

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**PEDRO HENRIQUE LEUCK**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TÊXTEIS DE FIBRA DE VIDRO NO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO TÊXTIL**

**São Leopoldo**  
**2018**

PEDRO HENRIQUE LEUCK

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TÊXTEIS DE FIBRA DE VIDRO NO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO TÊXTIL**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil, pelo Curso de  
Engenharia Civil da Universidade do Vale  
do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Orientadora: Profa. MSc. Fernanda Pacheco

São Leopoldo  
2018

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus e à minha família, em especial meus pais, Pedro e Nara, e minha irmã, Natana, que estiveram sempre presentes durante a minha formação pessoal, acadêmica e profissional. Vocês são fundamentais!

À minha namorada, Ana, pelo companheirismo e apoio total nestes últimos anos, compreendendo as ausências e me confortando nos momentos de angústia.

À minha orientadora, Professora MSc. Fernanda Pacheco, sempre presente, e que teve papel muito importante na tomada de decisões deste estudo, auxiliando na pesquisa e na estruturação do trabalho, e transmitindo conhecimentos e conselhos.

Ao Vinícius Ortolan e à Maira Ott, os quais também estão desenvolvendo suas pesquisas sobre concreto têxtil. Foram essenciais desde o início dos estudos, para a troca de conhecimentos, solução de dúvidas, arranjo dos materiais, moldagens, ensaios e interpretação de resultados.

Ao Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil da Unisinos – itt Performance, em especial ao Laboratório de Segurança Estrutural – LaSE, onde tive o prazer de trabalhar durante parte da graduação, adquirir muitos conhecimentos e fiz amigos para a vida. Agradeço ao Instituto por disponibilizar a infraestrutura necessária para a realização deste estudo.

À equipe do itt Performance, entre eles a Camila Souza, o Lucas Führ, o Lucas Lerner e o Matheus Donadello. Em especial, agradeço à Nataly Toma, presente em todas as moldagens e ensaios, e sempre disposta a ajudar.

Aos técnicos do Laboratório de Ensaios Mecânicos, Diego e Éder, e do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Unisinos, Igor e André, que estiveram de prontidão para me ajudar sempre que necessário.

À empresa Texiglass, que disponibilizou os reforços têxteis necessários para este estudo.

## RESUMO

A partir de estudos sobre os benefícios da inserção de fibras curtas no concreto, surgiu, na década de 1990, na Alemanha, o concreto têxtil (CT). Esse compósito consiste na inserção de reforços têxteis na matriz cimentícia, sendo posicionados nas porções mais solicitadas das peças de concreto e servindo como reforço estrutural. Como os têxteis utilizados são resistentes à corrosão, o cobrimento dos reforços pode ser extremamente inferior quando comparado ao de estruturas de concreto armado, gerando estruturas mais finas e leves. Por isso, o uso deste material pode levar a melhorias estruturais e arquitetônicas, além do benefício em termos de durabilidade, considerando que a corrosão é um dos mais frequentes problemas das estruturas. Por outro lado, o concreto têxtil requer uma matriz cimentícia com performance superior quando comparado a concretos convencionais. Ainda que modelos numéricos estejam sendo desenvolvidos para projetos com elementos de CT, a verificação do comportamento do compósito é realizada através de ensaios. Em relação ao seu comportamento mecânico, as principais análises se voltam à capacidade de resistir às tensões de tração, através de ensaios de tração direta e tração na flexão. Até o momento, estruturas contendo o concreto têxtil são encontradas principalmente na Europa, onde foram executados painéis de fachada, painéis sanduíche, painéis de proteção sonora, decantadores, tubos de água e esgoto, passarelas, dentre outros. Assim, o objetivo desse estudo foi a avaliação do comportamento mecânico de painéis de CT reforçados com têxteis de fibra de vidro álcali resistentes (AR) encontradas comercialmente no país. Para tal, foram realizados os ensaios de tração direta e tração na flexão no compósito, assim como a caracterização da matriz e dos reforços têxteis. Os resultados obtidos indicam que compósitos reforçados com tecidos de menor abertura de malha apresentam melhores resultados. Ainda, verificou-se resultados inferiores aos encontrados pela bibliografia. Porém, ainda são necessários novos estudos em diferentes composições de matrizes e reforços têxteis fabricados no Brasil.

**Palavras-chave:** Concreto têxtil. Reforço. Tração. Fibra de vidro AR.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Painéis de fachada em (a) teatro de Düsseldorf e (b) hotel em Berlim, ambos na Alemanha .....	19
Figura 2 – Estruturas de cobertura em formato de casca em (a) Mannheim e (b) Aachen, Alemanha .....	19
Figura 3 – Tubos de água e esgoto.....	20
Figura 4 – Pannel sanduíche em edificação em Aachen, na Alemanha.....	21
Figura 5 – Sistema betoShell aplicado em um auditório .....	22
Figura 6 – Passarela de concreto têxtil em Oschatz, Alemanha .....	23
Figura 7 – Passarela em Albstadt, Alemanha .....	23
Figura 8 – Reforço de vigas e pilares do Estádio San Siro, na Itália.....	25
Figura 9 – Mesquita Molla Çelebi, na Turquia .....	25
Figura 10 – Reforço de pilares no Estádio Maracanã .....	26
Figura 11 – Reforço das arquibancadas do Estádio Maracanã.....	27
Figura 12 – Tipos de fios: (a) monofilamento, (b) multifilamento, (c) torcidos e (d) torcidos agrupados.....	29
Figura 13 – Classificação das fibras.....	30
Figura 14 – Tecido transpassado .....	34
Figura 15 – Tecido transpassado do tipo leno: (a) esquema e (b) ilustração .....	34
Figura 16 – Tecido tricotado de (a) trama e (b) urdume .....	35
Figura 17 – Tecidos colados .....	36
Figura 18 – Componentes do tecido tricotado tridimensional.....	37
Figura 19 – Tecido tricotado tridimensional.....	37
Figura 20 – Comportamento do concreto têxtil com a adição de fibras curtas .....	43
Figura 21 – Típica curva tensão vs deformação de elementos de CT .....	44
Figura 22 – Comportamento à flexão: zonas (a) comprimida e (b) tracionada.....	47
Figura 23 – Resistência à flexão de compósitos reforçados com vidro AR e carbono .....	48
Figura 24 – Resistência à flexão de matrizes de diferentes composições .....	49
Figura 25 – Etapas do programa experimental .....	52
Figura 26 – Etapa 1 do programa experimental .....	53
Figura 27 – Curva granulométrica do agregado miúdo .....	54
Figura 28 – AR-122-RA-04: espaçamento (a) do urdume e (b) da trama .....	56

Figura 29 – AR-192-RA-06: espaçamento (a) do urdume e (b) da trama .....	57
Figura 30 – (a) equipamento de ensaio <i>MTS Landmark</i> e (b) amostra sendo ensaiada .....	58
Figura 31 – Amostras do reforço AR-122-RA-04 após o ensaio no sentido (a) da trama e (b) do urdume.....	58
Figura 32 – Amostras do reforço AR-192-RA-06 após o ensaio no sentido (a) da trama e (b) do urdume.....	59
Figura 33 – Ensaio de consistência da argamassa .....	61
Figura 34 – Etapa 2 do programa experimental .....	62
Figura 35 – Argamassadeira de bancada .....	63
Figura 36 – Sequência de materiais na mistura .....	63
Figura 37 – (a) moldes e (b) CPs cilíndricos .....	64
Figura 38 – Esquema e posicionamento do reforço para ensaio de tração direta.....	65
Figura 39 – Sequência para a moldagem dos CPs .....	66
Figura 40 – Esquema e posicionamento do reforço para ensaio de tração na flexão .....	67
Figura 41 – (a) equipamento de ensaio e (b) demonstração das faixas de distribuição de carga, transição e medição .....	69
Figura 42 – Ensaio de tração na flexão em 4 pontos .....	70
Figura 43 – Máquinas de ensaio (a) EMIC-Instron e (b) MTS Landmark .....	72
Figura 44 – Garras para ensaio de tração e LVDTs acoplados.....	72
Figura 45 – Etapa 3 do programa experimental .....	73
Figura 46 – Resultados de resistência à compressão.....	75
Figura 47 – Resultados de módulo de elasticidade.....	76
Figura 48 – Ensaio de módulo de elasticidade.....	77
Figura 49 – Curva tensão vs deformação das amostras com reforço AR-122 ....	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
Figura 50 – Ensaio da amostra T-122-7-2.....	81
Figura 51 – Ensaio na amostra T-122-28-2.....	82
Figura 52 – Ensaio na amostra T-122-56-1.....	83
Figura 53 – Curva tensão vs deformação das amostras com reforço AR-192 ....	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
Figura 54 – Ensaio na amostra T-192-7-1.....	85
Figura 55 – Ensaio na amostra T-192-28-1.....	86

Figura 56 – Ensaio na amostra T-192-56-1.....	87
Figura 57 – Curva tensão vs deformação das amostras sem reforço têxtil.....	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
Figura 58 – Resultados aos 7 dias dos diferentes reforços têxteis .....	89
Figura 59 – Resultados aos 28 dias dos diferentes reforços têxteis .....	90
Figura 60 – Resultados aos 56 dias dos diferentes reforços têxteis .....	91
Figura 61 – Curva tensão vs deslocamento das amostras com reforço AR-122.	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
Figura 62 – Ensaio na amostra F-122-7-1.....	93
Figura 63 – Ensaio na amostra F-122-28-3.....	94
Figura 64 – Ensaio na amostra F-122-56-1.....	95
Figura 65 – Curva tensão vs deslocamento das amostras com reforço AR-192.	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
Figura 66 – Ensaio na amostra F-192-7-2.....	97
Figura 67 – Ensaio na amostra F-192-28-1.....	98
Figura 68 – Ensaio na amostra F-192-56-2.....	98
Figura 69 – Curva tensão vs deslocamento das amostras sem reforço têxtil .....	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
Figura 70 – Ensaio na amostra F-REF-7-2.....	100
Figura 71 – Análise de resultados.....	101
Figura 72 – Identificação das zonas de comportamento .....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de diferentes tipos de fibras .....	30
Tabela 2 – Parâmetros verificados experimentalmente .....	48
Tabela 3 – Composição granulométrica do agregado miúdo .....	54
Tabela 4 – Propriedades físicas do agregado miúdo .....	55
Tabela 5 – Propriedades do aditivo superplastificante .....	55
Tabela 6 – Ensaio de tração no reforço têxtil .....	59
Tabela 7 – Dimensões e quantidade de CPs para ensaios de compressão e módulo de elasticidade .....	64
Tabela 8 – Dimensões e quantidade de CPs para os ensaios de tração direta e tração na flexão.....	65
Tabela 9 – Resultados de resistência à compressão .....	74
Tabela 10 – Resultados de módulo de elasticidade .....	76
Tabela 11 – Validade das amostras para ensaio de tração direta.....	78
Tabela 12 – Tensões e deformações das amostras com reforço AR-122.....	79
Tabela 13 – Tensões e deformações das amostras com reforço AR-192.....	84
Tabela 14 – Tensões e deformações das amostras sem reforço têxtil .....	88
Tabela 15 – Validade das amostras para ensaio de tração na flexão.....	91
Tabela 16 – Propriedades na primeira fissura e na resistência máxima das amostras com reforço AR-122 .....	92
Tabela 17 – Propriedades na primeira fissura e na resistência máxima das amostras com reforço AR-192 .....	96
Tabela 18 – Propriedades no pico de resistência das amostras sem reforço têxtil ...	99



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Fibras de vidro AR comerciais.....	31
Quadro 2 – Fibras de carbono comerciais .....	32
Quadro 3 – Fibras de aramida comerciais .....	32
Quadro 4 – Composições e propriedades de matrizes já estudadas .....	40
Quadro 5 – Influência do número de camadas na resistência à tração.....	46
Quadro 6 – Efeito dos mecanismos de envelhecimento .....	51
Quadro 7 – Métodos de análise para ensaios no reforço têxtil, na matriz e no CT ...	51
Quadro 8 – Ficha técnica do reforço têxtil AR-122-RA-04 .....	56
Quadro 9 – Ficha técnica do reforço têxtil AR-192-RA-06 .....	57
Quadro 10 – Traço da matriz.....	60
Quadro 11 – Equipamentos utilizados.....	71

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BOP	Ponto de inflexão (do inglês <i>bend-over point</i> )
CP	Corpo de prova
CT	Concreto têxtil
FRCM	Matriz cimentícia reforçada com tecidos (do inglês <i>fabric reinforced cementitious matrix</i> )
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
pH	Potencial hidrogeniônico
TRC	Concreto reforçado com têxteis (do inglês <i>textile reinforced concrete</i> )
TRM	Argamassa reforçada com têxteis (do inglês <i>textile reinforced mortar</i> )
vs	<i>Versus</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 TEMA .....	13
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	15
1.3 OBJETIVOS .....	16
<b>1.3.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>16</b>
<b>1.3.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>16</b>
1.4 JUSTIFICATIVA .....	16
<b>2 CONCRETO TÊXTIL</b> .....	<b>18</b>
2.1 USO E APLICAÇÃO.....	18
<b>2.1.1 Painéis</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1.2 Passarelas</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1.3 Reforço de estruturas existentes</b> .....	<b>24</b>
2.2 HISTÓRICO DE PESQUISAS.....	27
2.3 REFORÇO TÊXTIL .....	28
<b>2.3.1 Composição dos Têxteis</b> .....	<b>29</b>
2.3.1.1 Fibra de Vidro AR.....	31
2.3.1.2 Fibra de Carbono .....	31
2.3.1.3 Fibra de Aramida .....	32
<b>2.3.2 Têxteis Bidimensionais (2D)</b> .....	<b>33</b>
2.3.2.1 Tecidos Transpassados 2D.....	33
2.3.2.2 Tecidos Tricotados 2D.....	34
2.3.2.3 Tecidos Colados 2D .....	35
<b>2.3.3 Têxteis Tridimensionais (3D)</b> .....	<b>36</b>
2.3.3.1 Tecidos Tricotados 3D.....	36
2.4 MATRIZ CIMENTÍCIA .....	38
<b>2.4.1 Critérios de Dosagem</b> .....	<b>38</b>
<b>2.4.2 Alcalinidade da Matriz</b> .....	<b>40</b>
<b>2.4.3 Adições Minerais</b> .....	<b>41</b>
2.4.3.1 Sílica Ativa.....	41
2.4.3.2 Cinza Volante .....	41
2.4.3.3 Metacaulim .....	42
<b>2.4.4 Adição de Fibras Curtas Dispersas</b> .....	<b>42</b>

2.5 PROPRIEDADES.....	43
<b>2.5.1 Típica Curva Tensão vs Deformação.....</b>	<b>44</b>
<b>2.5.2 Flexão.....</b>	<b>46</b>
2.6 DURABILIDADE.....	49
2.7 MÉTODOS DE ANÁLISE.....	51
<b>3 MÉTODOS E MATERIAIS.....</b>	<b>52</b>
3.1 ETAPA 1.....	52
<b>3.1.1 Escolha e caracterização dos materiais utilizados.....</b>	<b>53</b>
3.1.1.1 Cimento.....	53
3.1.1.2 Areia.....	53
3.1.1.3 Sílica ativa.....	55
3.1.1.4 Aditivo superplastificante.....	55
3.1.1.5 Reforço têxtil.....	55
<b>3.1.2 Definição do traço.....</b>	<b>60</b>
3.2 ETAPA 2.....	61
<b>3.2.1 Mistura da matriz.....</b>	<b>62</b>
<b>3.2.2 Moldagem dos corpos de prova.....</b>	<b>63</b>
<b>3.2.3 Cura das amostras.....</b>	<b>67</b>
<b>3.2.4 Ensaio de resistência à compressão.....</b>	<b>67</b>
<b>3.2.5 Ensaio de módulo de elasticidade.....</b>	<b>68</b>
<b>3.2.6 Ensaio de tração direta.....</b>	<b>69</b>
<b>3.2.7 Ensaio de tração na flexão.....</b>	<b>70</b>
<b>3.2.8 Equipamentos utilizados.....</b>	<b>70</b>
3.3 ETAPA 3.....	73
<b>4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>74</b>
4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	74
4.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	75
4.3 TRAÇÃO DIRETA.....	77
<b>4.3.1 Compósito reforçado com tecido AR-122-RA-04.....</b>	<b>79</b>
<b>4.3.2 Compósito reforçado com tecido AR-192-RA-06.....</b>	<b>84</b>
<b>4.3.3 Amostras sem reforço têxtil.....</b>	<b>88</b>
<b>4.3.4 AR-122 vs AR-192 vs Matriz.....</b>	<b>89</b>
4.4 TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	91
<b>4.4.1 Compósito reforçado com tecido AR-122-RA-04.....</b>	<b>92</b>

<b>4.4.2 Compósito reforçado com tecido AR-192-RA-06.....</b>	<b>95</b>
<b>4.4.3 Amostras sem reforço têxtil .....</b>	<b>98</b>
<b>5 DISCUSSÃO .....</b>	<b>101</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>104</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>106</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo está dividido na discussão e na delimitação do tema, objetivos e justificativa do estudo.

### 1.1 TEMA

Estima-se que o consumo anual de concreto ultrapassa 23 bilhões de toneladas, sendo o material de construção mais utilizado no mundo. Existem três motivos principais para isso: excelente resistência à água, possibilidade de moldar em diferentes formatos e tamanhos e o seu custo de produção relativamente baixo. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O reforço de peças de concreto com barras de aço vem sendo utilizado há mais de 100 anos, formando o compósito chamado de concreto armado. Assim, aliam-se às propriedades resistivas de compressão oriundas do concreto e de tração proporcionadas pelo aço. Entretanto, as barras de aço são suscetíveis à corrosão, o que diminui sua seção transversal e aumenta os esforços no compósito, ao mesmo passo que impacta a durabilidade. (GRIES et al., 2016). Para mitigar a possibilidade de corrosão das armaduras, trabalha-se com camada de cobrimento de concreto.

Considerando os impactos causados pelas construções em concreto armado, entende-se que a redução destes impactos é vital para seu emprego e sustentabilidade. (MOHAMMADHOSSEINI et al., 2017). O desenvolvimento de novas tecnologias relacionadas ao uso do concreto nas construções vem, nos últimos anos, reduzindo o impacto ambiental causado por este material. Concretos com misturas otimizadas e de alto desempenho permitem a construção de estruturas sustentáveis e resilientes. (HAJEK, 2017).

Com o intuito de melhorar o desempenho à tração do concreto e buscar alternativas ao uso das barras de aço, a inserção de fibras curtas no concreto vem sendo estudada nos últimos anos por diversos pesquisadores. Destacam-se as fibras de aço e sintéticas, cada uma com suas devidas características e contribuições à matriz cimentícia. (QUININO, 2015). Todavia, em um concreto com fibras curtas dispersas aleatoriamente, muitas delas podem não estar sendo efetivamente solicitadas. (BRAMESHUBER; BROCKMANN, 2006).

Portanto, de acordo com Triantafillou (2016), a partir dos estudos dos benefícios das fibras curtas no concreto, surgiu na década de 1990, na Alemanha, o concreto têxtil (CT). Segundo Brameshuber e Brockmann (2006), este compósito consiste na inserção de têxteis na matriz cimentícia, sendo posicionados nas porções mais solicitadas à tração das peças de concreto e servindo como reforço estrutural.

Como os têxteis utilizados são resistentes à corrosão, o cobrimento dos reforços e das barras de armação pode ser expressamente reduzido ao comparar-se com as estruturas de concreto armado, possibilitando a geração de estruturas de menor espessura e mais leves. Por isso, o uso deste material pode levar a melhorias estruturais e arquitetônicas, proporcionando o uso de placas de fachadas, por exemplo. (HEGGER et al., 2006a).

A indústria têxtil oferece inúmeros processos de fabricação e fibras de diversos materiais, como fibra de vidro, carbono, aramida e basalto. As diferentes formas de fabricação levam a diferentes propriedades mecânicas, como alta resistência à tração e módulo de elasticidade. Além do mais, é possível fabricar elementos planos (bidimensionais) e espaciais (tridimensionais). O reforço do concreto, utilizando-se têxteis, permite a execução de peças mais esbeltas, com formatos complexos e propriedades pré-determinadas. (GRIES et al., 2016).

Em relação à matriz cimentícia, inúmeras composições estão sendo desenvolvidas. Entretanto, deve-se levar em consideração a trabalhabilidade, a adesão da matriz à malha têxtil e sua durabilidade. As dimensões máximas dos agregados giram em torno de 1 a 2 mm, já que o concreto deve envolver e cobrir os nós dos têxteis. (MECHTCHERINE; SCHNEIDER; BRAMESHUBER, 2016). A reduzida dimensão dos componentes também se origina nas pequenas dimensões dos elementos estruturais gerados.

Como não há agregado graúdo na composição – apenas finos –, discute-se a correta nomenclatura do composto. Dado o alto desempenho deste material, o nome mais aceito é o concreto têxtil (do inglês *TRC – textile reinforced concrete*), mas também há bibliografias que o chamam de argamassa têxtil (*TRM – textile reinforced mortar*) e matriz cimentícia reforçada com tecidos (*FRCM – fabric reinforced cementitious matrix*), tradução nossa. (TRIANAFILLOU, 2016).

Até o momento, estruturas contendo o concreto têxtil são encontradas principalmente na Europa, onde já foram executados painéis de fachada, painéis

sanduíche, barreiras de proteção sonora, decantadores, tubos de água e esgoto, passarelas, dentre outros. (HEGGER et al., 2006a).

Contudo, no Brasil, são poucos os relatos do uso deste compósito em escala real. Alguns estudos teóricos iniciados por Denardi (2016) e Morassutti (2016) introduzem o assunto no país. Desta forma, com este estudo, buscou-se contribuir com o conhecimento do material, através da caracterização de têxteis nacionais, analisando o comportamento mecânico do concreto têxtil com diferentes matrizes cimentícias e verificando a viabilidade de sua aplicação.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

No estudo de Colombo et al. (2013), foi investigado o comportamento à tração direta do concreto têxtil com diferentes geometrias de malha e número de camadas, e também com a sobreposição de têxteis. Como era esperado, verificou-se que a quantidade de reforços têxteis e o posicionamento destes influenciam no comportamento mecânico do CT. Além disso, outras variáveis também alteraram os resultados obtidos: a forma em que é feita a cura do compósito, a taxa de carregamento durante o ensaio e a geometria do corpo de prova.

O concreto têxtil requer uma matriz cimentícia com performance superior quando comparado à concretos convencionais. Para garantir uma boa adesão com o têxtil, a matriz deve ter consistência adequada, permitindo a penetração da mesma entre os quadros do têxtil. Na composição da matriz, também são levados em consideração a compatibilidade química com o reforço têxtil e as propriedades mecânicas. No âmbito industrial, é desejado que o compósito tenha alta resistência inicial e rápido tempo de desforma. (BRAMESHUBER; BROCKMANN, 2006). Brameshuber e Brockmann (2006) apresentam matrizes de concreto têxtil desenvolvidas por diferentes pesquisadores, incluindo matrizes reforçadas com fibras curtas.

De modo geral, a verificação do comportamento de matrizes cimentícias e têxteis se dá através de ensaios. Ainda que modelos numéricos estejam sendo desenvolvidos, é necessário investigar a combinação de ambos os materiais para calibrar estes modelos. Mobasher, Pahilajani e Peled (2006), utilizando-se de resultados experimentais de tensões, distância entre fissuras, rigidez e deformação



de diferentes combinações de têxteis e matrizes, puderam calibrar parâmetros de modelos analíticos, obtendo resultados satisfatórios.

Em relação ao comportamento mecânico de elementos de concreto têxtil, as principais análises se voltam à capacidade de resistir às tensões de tração, através de ensaios de tração direta e tração na flexão. Assim, a extração de parâmetros reais do compósito permite a sua aplicação em projetos mais refinados, ampliando seu uso e a confiabilidade na tarefa de dimensionamento. (MOBASHER, 2016; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

A análise computacional pode ser realizada em três níveis: micro, meso e macro. Nos níveis micro e meso, é necessário conhecer como se dá adesão entre o reforço e a matriz. Já no nível macro, a carga em que o reforço têxtil começa a falhar já é suficiente para realizar algumas simulações. (HEGGER et al., 2006b).

