm/mm)	Mn(over) (Nmm)	c (mm)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	Mn(under) (Nmm)			
26	75	1	4,216	2,05	0,0351	932.876,73	2,04	0,0013	408.787,24	408.787,24	2.680,57	Sub reforçado
25,5	150	2	4,135	2,82	0,0241	1.243.106,72	2,81	0,0019	793.141,96	793.141,96	5.200,93	Sub reforçado
24	225	3	3,892	3,30	0,0188	1.356.605,17	3,29	0,0025	1.109.311,66	1.109.311,66	7.274,17	Sub reforçado

Legenda: d Distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração;  $c_b$  Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra em situação de equilíbrio das forças; c Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra;  $\epsilon_f$  Deformação de tração do fio;  $\epsilon_c$  Deformação de compressão da matriz; M<sub>n</sub> Momento nominal; f<sub>máx</sub> Força máxima de flexão

Tabela G.5 – Modelo de estimativa da força máxima de flexão conforme número de fios e camadas para FPI=0,9 (espessura de 30 mm)

Distância "d" (mm)	Número de fios	Número de camadas	$c_b$ (mm)	Super reforçado			Sub reforçado			$M_n$ (teórico) (Nmm)	$f_{máx}$ (teórico) (N)	Situação do reforço
				c (mm)	$\epsilon_f$ (mm/mm)	$M_n$ (over) (Nmm)	c (mm)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	$M_n$ (under) (Nmm)			
26	75	1	4,216	2,24	0,0319	1.014.913,91	2,23	0,0015	489.317,68	489.317,68	3.208,64	Sub reforçado
25,5	150	2	4,135	3,07	0,0219	1.351.073,53	3,06	0,0021	948.541,38	948.541,38	6.219,94	Sub reforçado
24	225	3	3,892	3,59	0,0171	1.474.633,20	3,58	0,0027	1.325.555,58	1.325.555,58	8.692,17	Sub reforçado

Legenda: d Distância entre o banzo comprimido até o centroide do reforço de tração;  $c_b$  Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra em situação de equilíbrio das forças; c Distância entre o banzo comprimido até a linha neutra;  $\epsilon_f$  Deformação de tração do fio;  $\epsilon_c$  Deformação de compressão da matriz;  $M_n$  Momento nominal;  $f_{máx}$  Força máxima de flexão