Considerando o cenário de estudo da arte apresentado, o objetivo desse estudo foi a avaliação do comportamento mecânico de placas de concreto têxtil, principalmente no que tange ao seu desempenho quando submetido a esforços de tração.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo deste estudo é analisar o comportamento mecânico do concreto têxtil constituído por diferentes têxteis de fabricação nacional em uma matriz cimentícia.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Determinar experimentalmente as propriedades mecânicas de dois tipos de reforço têxtil em uma matriz;
- b) entender o comportamento à tração do compósito;
- c) comparar os resultados obtidos com a bibliografia pesquisada.

### 1.4 JUSTIFICATIVA

De acordo com Ferreira e Zancul (2016), mesmo com a recessão econômica percebida nos últimos anos no país, ainda há demanda habitacional no setor da

construção civil. Isto acarretou em novos desafios para as empresas do setor, que necessitam de aumento na produtividade. Para tal, os autores elencam uma série de ações necessárias, dentre elas a introdução de novos materiais e sistemas construtivos mais eficientes.

Tradicionalmente, o aço é o reforço mais utilizado para o concreto, criando o concreto armado, um compósito com inúmeras propriedades positivas. Contudo, tal material apresenta algumas desvantagens, como corrosão das armaduras, peso próprio elevado e grandes dimensões. O avanço de pesquisas e o desenvolvimento de novas tecnologias visa a melhorar e/ou substituir o concreto reforçado com barras de aço por outros materiais de alto desempenho e eficiência superior. Neste cenário, como alternativa ao concreto armado, encontra-se o concreto reforçado com têxteis. (TRIANAFILLOU, 2016).

Conforme avaliou Denardi (2016), os têxteis fabricados no Brasil ainda não foram investigados a ponto de comprovar seu desempenho no concreto têxtil. Até o momento, as informações dos catálogos dos fabricantes são as únicas fontes para consulta das propriedades destes produtos. Assim, ressalta-se a importância de estudar o comportamento destes têxteis nacionais. Desta forma, é possível realizar uma comparação com os diferentes concretos têxteis estudados por diversos pesquisadores estrangeiros, avançando para possibilitar o dimensionamento de estruturas com o seu emprego.

Nos últimos anos, as inovações na indústria da construção civil estão voltadas principalmente para novas tecnologias sustentáveis, incluindo no mercado materiais que combinam alta performance mecânica e durabilidade. Dentre os atributos sustentáveis do concreto têxtil, Peled, Bentur e Mobasher (2017) citam os seguintes:

- a) potencial para a produção de peças com menor quantidade de materiais;
- b) estimativa de vida útil de serviço muito superior a concretos convencionais;
- c) cooperação através de uma tecnologia para aumentar a vida útil de estruturas existentes que necessitam de recuperação ou de reforço.

Percebe-se, assim, um vasto potencial para redução do impacto, acréscimo da vida útil e garantia de segurança nas construções, justificando o estudo desse material.

## 2 CONCRETO TÊXTIL

Este capítulo irá apresentar diferentes aplicações de elementos de concreto têxtil para construções residenciais, comerciais, de infraestrutura urbana e para reparo/reforço de estruturas existentes. Para tal, foram reunidas informações sobre propriedades, durabilidade e comportamento estrutural do concreto têxtil, apresentando os seus materiais constituintes, que são basicamente a malha têxtil e a matriz cimentícia.

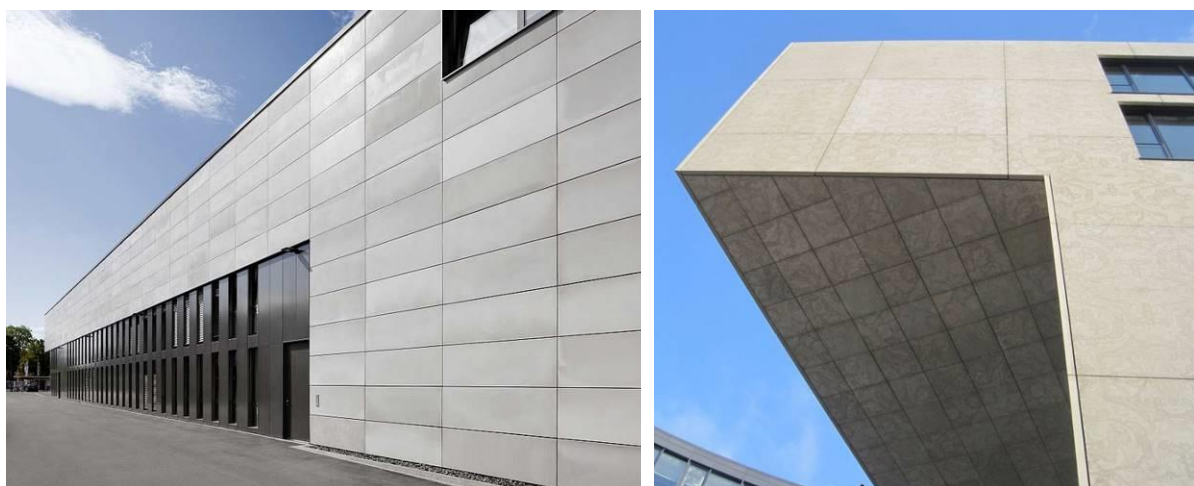
### 2.1 USO E APLICAÇÃO

A utilização de sistemas com elementos de concreto têxtil agiliza processos construtivos, possuindo seções mais leves e materiais mais baratos que o aço e mais robustos que a madeira, por exemplo. A redução do custo de materiais e de cargas permanentes das estruturas, aliada à racionalização do processo construtivo, tende a resultar em benefícios econômicos. (RAUPACH; CRUZ, 2016).

A boa resistência à tração e flexão e o controle da fissuração resultam em menor número de fissuras superficiais, com menores espessuras e, como consequência, vida útil estendida. O concreto têxtil é um material incombustível, portanto não contribui com a propagação do fogo em caso de incêndio. Além disso, é resistente a cupins, fungos e outros organismos. (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

O concreto têxtil é aplicado a inúmeras construções e elementos construtivos, como painéis de fachada (Figura 1), painéis sanduíche, sistemas de cobertura e de casca (Figura 2), passarelas, barreiras de proteção sonora em rodovias, tubos de água e esgoto (Figura 3), decantadores, entre outros. (LIEBOLDT; HELBIG; ENGLER, 2006; HEGGER et al., 2006a; RAUPACH; CRUZ, 2016; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

Figura 1 – Painéis de fachada em (a) teatro de Düsseldorf e (b) hotel em Berlim, ambos na Alemanha



(a)

(b)

Fonte: Hering Architectural Concrete (2018)<sup>1</sup>.

Figura 2 – Estruturas de cobertura em formato de casca em (a) Mannheim e (b) Aachen, Alemanha



(a)

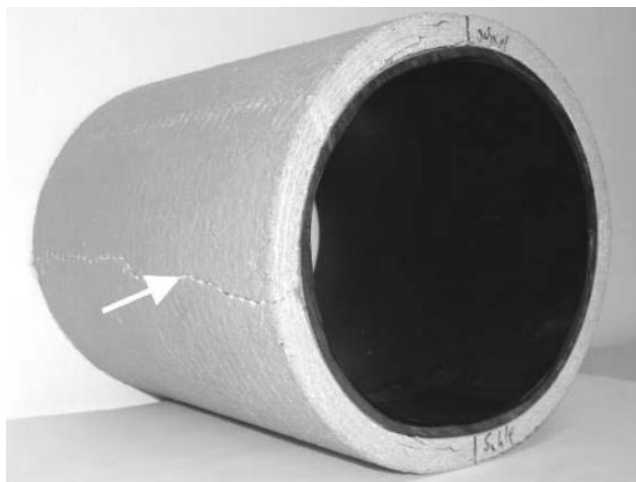
(b)

Fonte: (a) Hering Architectural Concrete (2018)<sup>1</sup> e (b) Solidian (2018)<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Disponível em: <<https://www.heringinternational.com/en/products-services/architectural-concrete/reference-projects>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

<sup>2</sup> Disponível em: <<https://www.solidian.com/en/textile-reinforced-concrete/formability>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

Figura 3 – Tubos de água e esgoto



Fonte: Lieboldt, Helbig e Engler (2006, p. 374).

### 2.1.1 Painéis

O uso do concreto têxtil em painéis de fachada de edificações pode melhorar a estética, reduzir a emissão de dióxido de carbono, visto que peças de menor espessura tendem a ter menor consumo de cimento e também reduzir o custo de transporte de materiais. Com o intuito de melhorar o desempenho térmico das edificações, existem os painéis sanduíche, que consistem em dois painéis de concreto têxtil paralelos e preenchidos com algum material isolante. Enquanto que as camadas externas de um painel sanduíche – também chamadas de camada de pele – geralmente são responsáveis por proporcionar resistência, dureza e capacidade de suportar cargas ao sistema, o núcleo suporta tensões de cisalhamento e também atua como barreira térmica. O núcleo pode ser formado por diversos materiais, como poliestireno expandido (EPS), espuma de poliuretano (PU) e concreto celular, que são materiais de construção de elevada eficiência térmica. (MOBASHER et al., 2011; RAUPACH; CRUZ, 2016; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

A Figura 4 mostra o uso de painel sanduíche na fachada de uma edificação da Universidade *RWTH Aachen*, na Alemanha. Cada painel cobre uma área de 3,45 m<sup>2</sup>, tendo placas de concreto têxtil de 1,5 cm de espessura e núcleo de 15 cm preenchido com espuma de poliuretano. Assim, o sistema possui espessura total de 18 cm. (RAUPACH; CRUZ, 2016).

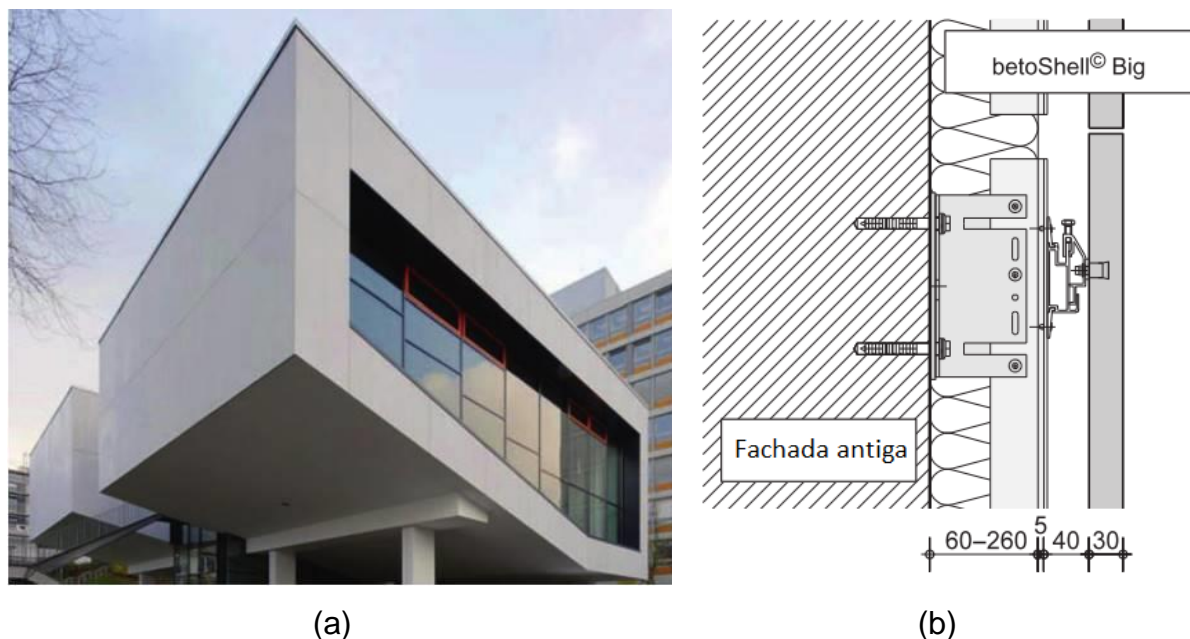
Figura 4 – Painel sanduíche em edificação em Aachen, na Alemanha



Fonte: Raupach e Cruz (2016, p. 280).

A empresa Hering Bau, em colaboração com a Universidade *RWTH Aachen* e a Universidade Técnica de Dresden, desenvolveu painéis para sistemas de fachadas ventiladas, nomeando esta tecnologia de *бетоShell*. Hoje em dia, a empresa oferece inúmeras opções de tamanhos, cores e superfícies. O sistema *бетоShell CLASSIC* foi o primeiro da linha, tendo dimensões de 1200 mm x 600 mm x 20 mm. A opção de maior dimensão é a *бетоShell XXL*, com painéis de 3000 mm x 3000 mm x 30 mm (RAUPACH; CRUZ, 2016). A Figura 5 apresenta o uso de sistema de fachada ventilada em um auditório da Universidade *RWTH Aachen*.

Figura 5 – Sistema betoShell aplicado em um auditório



Fonte: Raupach e Cruz (2016, p. 278 e 279).

### 2.1.2 Passarelas

De acordo com Raupach e Cruz (2016), a utilização do concreto têxtil na construção de novas passarelas apresenta-se vantajosa em relação ao uso do concreto armado. Devido às finas seções transversais, o material oferece liberdade aos projetistas, permitindo que a estrutura se insira no ambiente da maneira menos impactante. A primeira passarela em concreto têxtil, apresentada na Figura 6, foi construída em 2006, na cidade de Oschatz, na Alemanha, com vão livre de 8,6 m.

Figura 6 – Passarela de concreto têxtil em Oschatz, Alemanha



Fonte: Baunetz e Wissen (2018)<sup>3</sup>.

Segundo os mesmos autores, mais recentemente, em 2010, foi executada a passarela de concreto têxtil mais longa do mundo, com 97 m, na cidade de Albstadt, também na Alemanha. A estrutura, com arquitetura mais moderna se comparada à primeira, é apresentada na Figura 7a. Já a Figura 7b mostra a seção transversal da viga T.

Figura 7 – Passarela em Albstadt, Alemanha



(a)

(b)

Fonte: Kulas e Goralski (2014) apud Raupach e Cruz (2016, p. 277).

<sup>3</sup> Disponível em: <<https://www.baunetzwissen.de/beton/objekte/oeffentlicher-raum/fussgaengerbruecke-in-oschatz-69960>>. Acesso em: 01 jun. 2018.



### 2.1.3 Reforço de estruturas existentes

O uso de têxteis para a realização de reparo, reforço e recuperação de estruturas não é novo. Porém, até então, os elementos estruturais danificados eram envelopados com têxteis e impregnados manualmente com resinas. Contudo, com o avanço da tecnologia do concreto têxtil, o uso de matrizes cimentícias projetadas, ao invés de resinas, é cada vez mais acessível, trazendo benefícios como a compatibilidade com o substrato de concreto das estruturas. O *retrofit* de alvenarias também pode ser realizado com o uso de concreto têxtil. (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

Nos últimos dez anos, inúmeros projetos de reparo, recuperação e reforço com concreto têxtil foram realizados em vários países europeus, nos Estados Unidos e, em menor número, no Brasil. Em geral, tecidos de fibra de carbono são os mais utilizados para estes fins, devido a sua capacidade de resistir a elevadas cargas. (BOURNAS, 2016).

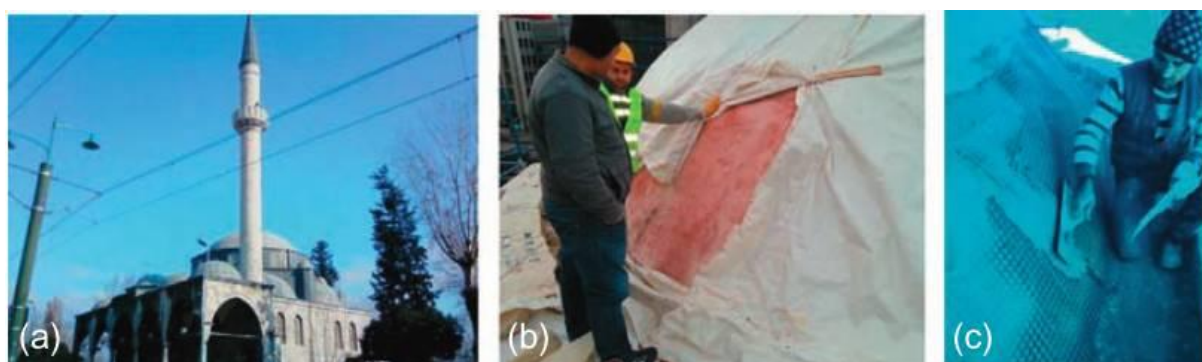
Alguns exemplos de edificações que foram reforçadas com concreto têxtil são: Estádio San Siro, em Milão, Itália (Figura 8); ponte em Novosibirsk, Rússia; túnel na Grécia; torre de refrigeração de usina atômica em Niederaussem, na Alemanha; Mesquita Molla Çelebi, na Turquia (Figura 9); dentre outras inúmeras construções. (BOURNAS, 2016).

Figura 8 – Reforço de vigas e pilares do Estádio San Siro, na Itália



Fonte: Bournas (2016, p. 390).

Figura 9 – Mesquita Molla Çelebi, na Turquia



Fonte: Bournas (2016, p. 408).

No Brasil, o caso mais famoso de utilização de concreto têxtil como reforço estrutural ocorreu no Estádio Maracanã, no Rio de Janeiro, em 2013. Durante reforma para a Copa do Mundo de 2014, 60 pilares (Figura 10) e 14000 m<sup>2</sup> de arquibancadas (Figura 11) tiveram que ser reforçados. Devido às cargas da nova cobertura do

estádio, em cada pilar foram ancoradas duas camadas de tecido de fibra de carbono, recebendo 10 mm de concreto projetado. Diante do curto prazo para a entrega do estádio para a competição, as arquibancadas receberam reforço têxtil, e não metálico, como previsto em projeto. A projeção inicial era de que 32 pessoas realizassem o serviço em 75 dias. Com a mudança para o reforço têxtil, apenas dois trabalhadores finalizaram o serviço em 22 dias (BOURNAS, 2016), evidenciando a possível otimização do processo e dos prazos.

Figura 10 – Reforço de pilares no Estádio Maracanã



Fonte: Bournas (2016, p. 401).

Figura 11 – Reforço das arquibancadas do Estádio Maracanã



Fonte: Bournas (2016, p. 401).

## 2.2 HISTÓRICO DE PESQUISAS

A utilização de fibras dispersas de diversos materiais em matrizes cimentícias já era uma técnica conhecida quando se iniciaram os estudos de têxteis como reforço de estruturas, nos anos 1990. A evolução do concreto têxtil se dá em três gerações. Na primeira delas, pouco se conhecia sobre a interação entre os tecidos e as matrizes. Porém, tinha-se noção da capacidade de carga que o compósito poderia oferecer. Em um segundo momento, as pesquisas se voltaram para a determinação de propriedades específicas de inúmeras combinações de matrizes e têxteis. Atualmente, o concreto têxtil encontra-se em sua terceira geração, onde estão sendo estudadas e desenvolvidas diversas estruturas de concreto têxtil. (JESSE et al., 2008 apud DENARDI, 2016).

Os principais centros de pesquisa do concreto têxtil se encontram na Alemanha, principalmente nas universidades RWTH Aachen e TU Dresden, e contam com o aporte financeiro do governo alemão. Em Dresden, o projeto *CRC 528 - Reforços têxteis para reforço e reparo estrutural* visa a desenvolver o uso do compósito tanto em estruturas novas como antigas. Lá, inicialmente, o foco foi em têxteis de fibra de carbono. Em paralelo, em Aachen, o projeto *CRC 532 - Concreto têxtil: Bases para o desenvolvimento de uma nova tecnologia* estuda os mecanismos básicos do compósito e desenvolve métodos de dimensionamento, aprofundando-se no emprego de têxteis de fibra de vidro AR. (SCHEERER; SCHLIDITZ; CURBACH, 2015).

Atualmente, na Alemanha, o setor privado investe no desenvolvimento do compósito, aliando-se às universidades. Assim, surgiram vários grupos e associações

que têm o objetivo de trocar experiências, difundir o conceito do CT e obter avanços comerciais. (SCHEERER; SCHLDITZ; CURBACH, 2015).

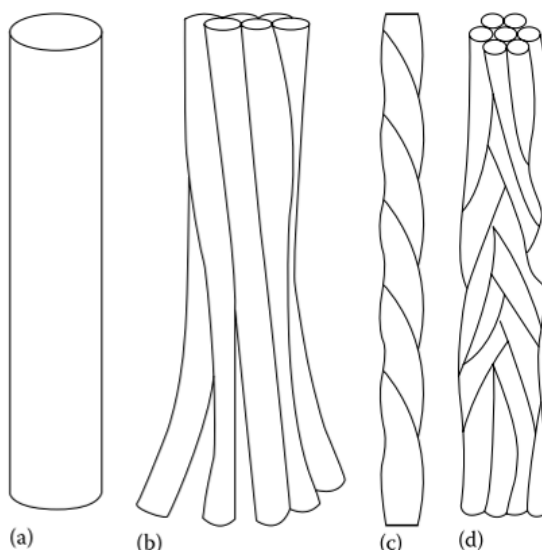
Em outros países, destacam-se os grupos de pesquisa da Inglaterra, mais especificamente da Universidade de Surrey, e em Israel, através da Universidade Ben-Gurion do Negev e do Instituto de Tecnologia Technion. (DENARDI, 2016). Em 2003, foi criado o Comitê Técnico RILEM 201-TRC, reunindo diversos pesquisadores do assunto. Através do comitê, foram publicados diversos documentos técnicos que servem de base para novas pesquisas.

Os primeiros livros sobre o concreto têxtil foram publicados recentemente. Em 2016, o livro *Textile Fibre Composites in Civil Engineering* foi editado por Thanasis Triantafillou, sendo que cada capítulo do livro é escrito por diferentes pesquisadores especialistas no respectivo tema. Em 2017, Alva Peled, Arnon Bentur e Barzin Mobasher, referências mundiais no assunto, lançaram o livro *Textile Reinforced Concrete*. (DENARDI, 2016).

### 2.3 REFORÇO TÊXTIL

O conjunto de fibras elementares forma os fios de filamentos, ou feixes. Um fio pode ser composto por milhares de filamentos longos e agrupados de diferentes maneiras. (GRIES; OFFERMANN; PELED, 2006; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017). A Figura 12 mostra fios de monofilamento (Figura 12a), multifilamento (Figura 12b), torcidos (Figura 12c) e torcidos agrupados (Figura 12d).

Figura 12 – Tipos de fios: (a) monofilamento, (b) multifilamento, (c) torcidos e (d) torcidos agrupados



Fonte: Peled, Bentur e Mobasher (2017, p. 39).

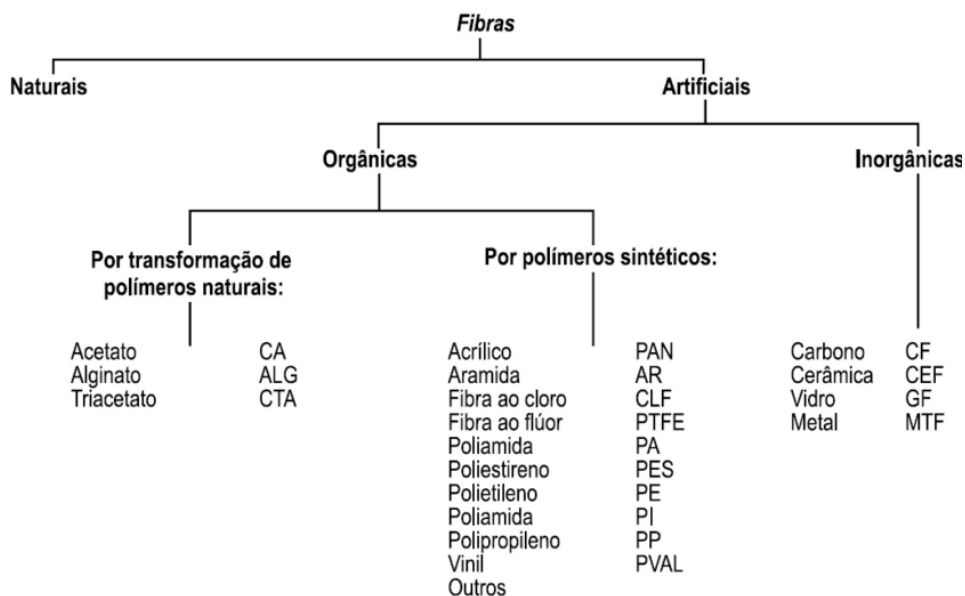
Segundo Gries, Offermann e Peled. (2006), a finura do feixe depende do número de filamentos, do diâmetro médio de cada filamento e da densidade da fibra. O tex é a unidade de medida dos feixes, sendo a massa total, em gramas, por quilômetro de feixe (g/km).

A ABNT NBR 12546:2017 define a nomenclatura dos elementos que compõem materiais têxteis. Destaca-se a terminologia do urdume e da trama, que são os conjuntos de feixes dispostos na direção longitudinal e transversal do tecido, respectivamente. (ABNT, 2017a).

### 2.3.1 Composição dos Têxteis

O comportamento do concreto têxtil está diretamente ligado às propriedades, quantidade e arranjo do material fibroso utilizado. (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017). Além de elevada tenacidade e alongamento, a eficiência de reforços têxteis é dada pelo seu módulo de elasticidade, muito superior ao da matriz cimentícia. O baixo relaxamento sob cargas permanentes, a adesão com a matriz, o baixo custo e simples processos de fabricação são outros requisitos para que os têxteis sejam viáveis. (GRIES; OFFERMANN; PELED, 2006). A Figura 13 apresenta alguns tipos de fibras, desde aquelas encontradas na natureza até aquelas não-naturais.

Figura 13 – Classificação das fibras



\* O polietileno e o polipropileno são poliolefinas

Fonte: Maccaferri (2009) apud Quinino (2015, p. 14).

As fibras que melhor atendem aos requisitos mencionados anteriormente são as fibras de vidro álcali-resistentes (AR), carbono e aramida (GRIES; OFFERMANN; PELED, 2006). A Tabela 1 mostra as propriedades mecânicas de diferentes tipos de fibras, inclusive as três citadas anteriormente.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de diferentes tipos de fibras

<b>Tipo de fibra</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Deformação última (%)</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Vidro (AR)	2500	70	3,6	2,78
Carbono	3500 - 6000	230 - 600	1,5 - 2,0	1,60 - 1,95
Aramida	3000	60 - 130	2,1 - 4,0	1,4
Polietileno	250	1,4 - 2,2	10 - 15	0,95
Polipropileno	140 - 690	3 - 5	25	0,90 - 0,95
PVA	880 - 1900	25 - 41	6 - 10	1,3
Basalto	3000 - 4840	79,3 - 93,1	3,1	2,7
Sisal	600 - 700	38	2 - 3	1,33
Metálica	1200	200	3 - 4	7,85

Fonte: Peled, Bentur e Mobasher (2017, p. 21).

### 2.3.1.1 Fibra de Vidro AR

As fibras de vidro álcali-resistente (AR) são projetadas especialmente para resistir à corrosão no meio alcalino do concreto, tendo mais de 15% de adição, em massa, de zircônio. De modo geral, este tipo de fibra possui tenacidade de até 1400 MPa, deformação elástica de 2%, módulo de elasticidade entre 70 e 80 kN/mm<sup>2</sup>. Dada a boa adesão com o concreto, as fibras de vidro AR apresentam boa relação custo-benefício. (GRIES; OFFERMANN; PELED, 2006). O Quadro 1 compara peso, diâmetro e número de filamentos de algumas fibras disponíveis comercialmente.

Quadro 1 – Fibras de vidro AR comerciais

<b>Fabricante</b>	<b>Produto</b>	<b>Peso [tex]</b>	<b>Diâmetro [µm]</b>	<b>Número de filamentos</b>
Nippon Electric Glass, Japão	AR310S-800/DB	310	13,5	800
	AR620S-800/TM	620	13,5	1600
	AR1100S-800/TM	1100	16	2000
	AR2500S-800/DB	2500	24	2000
Saint-Gobain Vetrotex, Espanha	LTR ARC 320 5325	320	14	800
	LTR ARC 640 5325	640	14	1600
	LTR ARC 1200 5325	1200	19	1600
	LTR ARC 2400 5325	2400	27	1600

Fonte: Adaptado de Gries, Offermann e Peled (2006, p.14).

### 2.3.1.2 Fibra de Carbono

De acordo com Gries, Offermann e Peled (2006), as fibras de carbono possuem baixa densidade, de cerca de 1,8 kg/dm<sup>3</sup>, resistência às vibrações, boa condutividade elétrica e resistência a ambientes ácidos e alcalinos. Destacam-se, também, os altíssimos valores de resistência à tração, módulo de elasticidade e tenacidade, que são de até 4500 MPa, 450 kN/mm<sup>2</sup> e 2000 MPa, respectivamente. O Quadro 2 mostra algumas fibras de carbono comerciais disponíveis, com mesmo diâmetro e diferente número de filamentos.



Quadro 2 – Fibras de carbono comerciais

<b>Fabricante</b>	<b>Produto</b>	<b>Peso [tex]</b>	<b>Diâmetro [µm]</b>	<b>Número de filamentos</b>
Tenax Fibres GmbH	HTA 5131	400	7	6000
	HTS 5631	800	7	12000
	STS 5631	1600	7	24000
Toray Industries	T300J-3000	198	7	3000
	T300JB-6000	396	7	6000

Fonte: Adaptado de Gries, Offermann e Peled (2006, p.15).

Outrora, os mesmos autores citam algumas desvantagens que as fibras de carbono apresentam: menor eficácia na adesão às matrizes cimentícias quando comparadas às fibras de vidro AR; alto custo de produção; alta sensibilidade, sendo suscetível a deteriorações.

### 2.3.1.3 Fibra de Aramida

As fibras de aramida são largamente utilizadas para a fabricação de isolantes para cabos elétricos e acessórios de proteção, como capacetes, roupas especiais e cintos de segurança. Possuem ótima resistência à tração e alto módulo de elasticidade, podendo chegar a 130 kN/mm<sup>2</sup>. Além disso, a sua baixa densidade, de cerca de kg/dm<sup>3</sup>, a baixa fragilidade e a alta resistência a impactos são características consideradas superiores se comparadas com fibras de vidro e carbono. (GRIES; OFFERMANN; PELED, 2006). O Quadro 3 apresenta fibras de aramida comercializadas.

Quadro 3 – Fibras de aramida comerciais

<b>Fabricante</b>	<b>Produto</b>	<b>Peso [tex]</b>	<b>Diâmetro [µm]</b>	<b>Número de filamentos</b>
Teijin Twaron BV	Technora T-240	167	12	1000
	Technora T-241J	167	12	1000
	Twaron T3200	322	12	2000
	Twaron 2520	2520	12	-

Fonte: Adaptado de Gries, Offermann e Peled (2006, p.16).

Entretanto, os autores afirmam que a principal desvantagem da fibra de aramida é a sua expansão quando sofre ações de calor, provocando tensões na interface com a matriz cimentícia. De tal forma, a adesão entre os dois materiais é prejudicada. Outro ponto negativo é a baixa resistência a ambientes alcalinos, como o concreto. (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

### **2.3.2 Têxteis Bidimensionais (2D)**

Têxteis planos, ou seja, bidimensionais, têm os fios dispostos no plano e são capazes de sustentar cargas em uma ou mais direções. A vantagem de se utilizar têxteis para o reforço de compósitos é a possibilidade de controlar suas diferentes propriedades, tais como a estrutura, o arranjo e a adesão de seus elementos. (GRIES et al., 2016).

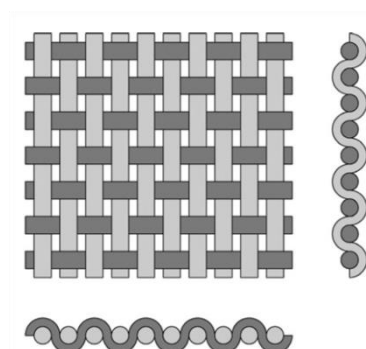
Dependendo da forma como os fios são combinados, podem ser produzidos tecidos com geometrias variadas. O método de junção dos fios resulta em tecidos com diferentes geometrias, aberturas e propriedades. Além do método de fabricação e da geometria dos têxteis, a orientação dos fios também deve ser levada em conta quando a finalidade é o reforço de materiais compósitos, pois eles devem transferir a carga aplicada ao longo de seu comprimento com eficiência. (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

Segundo os mesmos autores, a penetração da pasta de cimento nas aberturas do tecido e nas áreas entre os filamentos é essencial para que se tenha boa adesão entre a matriz e os filamentos. O tamanho da abertura das grades de um tecido deve permitir a penetração das partículas de cimento, com dimensão média de 10  $\mu\text{m}$  e agregado fino de no máximo 1 mm nos vazios presentes entre os fios.

#### **2.3.2.1 Tecidos Transpassados 2D**

Na produção de tecidos transpassados, os fios são entrelaçados perpendicularmente entre si, como mostra a Figura 14. Conforme já citado, o conjunto de fios longitudinais do tecido é chamado de fios de urdume, enquanto os transversais são os fios de trama. Devido à alta densidade dos tecidos transpassados, estes não podem ter formato de malha. (GRIES et al., 2016; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

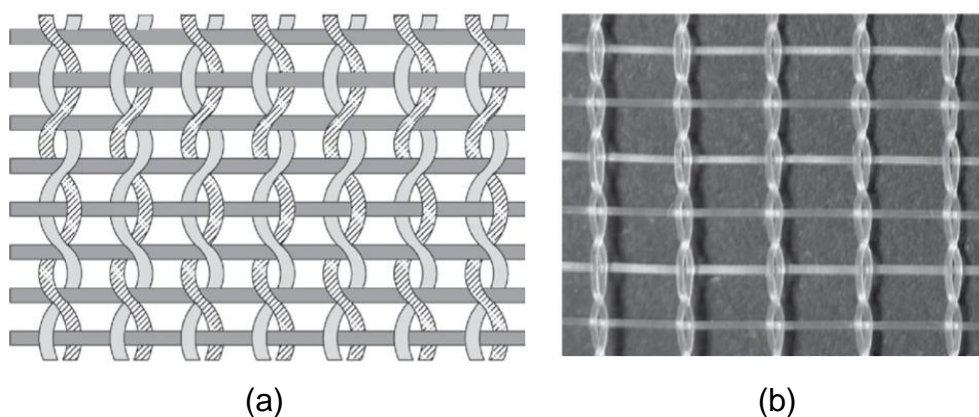
Figura 14 – Tecido transpassado



Fonte: Peled, Bentur e Mobasher (2017, p. 41).

Contudo, de acordo com os mesmos autores, existe um tipo especial de tecido transpassado, o tecido leno, também chamado de giro-ínglês, ilustrado na Figura 15. Neste caso, dois fios de urdume são torcidos ao redor dos fios de trama, gerando ligações travadas entre si. Os tecidos produzidos com a técnica de tecelagem leno são mais resistentes, leves e permitem estruturas de malha, ideais para compósitos a base de cimento.

Figura 15 – Tecido transpassado do tipo leno: (a) esquema e (b) ilustração

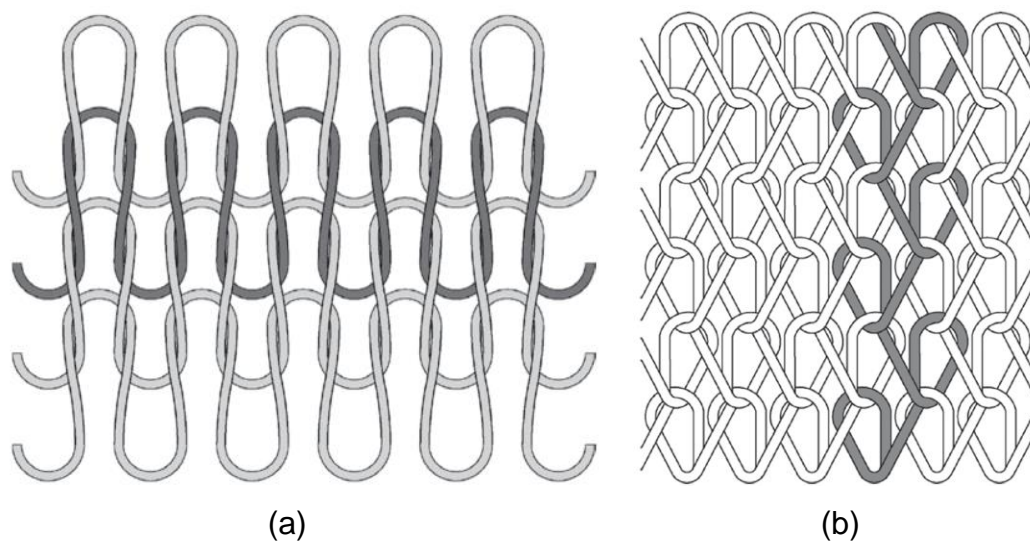


Fonte: Adaptado de Peled, Bentur e Mobasher (2017, p. 42).

### 2.3.2.2 Tecidos Tricotados 2D

Os tecidos tricotados são produzidos com um jogo de agulhas, formando os laços. Existem dois tipos de tecidos tricotados: tricô de trama (Figura 16a) e tricô de urdume (Figura 16b). (GRIES et al., 2016; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

Figura 16 – Tecido tricotado de (a) trama e (b) urdume



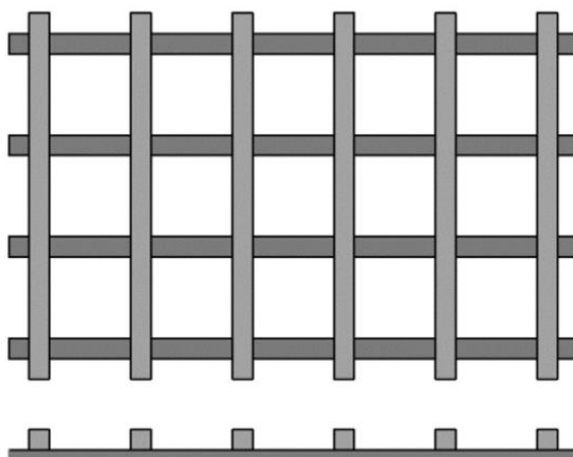
Fonte: Adaptado de Peled, Bentur e Mobasher (2017, p. 43).

O tricô de trama é pouco utilizado como reforço estrutural, pois possui baixa estabilidade dimensional. Já o tricô de urdume possui maior estabilidade dimensional, devido à conexão mais rígida dos laços, permitindo que o tecido tenha estrutura de malha. (GRIES et al., 2016; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

### 2.3.2.3 Tecidos Colados 2D

Nesse tipo de malha, os urdumes e tramas são colados perpendicularmente entre si, como mostra a Figura 17, fornecendo forte ligação entre os fios. Por isso, tecidos com este tipo de técnica de fabricação permitem estruturas de malha com diferentes aberturas. (GRIES et al., 2016; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

Figura 17 – Tecidos colados



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

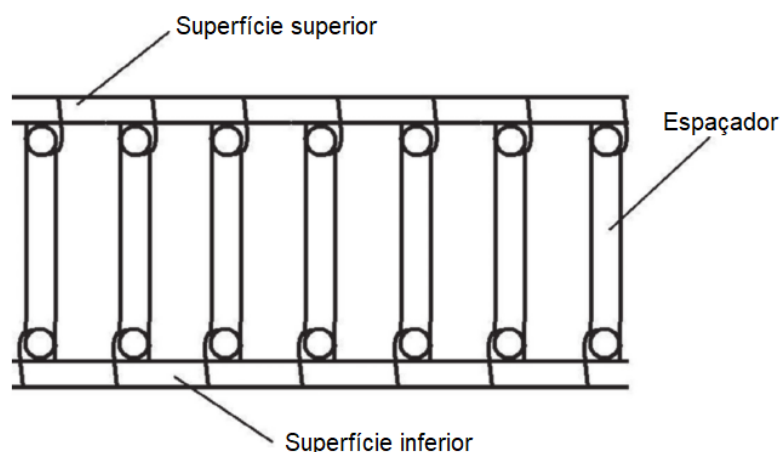
### 2.3.3 Têxteis Tridimensionais (3D)

O desenvolvimento de estruturas têxteis 3D vem se destacando nos últimos anos na indústria têxtil, proporcionando têxteis com propriedades únicas ao se comparar com têxteis planos. Os fios podem ser posicionados em três direções ortogonais, inclusive na direção da espessura das peças de concreto têxtil. As principais tecnologias de tecelagem, inclusive aquelas para a fabricação de têxteis planos, são adequadas para a produção de estruturas têxteis tridimensionais. Todavia, os tecidos tricotados são os mais utilizados no concreto têxtil (GRIES et al., 2016; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

#### 2.3.3.1 Tecidos Tricotados 3D

Estruturas tricotadas tridimensionais são produzidas tanto com tricô de urdume quanto com o de trama. A estrutura é basicamente composta por duas camadas de tecidos planos, localizados nas superfícies inferior e superior, conectados por fios espaçadores, como indica a Figura 18 (GRIES et al., 2016).

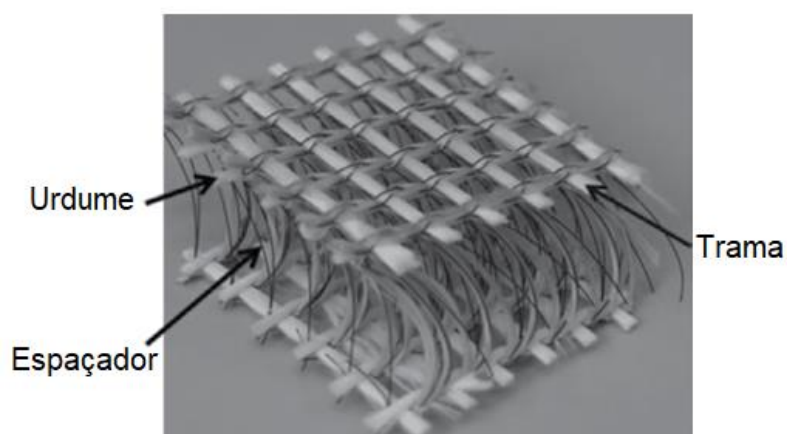
Figura 18 – Componentes do tecido tricotado tridimensional



Fonte: Adaptado de Gries et al. (2016, p. 18).

A estrutura dos tecidos espaciais pode ser aberta, fechada ou na forma de malha. As malhas podem ter inúmeras dimensões, dependendo da distância entre os fios que conectam as camadas superior e inferior. A altura destes conectores pode chegar até 60 mm (RAZ, 2000). Portanto, a espessura dos tecidos 3D pode ser dimensionada de acordo com a geometria da peça de concreto têxtil desejada (GRIES et al., 2016). Um exemplo de tecido tricotado tridimensional é apresentado na Figura 19, na qual podem ser visualizados os fios espaçadores, de urdume e de trama.

Figura 19 – Tecido tricotado tridimensional



Fonte: Peled, Bentur e Mobasher (2017, p. 59).

## 2.4 MATRIZ CIMENTÍCIA

Para promover boa aderência com o reforço têxtil e durabilidade do composto, as matrizes usadas no concreto têxtil devem atender às demandas de cada aplicação, tais como o tipo de material, geometria e compatibilidade química do reforço, a forma do elemento de CT, a consistência desejada e o processo de produção a ser utilizado. Em alguns casos, também é desejada resistência ao congelamento e descongelamento e baixos valores de fluência e retração. (BRAMESHUBER; BROCKMANN, 2006; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

Em função da dimensão máxima dos agregados ser inferior a 2 mm, a matriz pode ser considerada uma argamassa. Assim, as matrizes de concreto têxtil também podem ser chamadas de concreto de grãos finos. (BRAMESHUBER; BROCKMANN, 2006). A necessidade de agregados de pequenas dimensões se dá devido à abertura das malhas e a distância entre as diferentes camadas de reforço têxtil. (MECHTCHERINE; SCHNEIDER; BRAMESHUBER, 2016). A reologia do composto é essencial para garantir penetração total da matriz nas aberturas dos tecidos, promovendo boa adesão e capacidade de carga eficiente. (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

O avanço da indústria têxtil no desenvolvimento de novos tecidos, com maior abertura de malha e capacidade de carga, faz com que as matrizes possam vir a ter agregados com dimensões maiores, assemelhando-as ao concreto convencional. (MECHTCHERINE; SCHNEIDER; BRAMESHUBER, 2016). Comparado ao concreto com agregados graúdos, o concreto com finos apresenta, geralmente, maiores deformações e menor rigidez. (BRAMESHUBER; BROCKMANN, 2006).

### 2.4.1 Critérios de Dosagem

A dosagem das matrizes consiste na escolha e proporção dos materiais constituintes, que são os agregados finos, aditivos e adições minerais, tais como cinza volante, sílica ativa e metacaulim. Já em alguns casos, a adição de fibras curtas visa a melhorar o reforço a nível micro. (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017). De modo geral, os concretos utilizados na produção do CT possuem relação água/aglomerante (a/agl) em torno de 0,3 a 0,4, com teor de aglomerantes entre 40% e 50% do volume de materiais. A alta taxa de materiais aglomerantes é necessária para que ocorra

adesão entre a matriz e os filamentos do reforço têxtil e boa trabalhabilidade do concreto em estado fresco. Aditivos plastificantes e superplastificantes, entre outros, também são incorporados às matrizes, geralmente em teores que variam de 0,5% a 2,5% da massa de materiais aglomerantes. (MECHTCHERINE; SCHNEIDER; BRAMESHUBER, 2016).

Outro parâmetro importante na dosagem da matriz é a fluidez em estado fresco, que deve ser ajustada dependendo da geometria do têxtil utilizado e o do processo de produção. Em compósitos com densa taxa de reforço têxtil, necessita-se de uma matriz fluida. (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017). Já aplicações específicas demandam propriedades especiais. Por exemplo, a produção de painéis pré-fabricados em larga escala exige um concreto fluido e autonivelante, penetrando em várias camadas de têxteis com malhas de pequena abertura e que tenha a capacidade de envelopar os fios do reforço. Por questões estéticas, painéis de fachada também necessitam de cuidados com a compactação e cura do compósito. (MECHTCHERINE; SCHNEIDER; BRAMESHUBER, 2016).

Brockmann e Brameshuber (2006) apresentam diferentes matrizes cimentícias em seu estudo, em que se destacam as duas composições apresentadas no Quadro 4. Ambas apresentam elevada consistência no estado fresco e alta resistência à compressão aos 28 dias.



Quadro 4 – Composições e propriedades de matrizes já estudadas

		Matriz	
		PZ-0899-01	RP-03-2E
Material	Unidade	Quantidade	
Cimento	kg/m <sup>3</sup>	490	980
Cinza volante		175	210
Sílica ativa		35	210
Areia		1214	286
Água/cimento	-	0,57	0,36
Água/aglomerante	-	0,47	0,27
Superplastificante	% aglomerante	1,00	2,45
Propriedade	Unidade	Resultados	
Consistência	mm	340	310
Resistência à compressão	MPa	74,2	117,7
Módulo de elasticidade	GPa	33	29,5
Resistência à tração na flexão	MPa	7,6	8,1

Fonte: Adaptado de Brockmann e Brameshuber (2006, p. 68).

#### 2.4.2 Alcalinidade da Matriz

O alto valor do potencial hidrogeniônico (pH) do concreto é essencial para a proteção das barras de aço no concreto armado. Já em relação ao concreto têxtil, o meio alcalino é muito agressivo a algumas fibras, como as de vidro ou basalto. (BUTLER; MECHTCHERINE; HEMPEL, 2010). Um dos desafios dos pesquisadores deste compósito é reduzir o consumo de cimento Portland, visando à diminuição do valor de pH sem comprometer as propriedades mecânicas e a durabilidade do CT. (MECHTCHERINE; SCHNEIDER; BRAMESHUBER, 2016).

Com vistas à durabilidade, deve-se considerar a estabilidade química dos tecidos expostos ao ambiente alcalino da matriz. O desenvolvimento de matrizes com pH neutro possibilita o uso de fibras sensíveis a meios alcalinos e de menor custo, como a fibra de vidro e fibras naturais, expandindo o apelo sustentável do concreto têxtil. (MECHTCHERINE; SCHNEIDER; BRAMESHUBER, 2016; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

### 2.4.3 Adições Minerais

A redução do pH de matrizes cimentícias em função de reações pozolânicas é benéfica para a durabilidade de reforços não-metálicos. Assim sendo, o teor de pozolanas pode ser muito superior nas matrizes de CT em relação ao concreto armado. (MECHTCHERINE; SCHNEIDER; BRAMESHUBER, 2016). As principais adições pozolânicas utilizadas em matrizes do concreto têxtil são a sílica ativa, cinza volante e metacaulim. (BRAMESHUBER; BROCKMANN, 2006; MECHTCHERINE; SCHNEIDER; BRAMESHUBER, 2016; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

#### 2.4.3.1 Sílica Ativa

Sílica ativa é uma pozolana com partículas muito pequenas, cerca de 100 vezes menor que as partículas de cimento, o que faz com que as matrizes tenham um melhor empacotamento. Devido a sua maior densidade, matrizes com sílica ativa possuem maior resistência mecânica e resistência ao ataque químico. (MAMLOUK; ZANIEWSKI, 2014). Segundo Brameshuber e Brockmann (2006), o uso de sílica ativa reduz a concentração de íons álcali, o que favorece a durabilidade do reforço têxtil.

Além disso, a densa microestrutura que a sílica ativa confere à matriz beneficia a adesão do reforço têxtil, inclusive em idades avançadas. A grande área superficial específica da sílica ativa, de aproximadamente 15 a 35 m<sup>2</sup>/g, impacta na demanda de água e, conseqüentemente, na trabalhabilidade da matriz. Contudo, devido ao efeito microfíler da sílica ativa, a adição de até 5% em relação à massa de cimento diminui a relação água/aglomerante. (MECHTCHERINE; SCHNEIDER; BRAMESHUBER, 2016).

#### 2.4.3.2 Cinza Volante

Cinzas volantes oriundas de usinas de combustão de carvão têm partículas com dimensões similares ao cimento, entre 15 e 20 µm. A substituição de parte do cimento por cinza volante melhora a trabalhabilidade da matriz, devido à baixa demanda de água deste material. A cinza volante aumenta a resistência mecânica e a resistência ao ataque químico em idades avançadas, porém tem efeito retardador no ganho de resistência em baixas idades. (MAMLOUK e ZANIEWSKI, 2014).

Alguns estudos indicam que compósitos com teor de 60% de cinza volante apresentam os melhores resultados. Isso se deve pela melhor trabalhabilidade da matriz e, conseqüentemente, uma penetração eficiente nas aberturas do reforço têxtil. (MOBASHER et al., 2011; PELED; MOBASHER, 2016).

#### 2.4.3.3 Metacaulim

De acordo com Peled, Bentur e Mobasher (2017), a combinação de metacaulim e cinza volante, em teores adequados, proporciona um bom comportamento a longo prazo e não afeta o desempenho mecânico do compósito. Para Siddique e Klaus (2009), a adição de metacaulim na matriz tem efeitos semelhantes à adição de sílica ativa, resultando em estruturas mais densas e com maior durabilidade e menor permeabilidade, além de reduzir o pH.

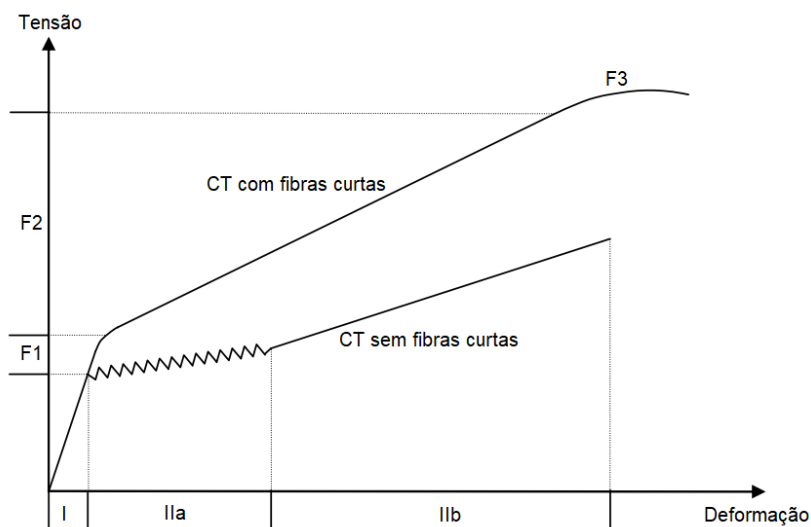
#### 2.4.4 Adição de Fibras Curtas Dispersas

O uso de fibras curtas eleva a carga em que ocorrem as primeiras fissuras e, juntamente com o reforço têxtil, aumenta a capacidade de carga final do compósito. (MECHTCHERINE; SCHNEIDER; BRAMESHUBER, 2016; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017). Conforme Peled, Bentur e Mobasher (2017), os seguintes fatores explicam a melhora do comportamento mecânico do CT com a adição de fibras curtas dispersas:

- ligação das microfissuras, inibindo o crescimento e a propagação das mesmas;
- restrição da retração da matriz;
- aumento da taxa de reforço, em conjunto com o tecido;
- melhora da aderência entre o reforço têxtil e a matriz cimentícia.

Estudos de Hinzen e Bramashuber (2009) explicam o comportamento de elementos de concreto têxtil com a adição de fibras curtas à matriz. Como mostra a Figura 20, a região F1 indica que a primeira fissura de elementos com fibras curtas ocorre em tensões mais elevadas. Ainda, em F2, a propagação de fissuras acontece de maneira mais suave. Já a região F3 evidencia o maior suporte de carga em relação aos compósitos convencionais.

Figura 20 – Comportamento do concreto t\xeatil com a adi\c3o\c3o de fibras curtas



Fonte: Adaptado de Gries et al. (2016, p. 18).

De modo geral, a adi\c3o\c3o de fibras curtas ao CT pode produzir um comp\xf3sito com melhor propaga\c3o\c3o das fissuras, durabilidade e vida \u00fatil. Contudo, resulta em um maior n\xfamero de fissuras, por\xeam menos espessas e com um denso padr\xe3o, se comparadas aos comp\xf3sitos sem fibras curtas. (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017). Ainda, as fibras curtas podem ocasionar perda de trabalhabilidade. (MECHTCHERINE; SCHNEIDER; BRAMESHUBER, 2016).

## 2.5 PROPRIEDADES

Elementos de concreto t\xeatil s\xe3o apropriados para aplica\c3o\c3es que necessitam de alta absor\c3o\c3o de energia e alta capacidade de deforma\c3o\c3o, fadiga e resist\xancia ao impacto. Assim, o comportamento mec\xeanico de sistemas com tais caracter\xedsticas deve ir al\xeam do regime el\xe1stico. O surgimento de m\xaltiplas fissuras sob esfor\c3o\c3s de tra\c3o\c3o \xe9 o mecanismo que permite o suporte de altas tens\xf5es de tra\c3o\c3o em altas deforma\c3o\c3es. (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

De acordo com Mobasher (2016), ensaios mec\xeanicos s\xe3o necess\xe1rios para se entender o comportamento do comp\xf3sito, sendo a curva tens\xe3o vs deforma\c3o\c3o a principal fonte para interpreta\c3o\c3o das suas propriedades. O autor tamb\xeam diz que a m\xe1xima resist\xancia que o comp\xf3sito suporta n\xe3o \xe9 o \u00fanico par\xe2metro analisado. A distribui\c3o\c3o e o espa\c3a\c3amento das fissuras s\xe3o outros par\xe2metros importantes. Com

isso, é possível abastecer modelos de cálculo com as propriedades obtidas e projetar estruturas de concreto têxtil.

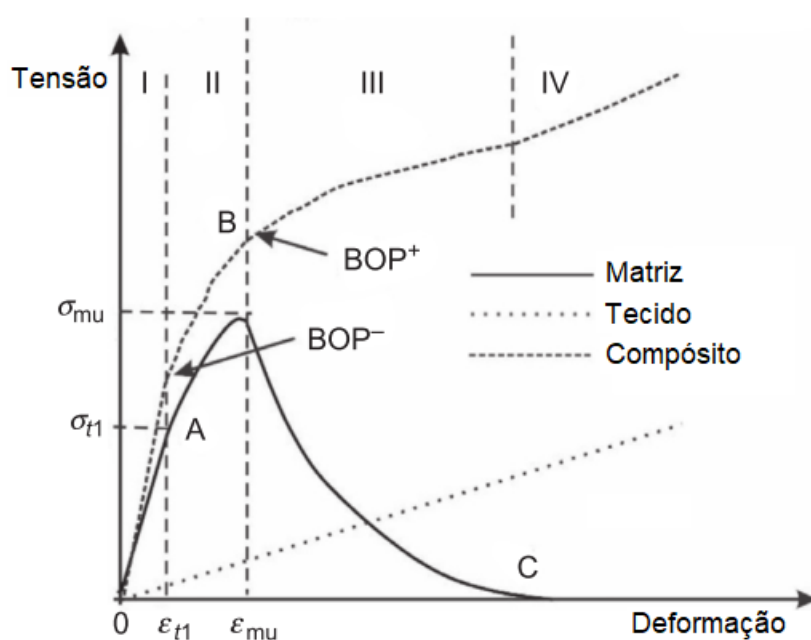
Segundo Peled, Bentur e Mobasher (2017), a distribuição de fissuras ao longo de elementos de CT dá-se pelo ancoramento das fibras na matriz. Para que uma fissura já existente se estenda, é necessária grande quantidade de energia. Assim, antes que isso ocorra, surgem fissuras secundárias paralelas à primeira.

Zargaran (2013), em seu estudo, constatou que o número de camadas de reforço e a abertura da malha influenciam no desempenho do concreto têxtil. Ao comparar peças reforçadas com têxteis de abertura 5x5 mm e 10x10 mm, variando o número de camadas de reforço, verificou que o suporte de tensões é maior nas malhas de menor abertura e com mais camadas de reforço.

### 2.5.1 Típica Curva Tensão vs Deformação

A curva tensão vs deformação é obtida através de ensaios de tração em amostras de concreto têxtil, de onde podem ser extraídos dados como rigidez inicial, tensões, deformações, rigidez posterior à fissuração, capacidade última de carga e distância entre fissuras. (MOBASHER, 2016). A Figura 21 apresenta o comportamento típico do compósito.

Figura 21 – Típica curva tensão vs deformação de elementos de CT



Fonte: Adaptado de Mobasher (2016, p. 101).

A Zona I corresponde ao regime elástico, onde a matriz e o reforço têxtil têm comportamento linear, e se estende até a formação da primeira fissura na matriz, definida pelo ponto A, onde encontra-se a tensão  $\sigma_{t1}$  e a deformação  $\epsilon_{t1}$ . Em relação ao compósito, este ponto é chamado de ponto de inflexão BOP- (do termo em inglês *bend-over point*). A partir daí, o compósito passa a ter comportamento não-linear. (MOBASHER, 2016; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

A Zona II é caracterizada pela microfissuração da matriz. Contudo, nesta etapa, nenhuma fissura atravessa por completo a espessura da amostra de CT. O final da Zona II acontece quando a primeira fissura se propaga pela seção transversal do elemento, sendo definido pelo ponto BOP+. Portanto, a Zona II é compreendida pela região entre os pontos BOP- e BOP+. O ponto B indica que foi atingido o limite de resistência e deformação da matriz,  $\sigma_{mu}$  e  $\epsilon_{mu}$ , respectivamente. (MOBASHER, 2016; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

A partir do ponto BOP+, ocorre uma mudança na rigidez do compósito e inicia-se a Zona III. Nesta fase, surgem fissuras distribuídas de forma uniforme. O compósito ainda possui capacidade de suportar carga devido à ancoragem do reforço têxtil na matriz. (MOBASHER, 2016; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

Por fim, a Zona IV é definida como a fase em que ocorrem danos progressivos, com o aumento da espessura das fissuras já existentes, porém sem a formação de novas aberturas. Assim, ainda há algum suporte de tensões. Entretanto, nesta etapa também acontece a perda de aderência entre matriz e o reforço têxtil. Portanto, em um determinado momento, o elemento de CT atinge o limite da sua capacidade de suportar cargas e, por consequência, tem-se a ruptura do elemento. (MOBASHER, 2016; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

Colombo et al. (2013) avaliaram, em seu estudo, uma série de variáveis que influenciam no comportamento à tração do concreto têxtil reforçado com fibra de vidro AR. O Quadro 5 destaca a influência do número de camadas na resistência à tração direta. A inserção de 2 camadas de reforço dobra a resistência máxima do compósito estudado por eles.

Quadro 5 – Influência do número de camadas na resistência à tração

Tipo de fibra de vidro AR	Malha	Número de camadas	Resistência à tração (MPa)
640 tex	4,4 x 5,0 mm	1	8,02
		2	17,88
1200 tex	4,9 x 7,1	1	11,36
		2	24,42

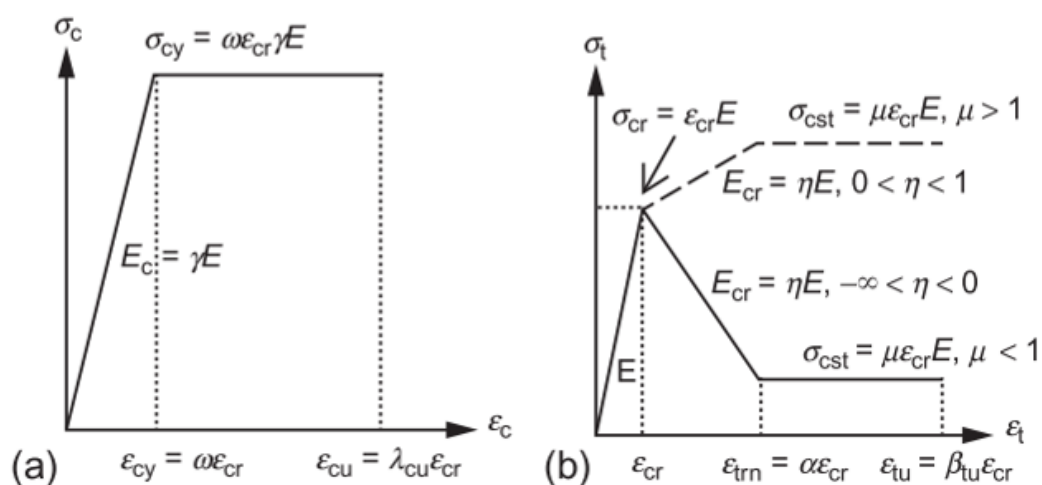
Fonte: Adaptado de Colombo et al. (2013, p. 1962).

### 2.5.2 Flexão

De acordo com Mobasher (2016) e Peled, Bentur e Mobasher (2017), a resistência à compressão é superior à resistência à tração. Logo, a capacidade de flexão do CT é guiada pela zona tracionada do elemento.

Os principais parâmetros envolvidos na resistência à tração na flexão, identificados na Figura 22b, são rigidez ( $E$ ), deformação e tensão na primeira fissura ( $\epsilon_{cr}$  e  $\sigma_{cr}=E\epsilon_{cr}$ , respectivamente), módulo de elasticidade após fissuração ( $E_{cr}$ ), resistência à tração constante ( $\sigma_{cst}=\mu E\epsilon_{cr}$ ) e deformação à tração última ( $\epsilon_{tu}$ ). Já em relação à zona comprimida, como mostra a Figura 22a, o fim do comportamento linear é dado pelos pontos  $\epsilon_{cy}$  e  $\sigma_{cy}$ , onde se inicia uma fase de resistência à compressão constante ( $\sigma_{cy}=\omega\gamma E\epsilon_{cr}$ ) até o momento de deformação à compressão última ( $\epsilon_{cu}$ ). (MOBASHER, 2016; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017). A relação entre o módulo de elasticidade à tração e o módulo de elasticidade à compressão é o parâmetro definido por  $\gamma$ . (NAAMAN et al., 1992 apud MOBASHER, 2016).

Figura 22 – Comportamento à flexão: zonas (a) comprimida e (b) tracionada



Fonte: Naaman et al. (1991) apud Mobasher (2016, p. 123).

A deformação das fibras tracionadas e comprimidas das extremidades inferior e superior são nomeadas  $\beta$  e  $\lambda$ , respectivamente. Soranakom e Mobasher (2008) assumem três estágios de deformação à tração ( $\beta$ ): Estágio 1 ( $0 \leq \beta \leq 1$ ), Estágio 2 ( $1 < \beta \leq \alpha$ ) e Estágio 3 ( $\alpha < \beta \leq \beta_{tu}$ ). O Estágio 1 representa o regime elástico. O Estágio 2.1 representa o estado de fissuração à tração e elasticidade à compressão. Já em 2.2, situa-se a fissuração à tração e a plasticidade à compressão. O Estágio 3 representa a fase em que não há mais fissuração, podendo ter as tensões suavizadas (3.1) ou compressão plástica (3.2). Os autores ressaltam que um elemento de CT não passa necessariamente por todos os estágios citados.

Através da análise de diversos estudos, Mobasher (2016) apresenta um resumo com parâmetros verificados experimentalmente por ele e outros pesquisadores, possibilitando o uso desses dados para a simulação de elementos de CT. A Tabela 2 mostra tais parâmetros para peças reforçadas com têxteis de polietileno, vidro e carbono.



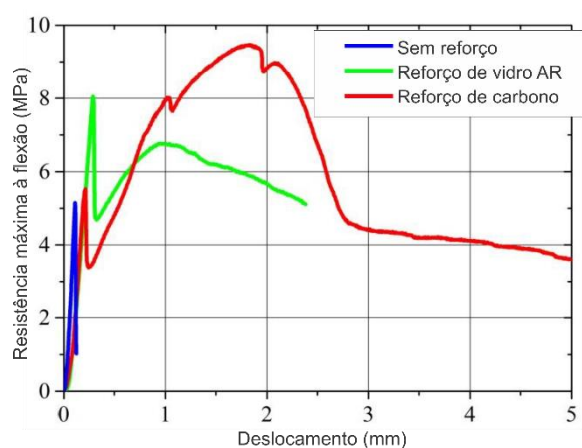
Tabela 2 – Parâmetros verificados experimentalmente

Reforço têxtil	E (MPa)	$\epsilon_{cr}$ ( $\mu\text{str}$ )	$\alpha$	$\gamma$	H	$\mu$	$\beta_{tu}$
Polietileno (PE)	1500	2900	12	1	0,070	0,80	14
Vidro AR	24000	330	19	1	0,019	0,16	20
Carbono	31000	111	58	1	0,058	0,90	58

Fonte: Adaptado de Mobasher (2016, p. 128).

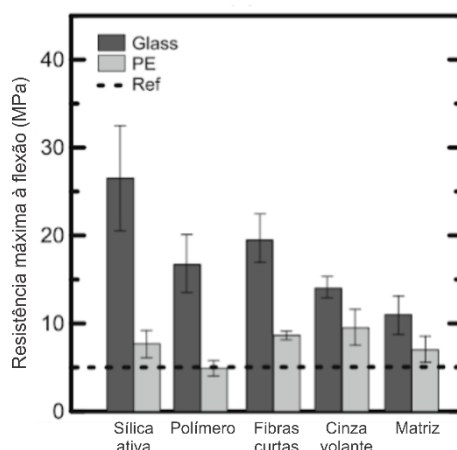
Outros pesquisadores como Volkova et al. (2016) e Tsesarsky et al. (2015) apud Peled, Bentur e Mobasher (2017) apresentam os resultados verificados experimentalmente em compósitos com diferentes reforços, os quais estão apresentados na Figura 23 e na Figura 24, respectivamente.

Figura 23 – Resistência à flexão de compósitos reforçados com vidro AR e carbono



Fonte: Adaptado de Volkova et al. (2016, p. 5).

Figura 24 – Resistência à flexão de matrizes de diferentes composições



Fonte: Adaptado de Tsesarsky et al. (2015 apud Mechtcherine; Schneider; Brameshuber, 2016, p. 353).

## 2.6 DURABILIDADE

Por se tratar de um material relativamente novo, o concreto têxtil ainda carece de fatos reais e comprovados acerca de sua durabilidade em longos períodos. Contudo, estudos com ensaios acelerados indicam boa performance. (REINHARDT et al., 2006; BUTLER; MECHTCHERINE; HEMPEL, 2010; MECHTCHERINE; SCHNEIDER; BRAMESHUBER, 2016; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017). Para Peled, Bentur e Mobasher (2017), outros fatores também levam a crer em boa resposta do compósito ao longo do tempo:

- relativa baixa relação água/cimento, geralmente entre 0,4 e 0,45;
- uso de adições minerais, conhecidas por melhorar a durabilidade através da redução da permeabilidade e melhor empacotamento da matriz cimentícia;
- fissuração controlada e de pequena espessura, muito menores do que as fissuras que costumam ocorrer no concreto armado.

Pode-se acrescentar, ainda, o fato de não haver corrosão no elemento responsável pela resistência à tração, em comparação aos materiais convencionais.

Em ambientes de agressividade baixa e média, o CT é considerado um compósito durável. Entretanto, a performance ao longo dos anos em ambientes de alta agressividade deve ser um fator considerado. Assim, a perda de resistência e

tenacidade do compósito deve-se a dois mecanismos: o ataque químico e o microestrutural. (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

Em relação ao ataque químico, segundo os mesmos autores, destaca-se o meio alcalino que as matrizes cimentícias apresentam, com valores de pH de até 13,5. Nesta condição, os têxteis são suscetíveis ao ataque químico. No caso da fibra de vidro, ocorre a quebra das ligações entre silício e oxigênio, formando defeitos na superfície do material e reduzindo a resistência da mesma.

Como alternativa às fibras de vidro ordinárias (também chamadas de vidro E), são utilizadas fibras de vidro AR, ou seja, álcali resistentes. Estas possuem adição de dióxido de zircônio ( $ZrO_2$ ) à sua composição, produzindo têxteis estáveis em ambientes alcalinos. Ainda que as propriedades mecânicas destes dois tipos de fibra de vidro sejam similares, as do tipo AR possuem custo mais elevado. (MECHTCHERINE; SCHNEIDER; BRAMESHUBER, 2016).

Embora sejam álcali resistentes, as fibras de vidro AR comerciais não são completamente imunes ao ataque químico. Estas fibras podem sofrer perdas de até 10% de sua resistência por até 3 anos e, então, permanecem estabilizadas por, no mínimo, 10 anos. (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

Já o mecanismo de deterioração microestrutural, que ocorre na interface entre a matriz e o reforço têxtil ao longo dos anos, em um ambiente úmido, é o crescimento de produtos de hidratação do cimento nos espaços entre os filamentos, que são vazios relativamente grandes nos primeiros meses de idade do compósito. (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

Os mesmos autores relacionam os estudos da durabilidade do CT de fibra de vidro AR com os estudos de durabilidade do GRC, onde as fibras de vidro são dispersas, e não arrançadas. Por se tratar de compósitos constituídos dos mesmos materiais, algumas propriedades são assumidas como similares. O Quadro 6 mostra, qualitativamente, o efeito que os mecanismos de ataque químico e microestrutural têm sobre as propriedades mecânicas do GRC, formados por fibras de vidro do tipo E e AR, ao longo dos anos. Através dela, percebe-se a baixa vida útil de fibras de vidro do tipo E.

Quadro 6 – Efeito dos mecanismos de envelhecimento

Tipo de fibra	Período	Efeito do mecanismo de envelhecimento na redução das propriedades mecânicas	
		Degradação química	Crescimento de produtos de hidratação
Vidro E	Curto (< 1 ano)	Muito efetivo	Pouco efetivo
Vidro AR	Curto (< 1 ano)	Não efetivo	Não efetivo
	Médio (5 - 40 anos)	Pouco efetivo	Muito efetivo
	Longo (30 - 50)	Efetivo	Muito efetivo

Fonte: Adaptado de Bentur e Mindness (2007 apud Peled, Bentur e Mobasher, 2017, p. 403).

## 2.7 MÉTODOS DE ANÁLISE

O Quadro 7 apresenta formas de avaliação de algumas das propriedades do concreto têxtil e seus materiais constituintes, assim como alguns dos pesquisadores que já utilizaram esses métodos em suas pesquisas.

Quadro 7 – Métodos de análise para ensaios no reforço têxtil, na matriz e no CT

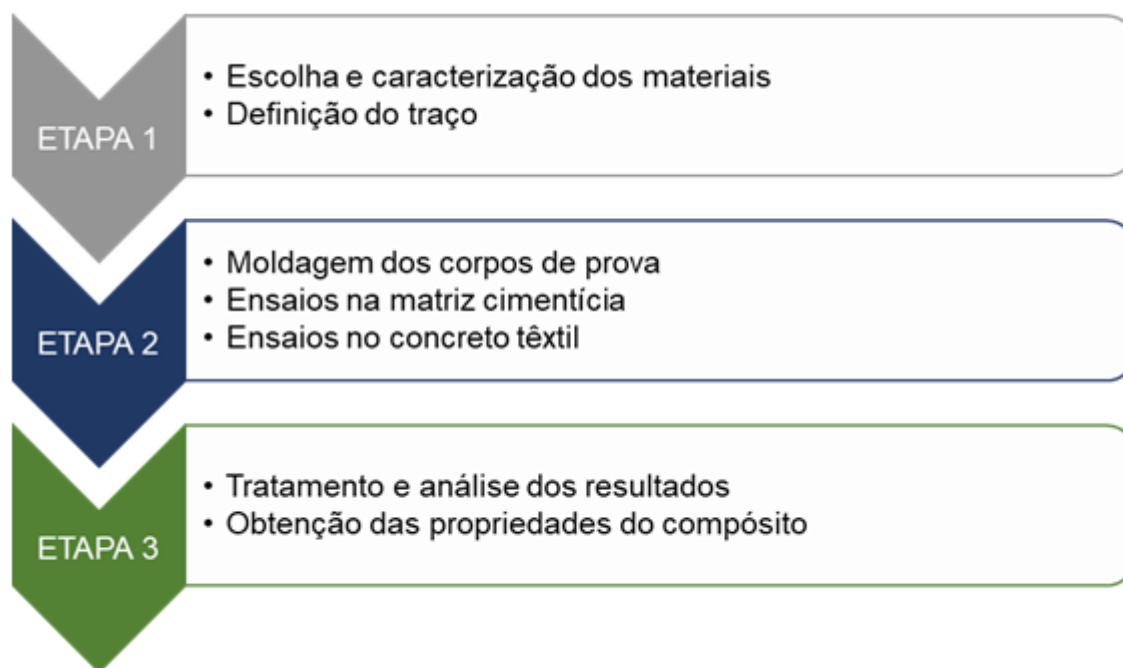
Material	Ensaio	Autor
Reforço têxtil	Determinação do alongamento e da resistência à tração	Gries et al. (2006)
Matriz	Determinação da resistência à compressão	Peled, Bentur e Mobasher (2017) e Mechtcherine, Schneider e Brameshuber (2016)
	Determinação do módulo de elasticidade	Peled, Bentur e Mobasher (2017) e Mechtcherine, Schneider e Brameshuber (2016)
Concreto têxtil	Verificação do comportamento no ensaio de tração direta	Peled, Bentur e Mobasher (2017) e Mobasher (2016)
	Verificação do comportamento no ensaio de tração na flexão	Vlach et al. (2018)

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3 MÉTODOS E MATERIAIS

O programa experimental desta pesquisa foi dividido em 3 etapas, conforme ilustra a Figura 25.

Figura 25 – Etapas do programa experimental



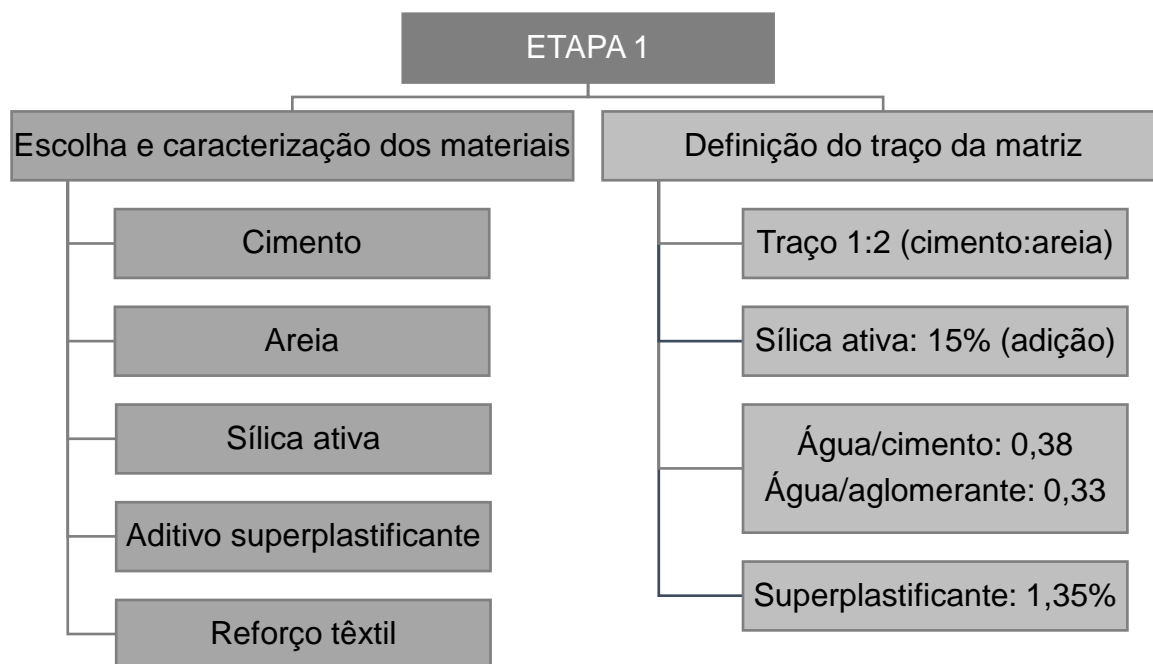
Fonte: Elaborada pelo autor.

Durante a Etapa 1, foram definidos os materiais que seriam utilizados nesta pesquisa, com a devida caracterização dos mesmos, e o critério de dosagem da matriz cimentícia. A Etapa 2 foi destinada à moldagem dos corpos de prova e aos ensaios na matriz de concreto e no compósito de concreto têxtil. Em seguida, são descritos os ensaios realizados, as idades de ensaio e as dimensões dos corpos de prova. Já a Etapa 3 foi destinada ao tratamento e à análise dos resultados, obtendo-se propriedades específicas do material estudado e comparando-as com o que a bibliografia determina para o dimensionamento de elementos de concreto têxtil.

#### 3.1 ETAPA 1

A Etapa 1 do programa experimental é apresentada mais detalhadamente na Figura 26 e descrita nas seções a seguir.

Figura 26 – Etapa 1 do programa experimental



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.1.1 Escolha e caracterização dos materiais utilizados

#### 3.1.1.1 Cimento

Foi utilizado cimento do tipo CP V-ARI, de alta resistência inicial, da fabricante Votorantim. A escolha por esse material deu-se pelo seu uso reduzido de adições pozolânicas e rápido ganho de resistência, relevante ao pensar-se na aplicação dos concretos têxteis em indústrias de pré-fabricação. Além disso, seu uso se justifica para que fosse viabilizada a análise de resistência mecânica realizada aos 7 dias.

#### 3.1.1.2 Areia

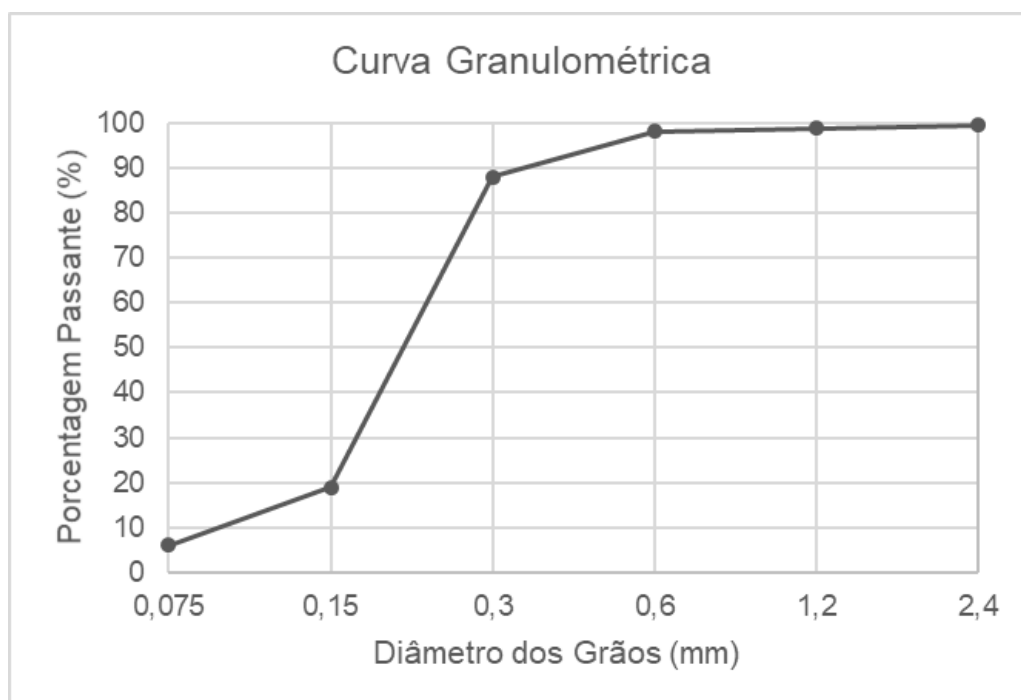
O agregado miúdo utilizado foi areia fina natural, oriunda de Osório, Rio Grande do Sul. A sua composição granulométrica foi determinada através dos procedimentos da NBR NM 248 (ABNT, 2003) e apresentada na Tabela 3 e na Figura 27.

Tabela 3 – Composição granulométrica do agregado miúdo

Abertura da peneira (mm)	Massa retida (%)	Massa retida acumulada (%)	Massa passante (%)
2,4	0,4%	0,4%	99,6%
1,2	0,7%	1,1%	98,9%
0,6	0,7%	1,8%	98,2%
0,3	10,1%	11,9%	88,1%
0,15	69,2%	81,1%	18,9%
0,075	12,8%	93,9%	6,1%
0	6,1%	100,0%	0,0%
Módulo de finura			1,90
Diâmetro máximo (mm)			0,6

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 27 – Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Elaborada pelo autor.

Já a massa específica e a massa unitária do agregado miúdo foram determinadas conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2009) e a NBR NM 45 (ABNT, 2006), respectivamente. Através desta última norma citada, também foi possível determinar o índice de volume de vazios. A Tabela 4 apresenta estas propriedades físicas.

Tabela 4 – Propriedades físicas do agregado miúdo

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,56
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,50
Índice de volume vazios (%)	41

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.1.1.3 Sílica ativa

A sílica ativa utilizada foi da marca comercial Dow Corning, com densidade de 2,22 g/cm<sup>3</sup>, pH de 7,9 e 93% de dióxido de silício, segundo informações da própria fabricante.

### 3.1.1.4 Aditivo superplastificante

Utilizou-se aditivo superplastificante à base de policarboxilato MC-Powerflow 4000, da marca MC-Bauchemie, cujas propriedades são fornecidas pelo fabricante e apresentadas na Tabela 5. O percentual de uso do aditivo foi de 1,35% sobre a massa de cimento.

Tabela 5 – Propriedades do aditivo superplastificante

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

Fonte: Elaborada pelo autor com base no rótulo do produto MC-Bauchemie.

### 3.1.1.5 Reforço têxtil

Foram utilizados dois tipos de tecidos de fibra de vidro AR, fornecidos pela empresa Texiglass, denominados AR-122-RA-04 e AR-192-RA-06, e entregues em rolos com 50 m<sup>2</sup> cada. Ambos foram impregnados em resina estireno butadieno e possuem feixes de 640 tex, ou seja, cada quilômetro de feixe tem 640 g de massa.



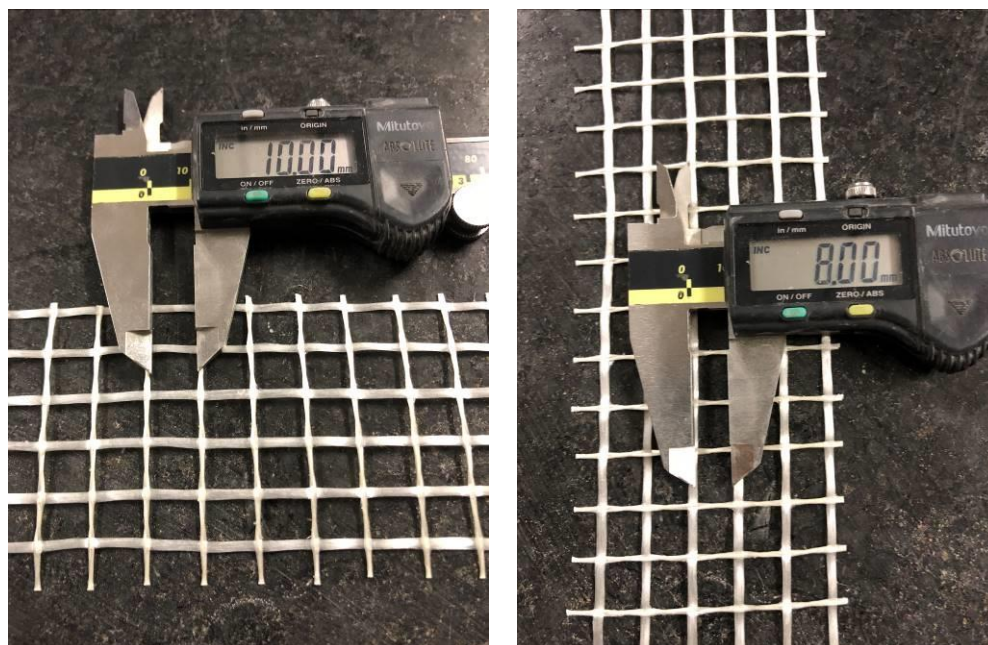
O Quadro 8 e a Figura 28 apresentam características do tecido AR-122-RA-04, cuja malha possui urdume de 10 mm e trama de 8 mm.

Quadro 8 – Ficha técnica do reforço têxtil AR-122-RA-04

Característica	Unidade	Valores			
		Mínimo	Nominal	Máximo	Real
Peso	g/m <sup>2</sup>	109,00	122,00	134,00	123,40
Número de fios de urdume	Fios/cm	0,86	0,90	0,95	0,90
Número de fios de trama	Fios/cm	0,90	1,00	1,10	1,00
Título do fio de urdume	Tex	576,00	640,00	704,00	716,00
Título do fio de trama	Tex	576,00	640,00	654,00	654,00
Espessura	mm	0,37	0,45	0,53	0,41
% de resina	%	11,00	14,00	17,00	15,65

Fonte: Elaborado pelo autor com base no rótulo do produto Texiglass.

Figura 28 – AR-122-RA-04: espaçamento (a) do urdume e (b) da trama



(a)

(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

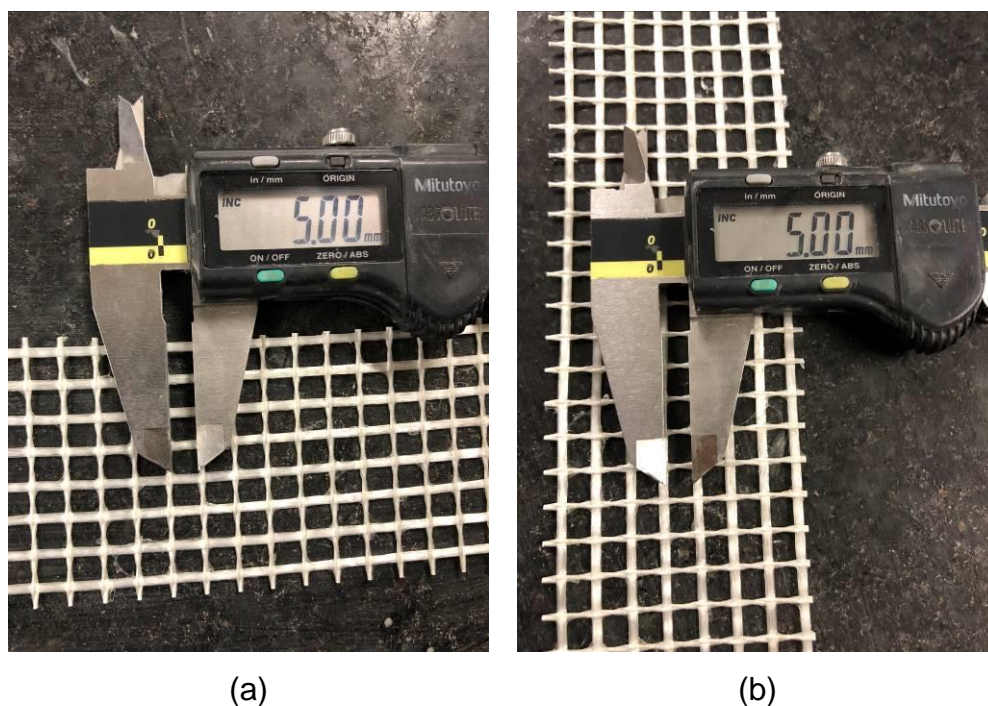
O segundo reforço têxtil utilizado foi o AR-192-RA-06, o qual tem algumas de suas propriedades apresentadas na Tabela 13. Sua malha possui 5 mm de abertura, tanto de urdume como de trama, conforme indica a Figura 29.

Quadro 9 – Ficha técnica do reforço têxtil AR-192-RA-06

Característica	Unidade	Valores			
		Mínimo	Nominal	Máximo	Real
Peso	g/m <sup>2</sup>	173,00	192,00	211,00	200,10
Número de fios de urdume	Fios/cm	1,40	1,50	1,60	1,50
Número de fios de trama	Fios/cm	1,40	1,50	1,70	1,50
Título do fio de urdume	Tex	576,00	640,00	704,00	636,00
Título do fio de trama	Tex	576,00	640,00	654,00	630,00
Espessura	mm	0,43	0,50	0,58	0,43
% de resina	%	11,00	13,00	15,00	15,50

Fonte: Elaborado pelo autor com base no rótulo do produto Texiglass.

Figura 29 – AR-192-RA-06: espaçamento (a) do urdume e (b) da trama



Fonte: Elaborada pelo autor.

A determinação da resistência à tração e o alongamento dos tecidos foi através dos procedimentos da NBR ISO 13934-1 (ABNT, 2016), em uma máquina de ensaios *MTS Landmark*, como mostra a Figura 30. O ensaio consiste em aplicar uma taxa de deslocamento de 100 mm/min em corpos de prova de 50 mm de largura e 200 mm de comprimento. Para cada tipo de tecido, foram extraídas 10 amostras: 5 no sentido da

trama e outras 5 no sentido do urdume. A Figura 31 e a Figura 32 mostram as amostras AR-122-RA-04 e AR-192-RA-06, respectivamente, após os ensaios. A Tabela 6 apresenta os resultados de carga máxima resistente e alongamento.

Figura 30 – (a) equipamento de ensaio *MTS Landmark* e (b) amostra sendo ensaiada

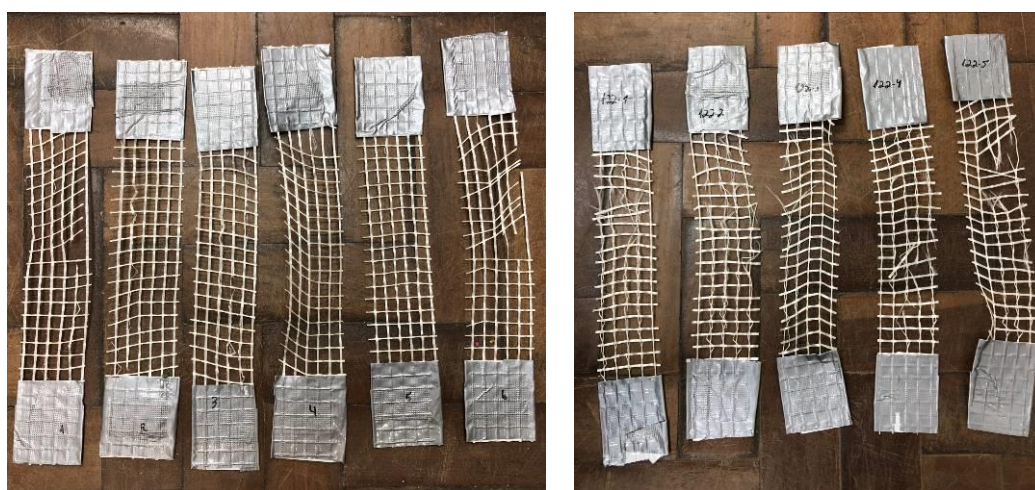


(a)

(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 31 – Amostras do reforço AR-122-RA-04 após o ensaio no sentido (a) da trama e (b) do urdume

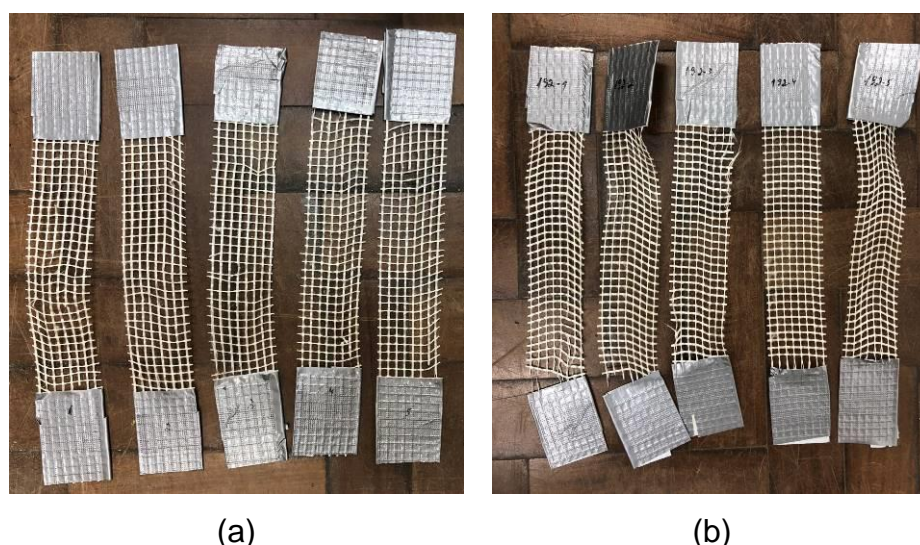


(a)

(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 32 – Amostras do reforço AR-192-RA-06 após o ensaio no sentido (a) da trama e (b) do urdume



(a)

(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 6 – Ensaio de tração no reforço têxtil

Sentido do ensaio	Número da amostra	AR-122-RA-04		AR-192-RA-06	
		Carga máxima (N)	Alongamento (%)	Carga máxima (N)	Alongamento (%)
Trama	1	1498	3,1%	2908	4,3%
	2	1540	3,1%	2694	3,7%
	3	1542	3,9%	3305	3,5%
	4	1549	3,6%	2806	3,9%
	5	1422	3,3%	2915	3,9%
	<b>Média</b>	<b>1510</b>	<b>3,4%</b>	<b>2926</b>	<b>3,8%</b>
Urdume	1	1242	3,3%	1595	2,9%
	2	1312	3,0%	1309	2,2%
	3	1099	2,9%	1549	3,1%
	4	1147	2,8%	1418	2,4%
	5	1297	2,9%	1546	2,8%
	<b>Média</b>	<b>1219</b>	<b>3,0%</b>	<b>1483</b>	<b>2,7%</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com estes resultados, percebe-se que os dois tecidos possuem maior resistência à tração e maior alongamento no sentido da trama, em conformidade com a bibliografia. Assim, definiu-se que o sentido da trama do reforço seria posicionado paralelamente ao sentido longitudinal das amostras de concreto têxtil.

### 3.1.2 Definição do traço

Através da análise de diferentes matrizes cimentícias utilizadas por pesquisadores e também devido à disponibilidade de materiais, definiu-se o traço 1:2 (cimento:areia), com adição de 15% de sílica ativa em relação à massa de cimento. O Quadro 10 mostra a proporção dos materiais utilizados na mistura em relação à massa de cimento, assim como a massa utilizada em cada mistura realizada e as relações água/cimento e água/materiais aglomerantes.

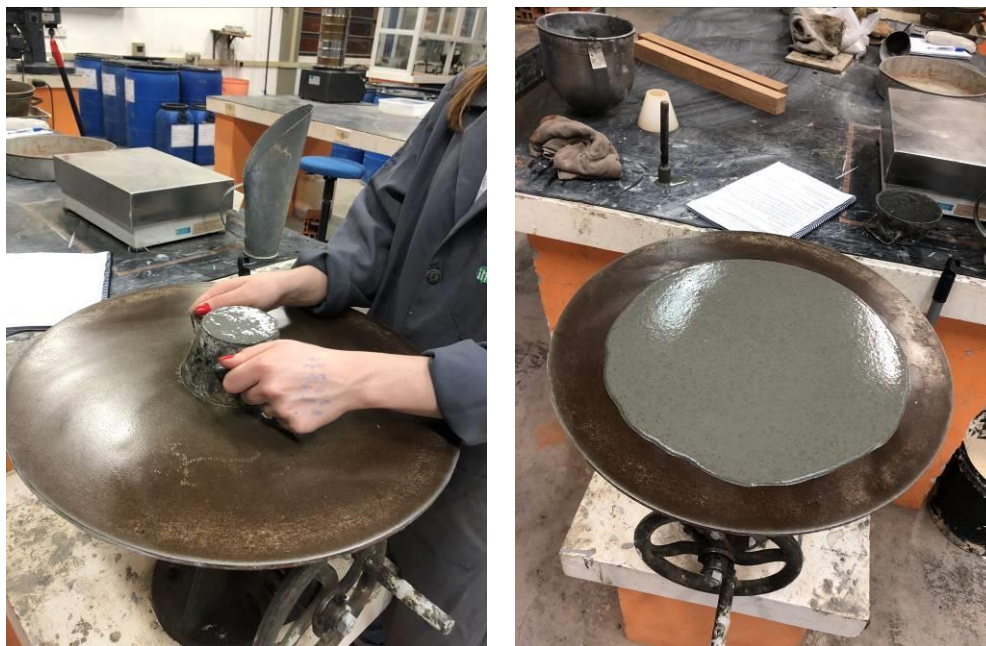
Quadro 10 – Traço da matriz

<b>Material</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Proporção</b>
Cimento CP V-ARI	kg/m <sup>3</sup>	710	1
Areia Fina		1420	2
Sílica ativa		107	0,15
Superplastificante	% cimento	1,35	0,0135
Água/cimento	-	0,384	-
Água/aglomerante	-	0,333	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com essa relação de materiais, obteve-se uma argamassa fluida o suficiente para penetrar entre as malhas e envolver os feixes de fibra de vidro. A determinação da consistência da argamassa foi realizada de acordo com os procedimentos da NBR 13276 (ABNT, 2016), atingindo 377 mm, como mostra a Figura 33.

Figura 33 – Ensaio de consistência da argamassa



(a)

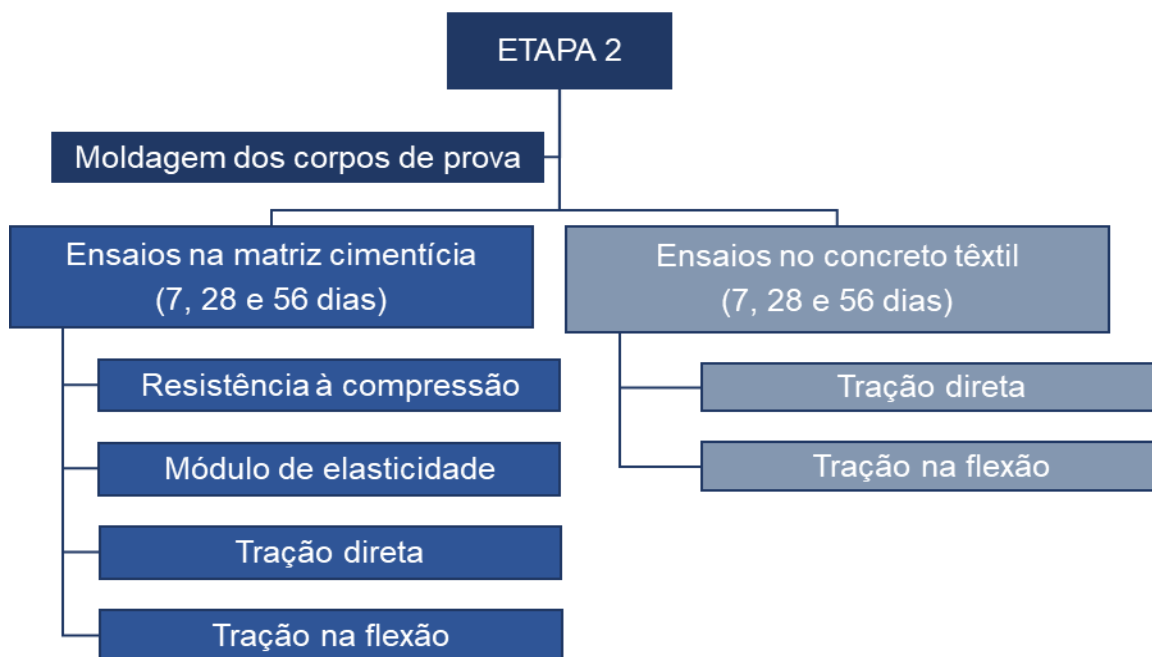
(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.2 ETAPA 2

A Figura 34 apresenta os passos presentes na Etapa 2 do programa experimental, cujos ensaios foram conduzidos nas idades de 7, 28 e 56 dias de cura da matriz.

Figura 34 – Etapa 2 do programa experimental



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.2.1 Mistura da matriz

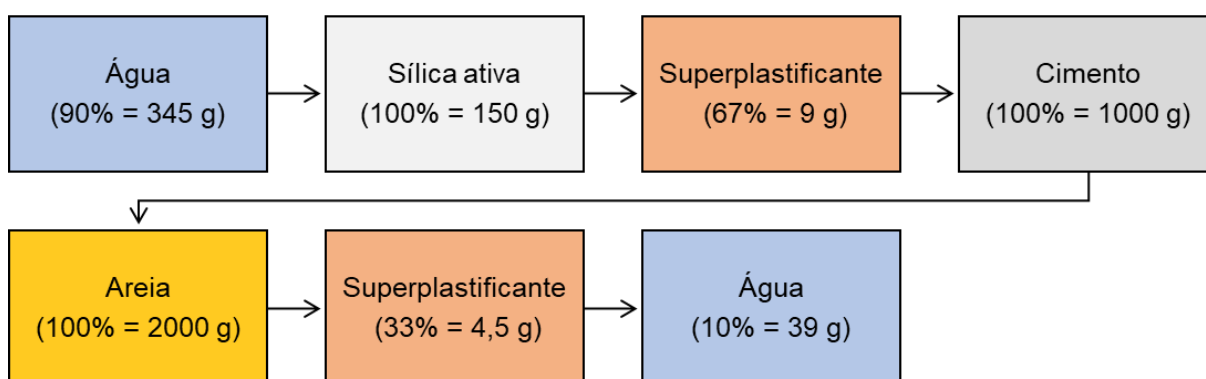
A mistura da matriz foi feita em uma argamassadeira de bancada, ilustrada na Figura 35. Como forma de manter a homogeneidade entre as diferentes moldagens, seguiu-se um procedimento de mistura com tempo pré-determinado. Assim, cada material foi adicionado no mesmo instante e teve o mesmo tempo de mistura em todas as moldagens. A ordem e a proporção em que os materiais foram adicionados à mistura é ilustrada na Figura 36.

Figura 35 – Argamassadeira de bancada



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 36 – Sequência de materiais na mistura



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.2.2 Moldagem dos corpos de prova

A Tabela 7 apresenta as dimensões e quantidade de corpos de prova moldados para os ensaios de determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade. Para cada idade, foram ensaiados 3 CPs. Assim, foram moldados 18 corpos de prova no total. A Figura 37 mostra os moldes utilizados e as amostras produzidas.



Tabela 7 – Dimensões e quantidade de CPs para ensaios de compressão e módulo de elasticidade

Ensaio	Quantidade	Dimensões	
		Diâmetro (mm)	Altura (mm)
Resistência à compressão	9	50	100
Módulo de elasticidade	9	50	100

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 37 – (a) moldes e (b) CPs cilíndricos



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Já as características dos corpos de prova para ensaios de determinação da resistência à tração direta e tração na flexão são apresentados na Tabela 8. A quantidade de amostras para cada ensaio se deu pela disponibilidade de formas metálicas para este estudo.

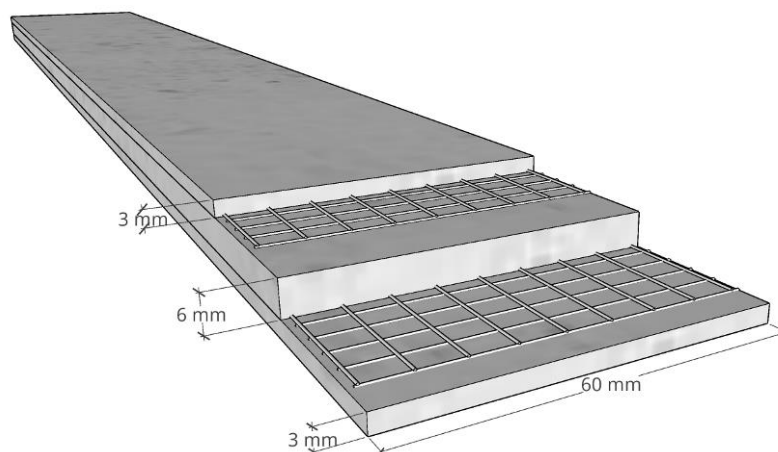
Tabela 8 – Dimensões e quantidade de CPs para os ensaios de tração direta e tração na flexão

Ensaio	Tipo de reforço	Quantidade	Dimensões		
			Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
Tração direta	-	6	500	60	12
	AR-122-RA-04	6			
	AR-192-RA-06	6			
Tração na flexão	-	9	360	100	12
	AR-122-RA-04	9			
	AR-192-RA-06	9			

Fonte: Elaborada pelo autor.

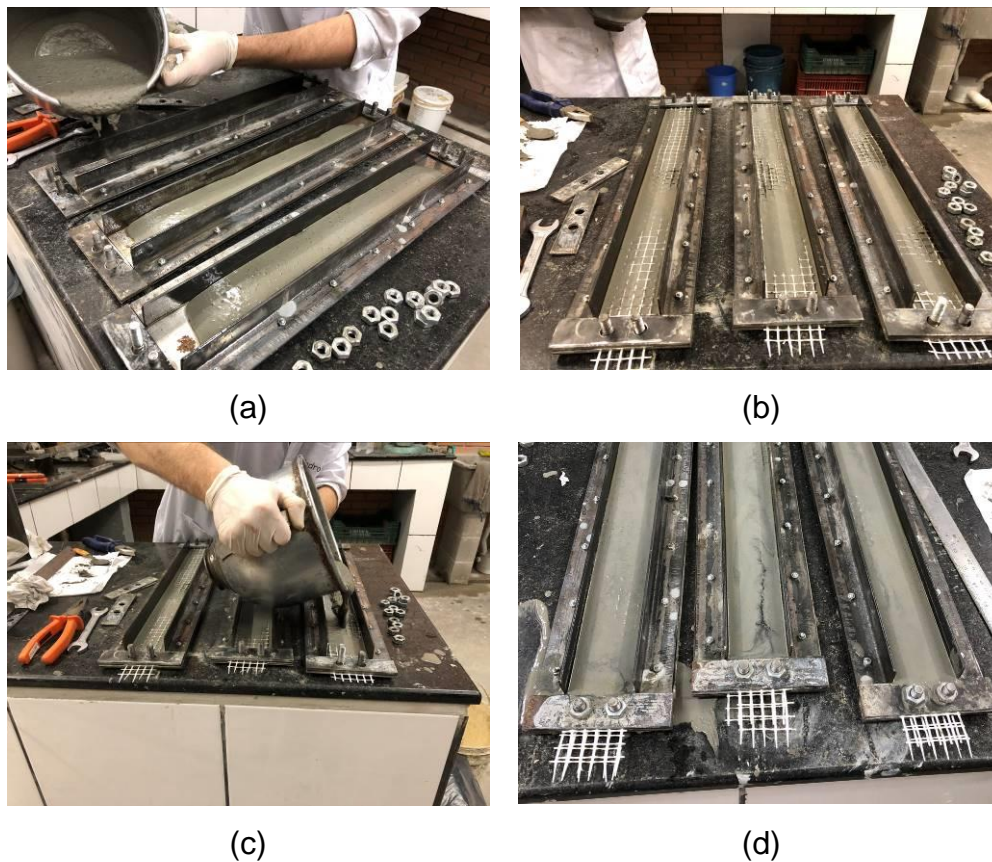
Em cada idade, a resistência à tração direta foi determinada em 2 CPs, cujas dimensões estão de acordo com a recomendação RILEM TC 232-TDT: *Uniaxial tensile test*. (RILEM, 2016). Foram posicionadas duas camadas de reforço têxtil de fibra de vidro AR, com cobertura de 3 mm em cada extremidade, como ilustra a Figura 38, e a sequência na Figura 39. Também foram moldadas amostras sem reforço têxtil para verificação do comportamento da matriz.

Figura 38 – Esquema e posicionamento do reforço para ensaio de tração direta



Fonte: Elaborada pelo autor.

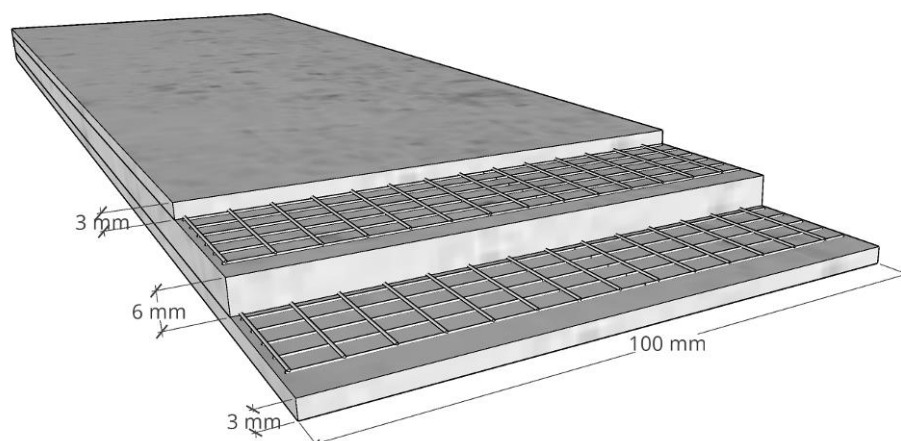
Figura 39 – Sequência para a moldagem dos CPs



Fonte: Elaborada pelo autor.

Já para o ensaio de tração na flexão, salienta-se que ainda não se tem normas ou recomendações acerca das dimensões dos corpos de prova e procedimentos de ensaio, portanto, foram seguidos estudos já realizados por outros pesquisadores. Os CPs tiveram 360 mm de comprimento e 60 mm de largura, conforme Vlach et al. (2018). Já a espessura da amostra, a quantidade e a posição do reforço têxtil foram as mesmas definidas para o ensaio de tração direta, como apresenta a Figura 40.

Figura 40 – Esquema e posicionamento do reforço para ensaio de tração na flexão



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.2.3 Cura das amostras

Todas as amostras foram desformadas 24 horas após a sua moldagem 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, 2018a). As amostras cilíndricas para ensaios de compressão e o módulo de elasticidade permaneceram na sala climatizada até o momento do ensaio.

Já as amostras retangulares destinadas aos ensaios de tração direta e tração na flexão foram retiradas da sala de cura 7 dias antes de serem ensaiadas, estando de acordo com a Recomendação RILEM TC 232-TDT: *Uniaxial tensile test*. (RILEM, 2016). Durante estes sete dias, as amostras permaneceram em ambiente de laboratório. Entretanto, salienta-se que este procedimento foi realizado apenas para as amostras ensaiadas aos 28 e 56 dias. As amostras ensaiadas com idade de 7 dias permaneceram saturadas.

### 3.2.4 Ensaio de resistência à compressão

A resistência à compressão ( $f_c$ ) da matriz cimentícia foi determinada de acordo com as prescrições da NBR 5739. (ABNT, 2018b). O ensaio consiste em aplicar uma taxa de carregamento de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s até que se atinja a força máxima resistente do corpo de prova. A resistência à compressão é calculada de acordo com a Equação 3.1.

$$f_c = \frac{4F}{\pi x D^2} \quad (3.1)$$

Onde:

$f_c$  é a resistência à compressão, em megapascal (MPa);

$F$  é a força máxima atingida, em newtons (N);

$D$  é o diâmetro do corpo de prova, em milímetros (mm).

### 3.2.5 Ensaio de módulo de elasticidade

A verificação do módulo de elasticidade da matriz foi realizada através do método de tensão  $\sigma_a$  fixa da NBR 8522. (ABNT, 2017b). Para tal, o corpo de prova é carregado a uma taxa de 0,45 +/- 0,15 MPa/s até atingir 30% ( $\sigma_b$ ) da resistência à compressão média ( $f_c$ ), verificada anteriormente. Esta carga é, então, mantida por 60 segundos. Em seguida, o corpo de prova é descarregado até uma tensão próxima de zero. Logo após, o CP é carregado até a tensão básica  $\sigma_a$ , correspondente a 0,5 MPa, onde é mantido por 60 segundos. Novamente, carrega-se o CP até a tensão  $\sigma_b$  e repete-se todo o processo por mais duas vezes.

Na última etapa do ensaio, registram-se as deformações  $\varepsilon_a$  e  $\varepsilon_b$ , correspondentes às tensões  $\sigma_a$  e  $\sigma_b$ , respectivamente, através de extensômetros acoplados ao corpo de prova. Por fim, os extensômetros são retirados e o CP é carregado até a sua ruptura. O módulo de elasticidade é calculado de acordo com a Equação 3.2:

$$E_{ci,i} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (3.2)$$

Onde:

$\sigma_b$  é a tensão maior, equivalente à  $0,3f_c$ , em megapascals (MPa);

0,5 é a tensão básica, em megapascals (MPa);

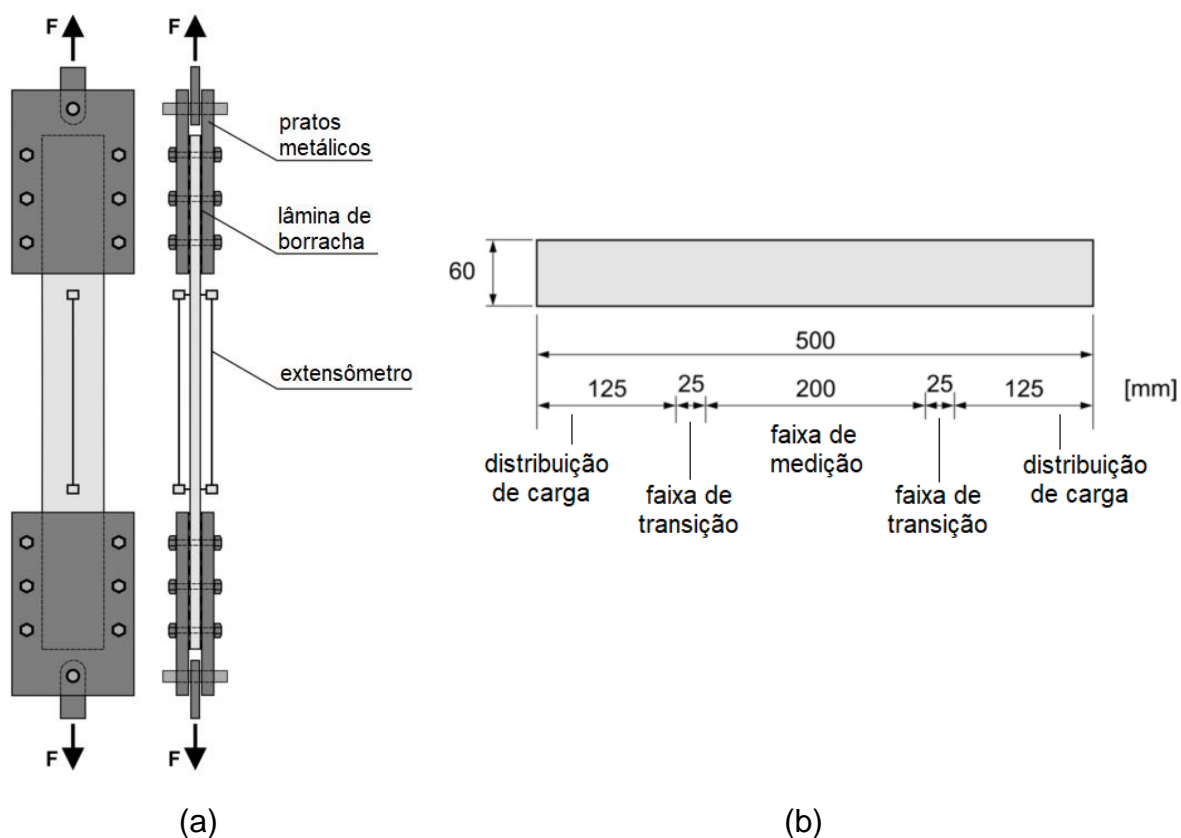
$\varepsilon_b$  é a deformação específica do concreto sob a tensão maior;

$\varepsilon_a$  é a deformação específica do concreto sob a tensão básica.

### 3.2.6 Ensaio de tração direta

O ensaio de tração direta nas peças de concreto têxtil seguiu a Recomendação RILEM TC 232-TDT: *Uniaxial tensile test*. (RILEM, 2016). A Figura 41 apresenta o aparato acoplado à máquina de ensaios. O equipamento consiste em um conjunto de pratos metálicos e parafusos que fixam 125 mm de cada extremidade da amostra. Durante a instrumentação, posiciona-se uma lâmina de borracha de aproximadamente 1 mm de espessura entre a amostra e os pratos metálicos, para que se tenha melhor distribuição das cargas. A leitura dos deslocamentos é feita por dois extensômetros posicionados em ambas as faces da peça de concreto têxtil.

Figura 41 – (a) equipamento de ensaio e (b) demonstração das faixas de distribuição de carga, transição e medição



Fonte: Adaptado de RILEM (2016).

O ensaio foi realizado com taxa de deformação de 0,2%/min e, devido ao comprimento de 500 mm do corpo de prova, corresponde à uma taxa de deslocamento

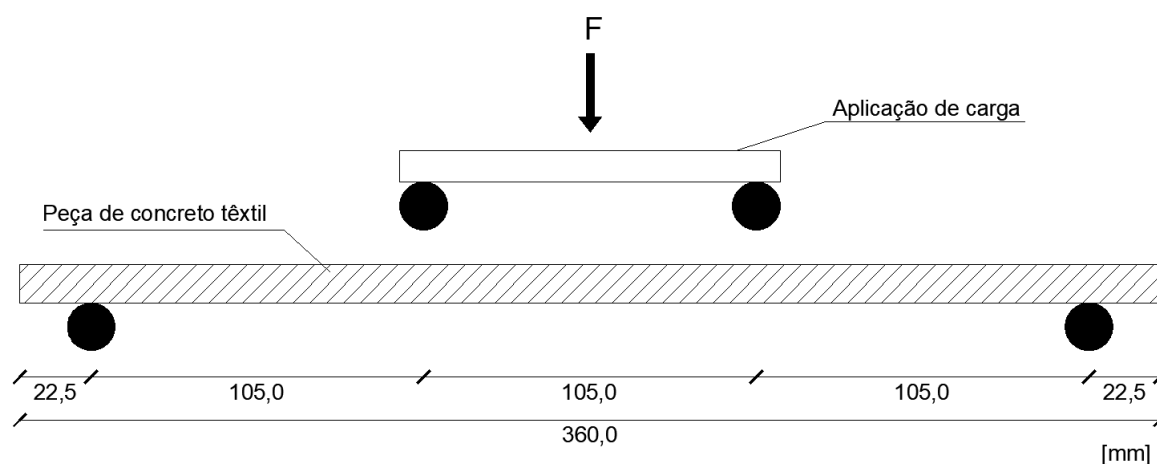
vertical da máquina de ensaio de 1 mm/min. O ensaio foi conduzido até a perda de, no mínimo, 70% da carga máxima alcançada.

Os valores de carga, tensão, deslocamento e deformação foram registrados a cada 0,1 segundo. Durante o ensaio, foram registrados o momento e a posição da primeira fissura. Logo após o ensaio, a distância entre as fissuras foi medida, verificando a presença ou não de um padrão de fissuração.

### 3.2.7 Ensaio de tração na flexão

Como mencionado anteriormente, este ensaio seguiu o procedimento definido por Vlach et al. (2018), pois ainda não existem normas para tal. O método utilizado foi do tipo 4 pontos. Ou seja, dois pontos de apoio e dois pontos de aplicação de carga, como indica a Figura 42.

Figura 42 – Ensaio de tração na flexão em 4 pontos



Fonte: Elaborada pelo autor.

O carregamento deu-se por deslocamento prescrito, com velocidade de 5 mm por minuto. Foram registrados os valores de carga e deslocamento a cada 0,1 segundo, assim como o instante em que surgiram as fissuras.

### 3.2.8 Equipamentos utilizados

O Quadro 11 apresenta os equipamentos utilizados em cada ensaio do estudo.

Quadro 11 – Equipamentos utilizados

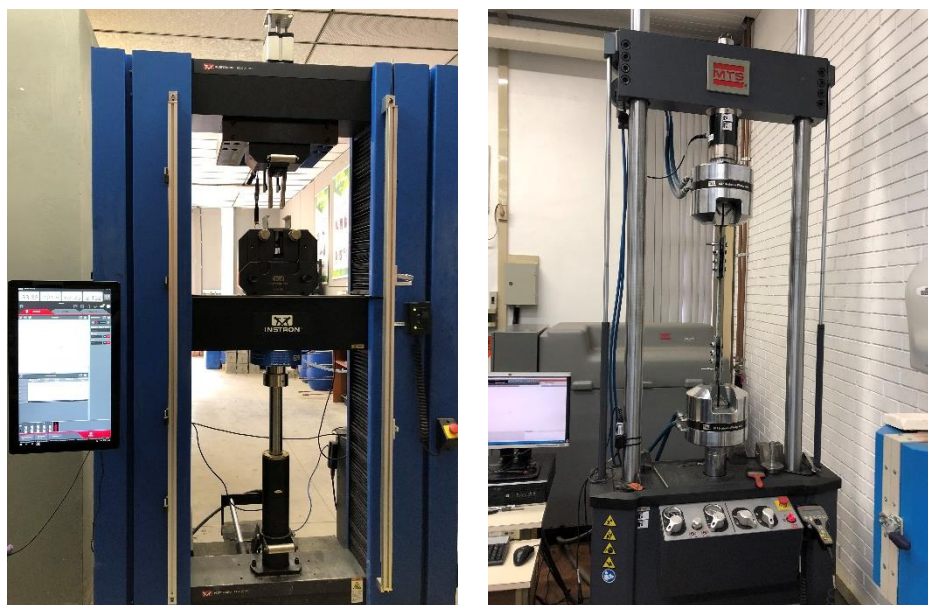
<b>Ensaio</b>	<b>Descrição do equipamento</b>
Compressão	Máquina universal de ensaios EMIC-Instron modelo 23-300
	Célula de carga com capacidade de 300 kN
Módulo de elasticidade	Máquina universal de ensaios EMIC-Instron modelo 23-300
	Célula de carga com capacidade de 300 kN
	Extensômetro EMIC modelo EE08 com capacidade de 2,5 mm
Tração direta	Dispositivo de garras para fixação das amostras
	Máquina universal de ensaios EMIC-Instron modelo 23-300
	Célula de carga com capacidade de 300 kN
	Máquina universal de ensaios MTS modelo Landmark
	Célula de carga com capacidade de 250 kN
	LVDTs HBM com capacidade de 200 mm
Tração na flexão	Apoios ajustáveis
	Dispositivo de aplicação de carga
	Máquina universal de ensaios EMIC-Instron modelo 23-300
	Célula de carga com capacidade de 300 kN
	Máquina universal de ensaios MTS modelo Landmark
	Célula de carga com capacidade de 250 kN

Fonte: Elaborada pelo autor.

Salienta-se que o equipamento de ensaios MTS Landmark e a célula de carga de 250 kN apenas foram utilizados devido à problemas técnicos ocorridos com a máquina EMIC-Instron 23-300, o que impossibilitaria a realização de alguns ensaios nas devidas idades. Assim, optou-se por mudar de equipamento ao invés de postergar os ensaios, uma vez que não havia previsão do seu retorno. Os ensaios de tração direta e tração na flexão aos 56 dias de idade das amostras reforçadas com o têxtil AR-122-RA-04, e também as sem reforço algum, foram realizados no equipamento MTS. Como equipamentos distintos podem gerar resultados diferentes entre si, houve divergência nos resultados em relação ao esperado. As duas máquinas são mostradas na Figura 43.



Figura 43 – Máquinas de ensaio (a) EMIC-Instron e (b) MTS Landmark



(a)

(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Também ocorreram falhas na leitura dos deslocamentos através dos dispositivos *LVDTs*, provavelmente ocasionadas por má fixação dos mesmos ou da chapa metálica que foi acoplada à amostra, como mostra a Figura 44. Desta forma, adotou-se a leitura do deslocamento vertical da máquina de ensaios como fonte de dados.

Figura 44 – Garras para ensaio de tração e LVDTs acoplados

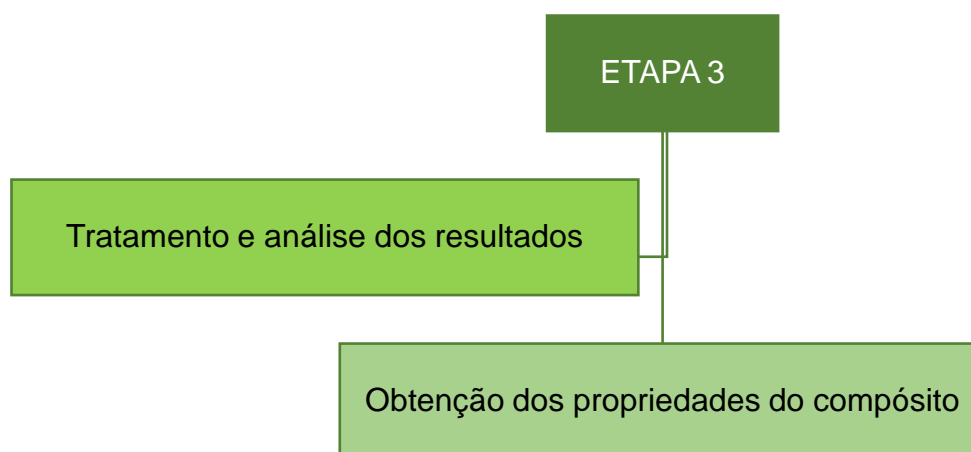


Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.3 ETAPA 3

A terceira etapa da pesquisa consistiu no tratamento e na análise dos resultados obtidos experimentalmente e na obtenção das propriedades específicas do material estudado, como mostra a Figura 45.

Figura 45 – Etapa 3 do programa experimental



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram traçadas as curvas tensão vs deformação e tensão vs deslocamento, adquiridas nos ensaios de tração direta e tração na flexão em 4 pontos, respectivamente. Assim, definiu-se as diferentes zonas de comportamento do compósito. Para a definição dos parâmetros específicos do material estudado, foram utilizadas as equações e tabelas apresentadas na seção 2.4. Por fim, as propriedades obtidas experimentalmente foram comparadas com as propriedades apresentadas pela bibliografia para projetos com elementos de concreto têxtil.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir, apresenta-se a análise dos resultados obtidos através dos ensaios.

### 4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

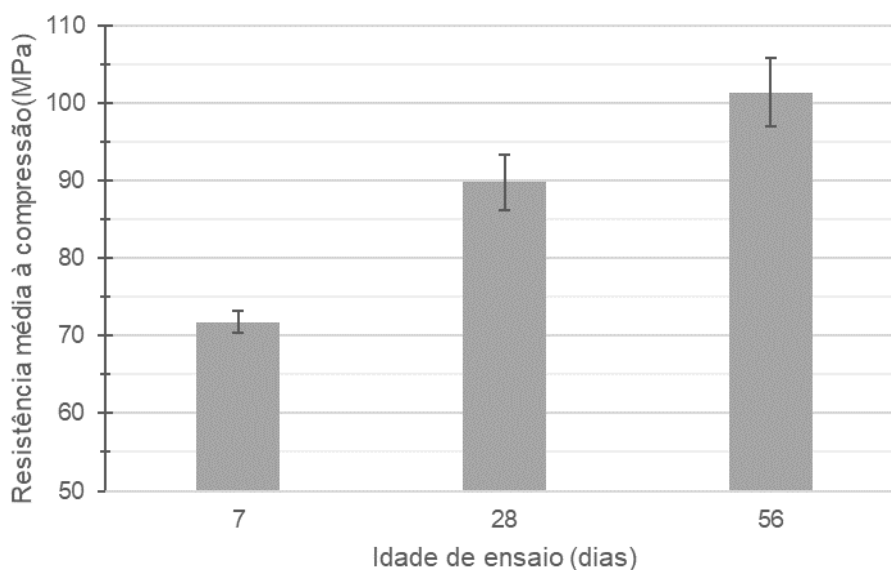
A Tabela 9 e a Figura 46 apresentam os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova ensaiados nas idades de 7, 28 e 56 dias. Como esperado, devido ao uso de cimento CPV-ARI, a matriz atingiu elevada resistência aos 7 dias. Aos 28 dias de cura, a resistência média à compressão aumentou cerca de 25%. Já o aumento de resistência à compressão entre 28 e 56 dias foi de 13%.

Tabela 9 – Resultados de resistência à compressão

Idade (dias)	Número do CP	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão de Ruptura Média (MPa)	Tensão de Ruptura Potencial (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
7	1	70,2	71,8	72,9	1,4
	2	72,9			
	3	72,4			
28	7	86,2	89,8	93,4	3,6
	8	89,6			
	9	93,4			
56	13	97,7	101,4	106,3	4,4
	14	100,2			
	15	106,3			

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 46 – Resultados de resistência à compressão



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pode ser percebido nos ensaios relatados, a matriz utilizada no concreto têxtil apresentou valores elevados de resistência à compressão, alcançando 106,3 MPa. Os resultados são coerentes com os verificados por Brockmann e Brameshuber (2006), cujas matrizes estudadas por ele atingiram entre 74,2 e 117,7 MPa aos 28 dias de idade. Assim, a resistência média de 89,8 MPa, aos 28 dias, obtida neste estudo, encontra-se em uma faixa intermediária quando comparada à bibliografia.

#### 4.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE

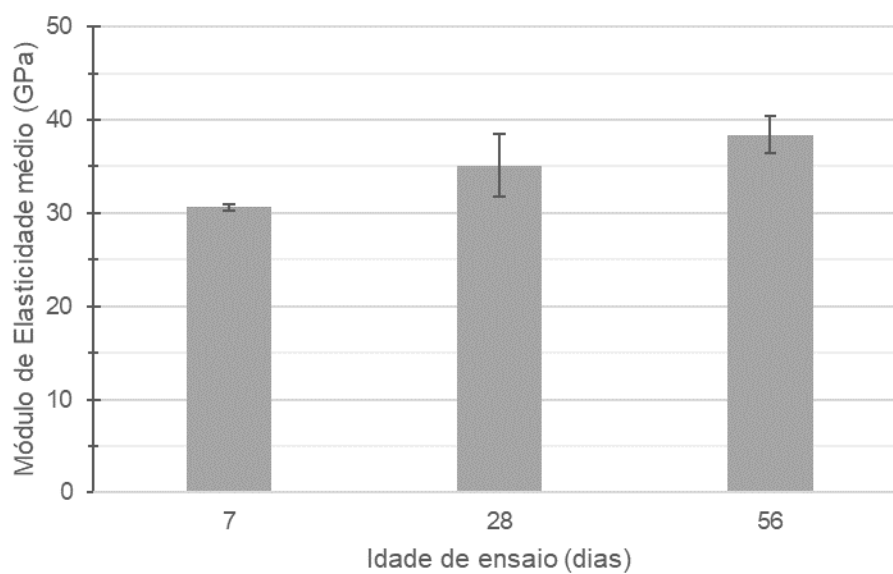
Os ensaios de módulo de elasticidade da matriz utilizada neste estudo têm seus resultados apresentados na Tabela 10 e na Figura 47. Houve aumento de 15% entre as idades de 7 e 28 dias e de 9% entre 28 e 56 dias.

Tabela 10 – Resultados de módulo de elasticidade

Idade (dias)	Número do CP	Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo de Elasticidade Médio (MPa)	Desvio Padrão (GPa)
7	4	31,0	30,6	0,4
	5	30,2		
	6	30,6		
28	10	38,7	35,1	3,4
	11	34,5		
	12	32,0		
56	16	40,6	38,4	2,0
	17	37,0		
	18	37,5		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 47 – Resultados de módulo de elasticidade



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 48 mostra um CP durante o ensaio e após a sua ruptura.

Figura 48 – Ensaio de módulo de elasticidade



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados apontam para valores de módulo de elasticidade acima de 30 GPa já aos 7 dias. No estudo de Brockmann e Brameshuber (2006), o autor verifica valor semelhante (33 GPa) aos 28 dias.

#### 4.3 TRAÇÃO DIRETA

De acordo com a Recomendação RILEM TC 232-TDT: *Uniaxial tensile test* (RILEM, 2016), as amostras que apresentam ruptura na região das garras do dispositivo de ensaio devem ser desconsideradas. Portanto, a Tabela 11 apresenta a validade de cada amostra e também indica aquelas que foram ensaiadas na máquina de ensaios *MTS Landmark*.

Tabela 11 – Validade das amostras para ensaio de tração direta

Compósito	Idade de ensaio	Número da amostra	Validade do ensaio		Observações
			Válido	Inválido	
Matriz + AR-122	7	T-122-7-1		x	Ruptura na região das garras
		T-122-7-2	x		-
	28	T-122-28-1		x	Amostra danificada após a desforma
		T-122-28-2	x		-
	56	T-122-56-1	x		Ensaiado na máquina MTS
		T-122-56-2	x		Ensaiado na máquina MTS
Matriz + AR-192	7	T-192-7-1			-
		T-192-7-2		x	Ruptura na região das garras
		T-192-28-1			-
	28	T-192-28-2		x	Amostra danificada e ruptura na região das garras
		56	T-192-56-1	x	
		T-192-56-2	x		-
Matriz	7	T-REF-7-1	x		-
		T-REF-7-2		x	Amostra rompida após a desforma
	28	T-REF-28-1	x		-
		T-REF-28-2		x	Ruptura na região das garras
	56	T-REF-56-1	x		Ensaiado na máquina MTS
		T-REF-56-2	x		Ensaiado na máquina MTS

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como se percebe, de um total de 18 amostras, 4 tiveram valor considerado inválido de acordo com as prescrições do documento citado, e 2 foram descartadas devido a danos durante o processo de desforma. Assim, algumas idades de ensaio tiveram apenas uma amostra para análise dos resultados.

### 4.3.1 Compósito reforçado com tecido AR-122-RA-04

A Tabela 12 apresenta os resultados de tensão e deformação obtidos nos ensaios de tração direta realizados nos compósitos reforçados com o têxtil AR-122-RA-04.

Tabela 12 – Tensões e deformações das amostras com reforço AR-122

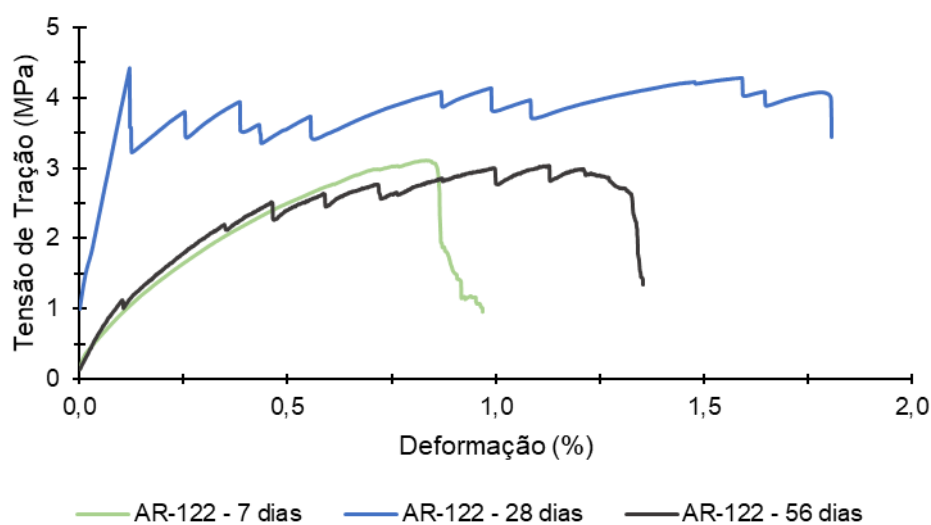
Amostra	Tensões e deformações					
	BOP-		BOP+		Pico de carga	
	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$ (%)
T-122-7-2	0,40	0,020	2,76	0,610	3,11	0,830
T-122-28-2	1,78	0,070	4,42	0,120	4,42	0,120
T-122-56-1	1,13	0,103	2,20	0,347	3,04	1,128
T-122-56-2	1,08	0,114	3,10	0,431	3,10	0,431

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 49 representa a curva tensão vs deformação em cada idade de ensaio. Aos 7 e 28 dias, apenas um corpo de prova foi considerado válido. Já na idade de 56 dias, optou-se por representar apenas a amostra T-122-56-1 pois esta apresentou uma curva mais fidedigna às demais, ainda que sua tensão máxima resistente tenha sido levemente inferior ao corpo de prova T-122-56-2.



Figura 49 – Curva tensão vs deformação das amostras com reforço AR-122



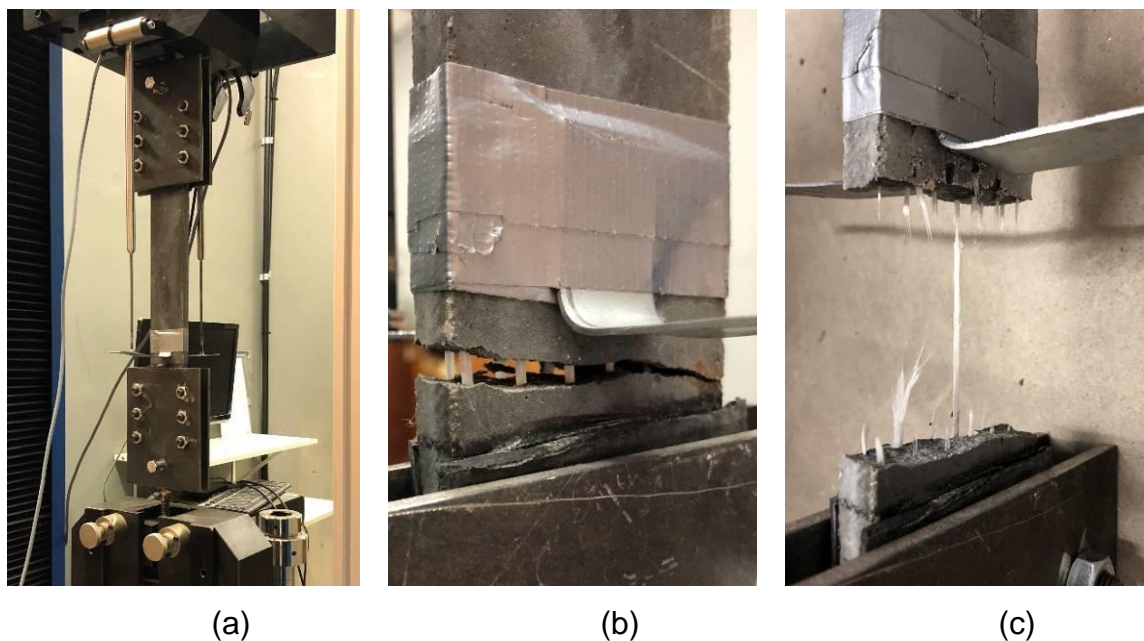
Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando-se a Tabela 12 e a Figura 49, percebe-se aumento de deformação e resistência à tração do compósito entre as idades de 7 e 28 dias. Entretanto, aos 56 dias, este aumento não ocorreu, possivelmente por ter sido ensaiado em um equipamento diferente.

O acréscimo no valor da tensão, mantendo-se valores aproximados de deformação, concorda com o obtido no ensaio de módulo de elasticidade já apresentado.

A Figura 50 mostra o ensaio realizado aos 7 dias na amostra T-122-7-2. A sua curva com maior inclinação pode ter ocorrido devido ao escorregamento entre a matriz e o reforço têxtil, presente na única fissura verificada nesta amostra.

Figura 50 – Ensaio da amostra T-122-7-2



Fonte: Elaborada pelo autor.

Já o ensaio de 28 dias é apresentado na Figura 51. As primeiras fissuras surgiram na região central da amostra e, logo após, surgiu um padrão de fissuração ao longo de toda a faixa de medição. No total, verificou-se a presença de 9 fissuras visíveis ao olho nu, com espaçamento médio de 29 mm entre si.

Figura 51 – Ensaio na amostra T-122-28-2



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 52 mostra o corpo de prova T-122-56-1. Ao todo, 5 fissuras desenvolveram-se na região central da amostra, porém sem um padrão de espaçamento entre elas.

Figura 52 – Ensaio na amostra T-122-56-1



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao analisar as curvas tensão vs deformação e a forma em que as fissuras surgiram, percebe-se que as amostras que apresentaram múltiplas fissuras suportaram suas tensões máximas em maiores deformações, estando de acordo com autores como Peled, Bentur e Mobasher (2017) e Mobasher (2016). Isto ocorreu com as amostras de 28 e 56 dias. Já a amostra ensaiada aos 7 dias teve apenas uma fissura e rompeu-se logo após atingir sua tensão máxima. Esta forma de ruptura pode ser um indício de que as fibras ainda não estavam completamente ancoradas à matriz. Peled, Bentur e Mobasher (2017) explicam que, em idades reduzidas, a adesão entre

os materiais ainda não atingiu os melhores índices, o que pode ter influenciado na sua ruptura.

#### 4.3.2 Compósito reforçado com tecido AR-192-RA-06

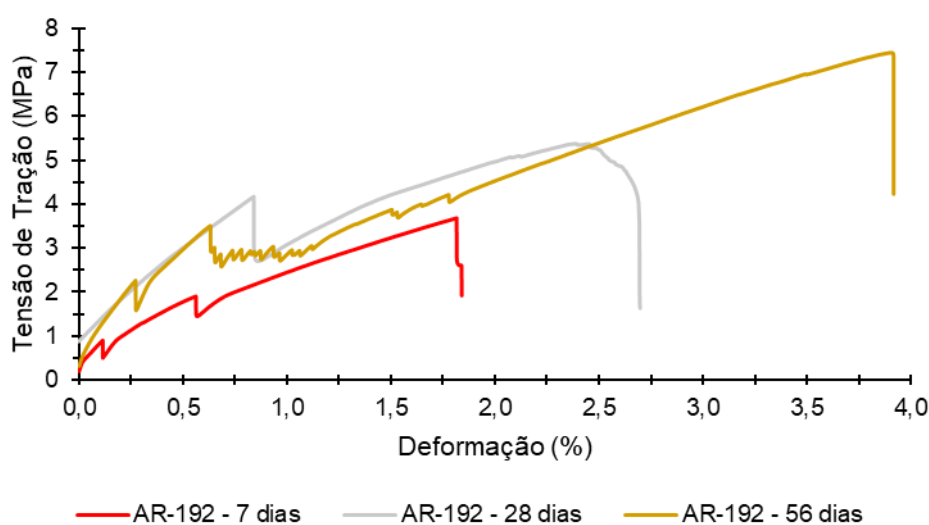
Os resultados dos ensaios válidos realizados nas peças reforçadas com o têxtil AR-192-RA-06 são apresentados na Tabela 13. A Figura 53 mostra a curva tensão vs deformação de uma amostra por idade. Como aos 56 dias duas amostras foram válidas, optou-se por apresentar a amostra T-192-56-1, pois esta teve maior resistência à tração.

Tabela 13 – Tensões e deformações das amostras com reforço AR-192

Amostra	Tensões e deformações					
	BOP-		BOP+		Pico de carga	
	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$ (%)
T-192-7-1	0,90	0,115	1,90	0,563	3,68	1,815
T-192-28-1	-	-	4,18	0,841	5,38	2,390
T-192-56-1	1,01	0,072	3,51	0,632	7,45	3,901
T-192-56-2	0,48	0,039	2,64	0,695	5,11	3,818

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 53 – Curva tensão vs deformação das amostras com reforço AR-192



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados apresentados evidenciam uma evolução no ganho de resistência do compósito. Ao passo que a matriz vai aumentando sua resistência mecânica ao longo do tempo, também é evidenciada a melhora na adesão entre reforço e matriz, possibilitando maiores deformações. A ancoragem das fibras à matriz ao longo do tempo está de acordo com as informações apresentadas por Peled, Bentur e Mobasher (2017) e Mobasher (2016).

O ensaio aos 7 dias na amostra T-192-7-1, apresentada na Figura 54, indica o surgimento de apenas duas fissuras, espaçadas entre si por 62 mm.

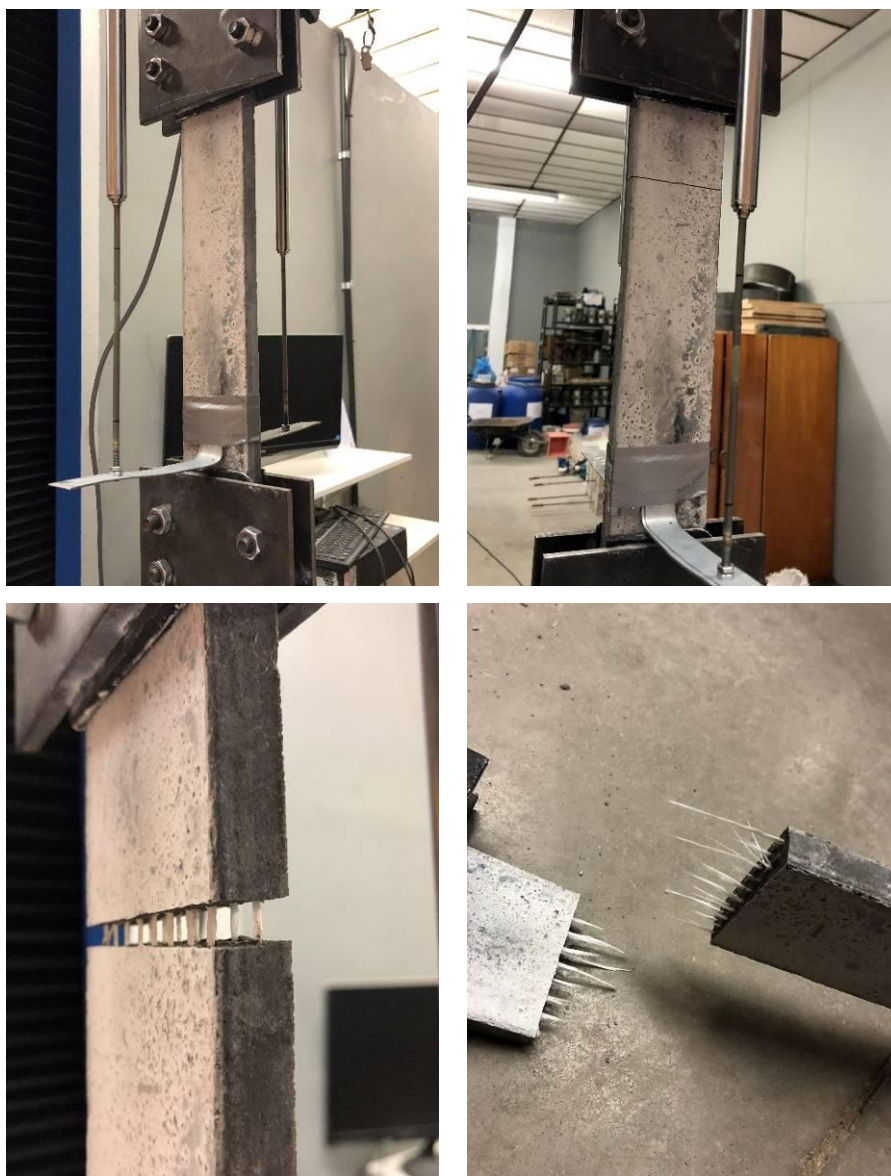
Figura 54 – Ensaio na amostra T-192-7-1



Fonte: Elaborada pelo autor.

Já aos 28 dias de cura, percebe-se evolução nas propriedades mecânicas do compósito. Contudo, como mostra a Figura 55, apenas uma fissura surgiu na amostra. Assim, sua curva tensão vs deformação apresentou apenas duas quedas de carga, uma referente à abertura da fissura e outra referente à ruptura do reforço têxtil.

Figura 55 – Ensaio na amostra T-192-28-1



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em relação ao ensaio realizado aos 56 dias de cura, mostrado na Figura 56, verificou-se um padrão de fissuração: as 13 fissuras visíveis a olho nu estão espaçadas 25 mm em média entre si. O surgimento destas fissuras é claramente identificado na sua curva tensão vs deformação.

Figura 56 – Ensaio na amostra T-192-56-1



Fonte: Elaborada pelo autor.

O aumento da fissuração na idade de 56 dias já era esperado, pois as reações da sílica ativa com a matriz ocorrem em idades avançadas e promovem melhor adesão entre os materiais do compósito, estando de acordo com aquilo que foi apresentado por Peled, Bentur e Mobasher (2017). Entretanto, esperava-se uma quantidade maior de fissuras nas primeiras idades, ainda mais por considerar o uso de cimento CP V de alta resistência inicial.



### 4.3.3 Amostras sem reforço têxtil

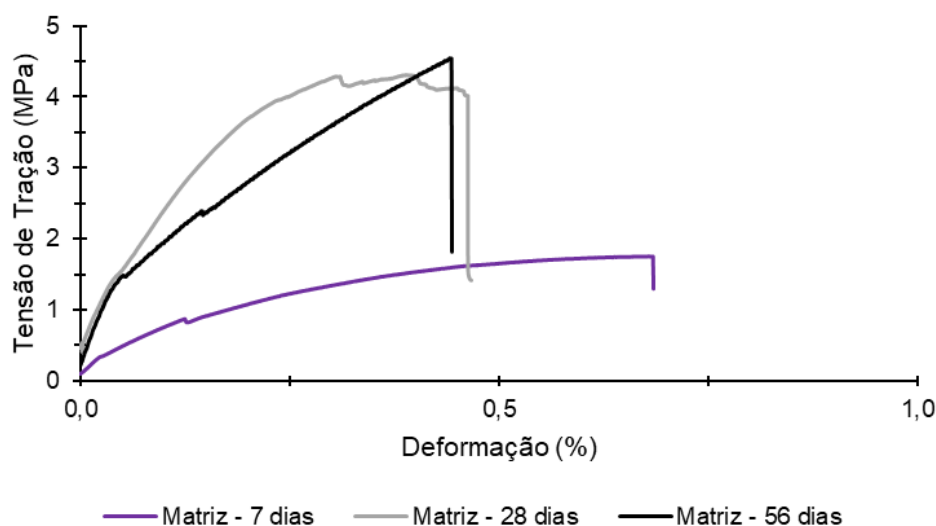
Os resultados dos ensaios realizados nas peças sem reforço têxtil são apresentados na Tabela 14 e na Figura 57. O aumento significativo de resistência à tração entre 7 e 28 dias não condiz com o uso de cimento CP V de alta resistência inicial, como verificado no ensaio de compressão. Além disso, era esperado um maior ganho de resistência entre as idades de 28 e 56 dias, dado o uso da sílica ativa, que apresenta reações tardias de hidratação e ganho de resistência.

Tabela 14 – Tensões e deformações das amostras sem reforço têxtil

Amostra	Tensões e deformações					
	BOP-		BOP+		Pico de carga	
	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$ (%)
T-REF-7-1	-	-	-	-	1,76	0,681
T-REF-28-1	-	-	-	-	4,31	0,390
T-REF-56-1	-	-	-	-	4,55	0,442

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 57 – Curva tensão vs deformação das amostras sem reforço têxtil



Fonte: Elaborada pelo autor.

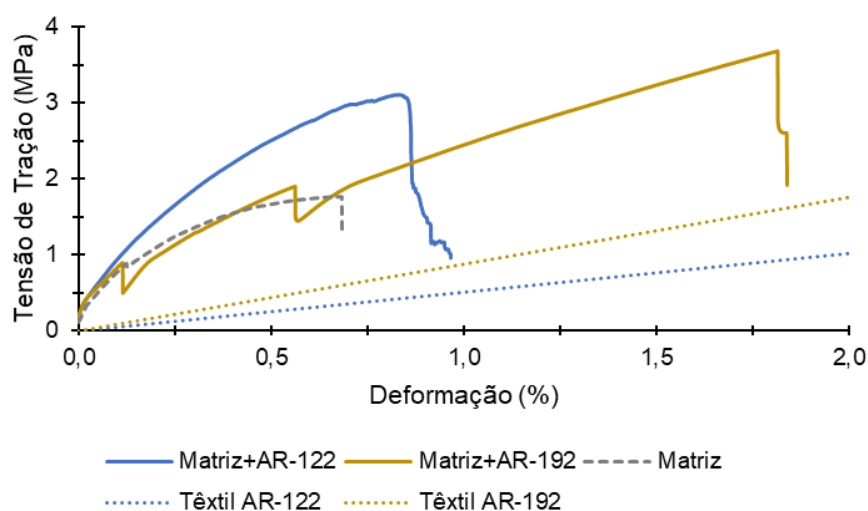
A ruptura brusca, verificada principalmente na amostra ensaiada aos 56 dias, é a que melhor representa o comportamento da matriz. Já as amostras com idade de 7

e 28 dias apresentam maiores deformações. Estas incoerências podem ser em função da dificuldade na realização deste ensaio, sabendo-se que uma pequena avaria no corpo de prova ou falha de instrumentação pode gerar fissuras antes mesmo do ensaio.

#### 4.3.4 AR-122 vs AR-192 vs Matriz

A Figura 58 apresenta a curva tensão vs deformação obtida através do ensaio de tração direta aos 7 dias de cura dos conjuntos estudados, além de mostrar a resistência dos têxteis em si.

Figura 58 – Resultados aos 7 dias dos diferentes reforços têxteis



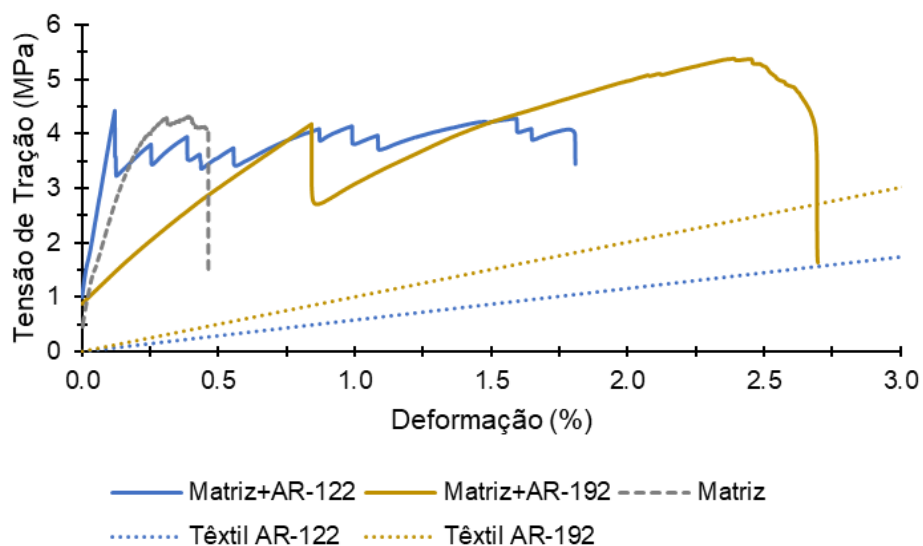
Fonte: Elaborada pelo autor.

Verifica-se que, após a fissuração, o compósito reforçado com o têxtil AR-192 apresenta inclinação similar ao verificado na malha correspondente. A partir do momento em que a matriz atinge o seu limite de deformação, neste caso entre 0,5 e 0,75%, o reforço têxtil passa a agir. Este fato não ocorreu com o compósito reforçado com o têxtil AR-122: os resultados indicam para uma má adesão entre os materiais, visto que o limite de resistência foi atingido já na primeira fissura e a amostra teve praticamente metade da deformação em relação ao compósito AR-192.

Aos 28 dias, os dois compósitos apresentaram pequenos acréscimos de tensões e deformações máximas, como indica a Figura 59. A fissuração da matriz ocorreu praticamente sob as mesmas tensões nas três amostras. Nesta idade,

percebe-se melhora na adesão do têxtil AR-122 com a matriz, visto que houve múltipla fissuração e suporte de tensões sob aumento de deformação.

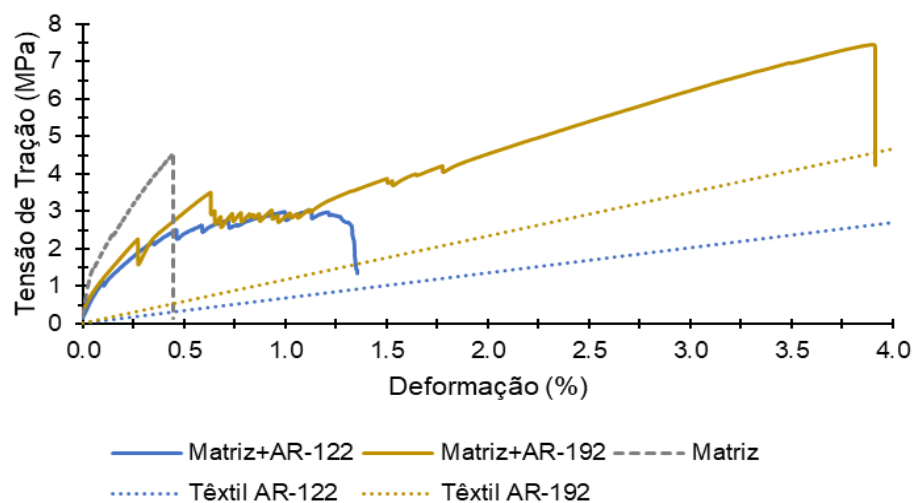
Figura 59 – Resultados aos 28 dias dos diferentes reforços têxteis



Fonte: Elaborada pelo autor.

Aos 56 dias, percebe-se um padrão de fissuração nos dois compósitos estudados, como mostra a Figura 60. A amostra reforçada com o têxtil AR-192 tem as zonas do comportamento típico do concreto têxtil bem definidas, inclusive com inclinação muito semelhante ao tecido, e resistência à tensões e deformações elevadas em relação à última idade ensaiada.

Figura 60 – Resultados aos 56 dias dos diferentes reforços têxteis



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.4 TRAÇÃO NA FLEXÃO

Assim como no ensaio de tração direta, o ensaio de tração na flexão teve falhas em algumas amostras, como indica a 15, que também apresenta os corpos de prova ensaiados no equipamento *MTS Landmark* e possíveis incompatibilidades de resultados.

Tabela 15 – Validade das amostras para ensaio de tração na flexão

Compósito	Idade de ensaio	Número da amostra	Validade do ensaio		Observações
			Válido	Inválido	
Matriz + AR-122	7	F-122-7-2		x	Falha no posicionamento da amostra
	28	F-122-28-1		x	Falha no posicionamento da amostra
		F-122-56-1	x		Ensaiado na máquina MTS
		F-122-56-2	x		Ensaiado na máquina MTS
56	F-122-56-3	x		Ensaiado na máquina MTS	
	Matriz	F-REF-56-1	x		Ensaiado na máquina MTS
		F-REF-56-2	x		Ensaiado na máquina MTS

Fonte: Elaborada pelo autor.

De um total de 24 amostras, duas foram descartadas por terem sido mal posicionadas no equipamento de ensaio e 5 foram ensaiadas no equipamento alternativo, na idade de 56 dias.

#### 4.4.1 Compósito reforçado com tecido AR-122-RA-04

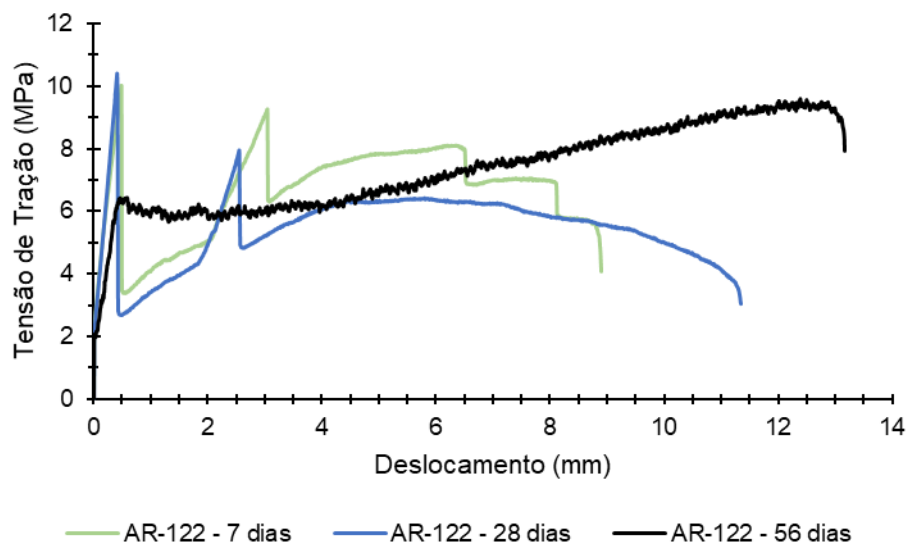
A Tabela 16 mostra os resultados de carga, momento, tensão e deslocamento tanto no momento da primeira fissura como no momento de maior resistência à tração das amostras de concreto têxtil reforçadas com AR-122-RA-04. Já a Figura 61 apresenta uma amostra de cada idade, sendo escolhidas aquelas que atingiram as maiores resistências à tração: F-122-7-1, F-122-28-3 e F-122-56-1.

Tabela 16 – Propriedades na primeira fissura e na resistência máxima das amostras com reforço AR-122

Compósito	Idade de ensaio	Número da amostra	Primeira Fissura			Resistência máxima		
			P (N)	$\sigma$ (MPa)	$\delta$ (mm)	P (N)	$\sigma$ (MPa)	$\delta$ (mm)
Matriz + AR-122	7	F-122-7-1	452,8	10,0	0,48	452,8	10,0	0,48
		F-122-7-3	423,5	8,9	0,46	423,5	8,9	0,46
	28	F-122-28-2	447,2	9,3	0,40	447,2	9,3	0,40
		F-122-28-3	507,2	10,4	0,41	507,2	10,4	0,41
	56	F-122-56-1	338,7	6,4	0,58	505,2	9,6	12,39
		F-122-56-2	275,4	5,2	0,23	323,3	6,1	4,84
		F-122-56-3	302,2	6,4	0,48	430,1	9,1	9,96

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 61 – Curva tensão vs deslocamento das amostras com reforço AR-122

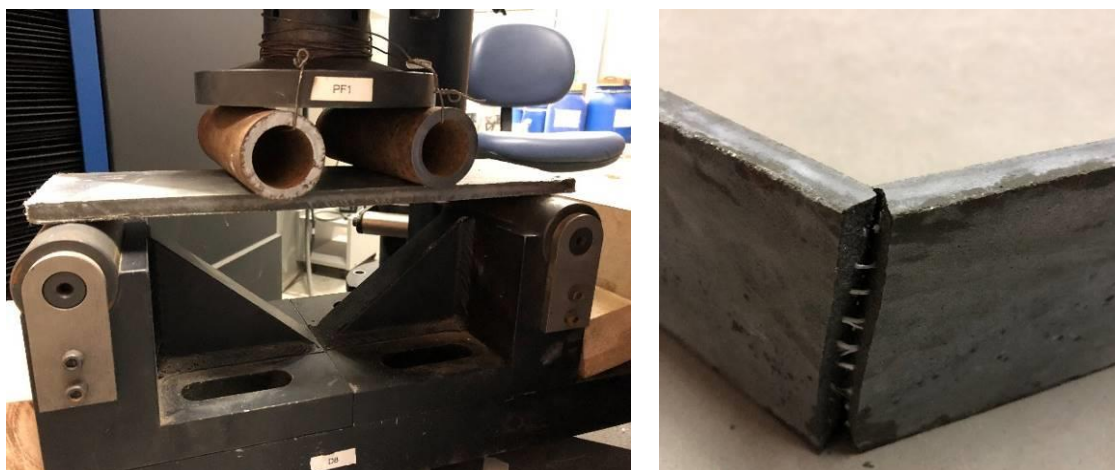


Fonte: Elaborada pelo autor.

Para as amostras de 7 e 28 dias, percebe-se que o pico de carga foi justamente no momento da primeira fissura. Além disso, nestas duas idades o comportamento da curva tensão vs deslocamento foi muito similar. Já a amostra de 56 dias, ensaiada em outra máquina, apresentou comportamento diferente das demais.

O CP F-122-7-1, ensaiado aos 7 dias de cura, apresentou apenas uma fissura, localizada na região de um dos pontos de aplicação de carga, como mostra a Figura 62.

Figura 62 – Ensaio na amostra F-122-7-1



Fonte: Elaborada pelo autor.

Já aos 28 dias de idade, a amostra F-122-28-3 teve duas fissuras, uma em cada ponto de aplicação de carga. A Figura 63 mostra o posicionamento e as fissuras desta amostra.

Figura 63 – Ensaio na amostra F-122-28-3



Fonte: Elaborada pelo autor.

Finalmente, o CP F-122-56-1 teve um padrão de fissuração bem definido: 12 fissuras visíveis a olho nu foram verificadas na zona central da amostra e distantes entre si certa de 9 mm. A Figura 64 apresenta o ensaio desta amostra.

Figura 64 – Ensaio na amostra F-122-56-1



Fonte: Elaborada pelo autor.

Era esperado o surgimento de múltiplas fissuras em todas as amostras. Contudo, esta característica foi verificada apenas aos 56 dias, quando as reações de hidratação ocorreram. Nas demais idades, surgiu apenas uma fissura na região central da amostra aos 7 dias e duas fissuras na região da aplicação de carga aos 28 dias.

#### 4.4.2 Compósito reforçado com tecido AR-192-RA-06

Os ensaios de flexão das amostras reforçadas com o têxtil AR-192-RA-06 foram todos realizados na mesma máquina, sendo que nenhuma amostra foi descartada por falhas de desforma ou instrumentação. A Tabela 17 mostra os resultados obtidos tanto no instante da primeira fissura como na resistência máxima à tração de cada amostra. Contudo, para a representação das curvas tensão vs



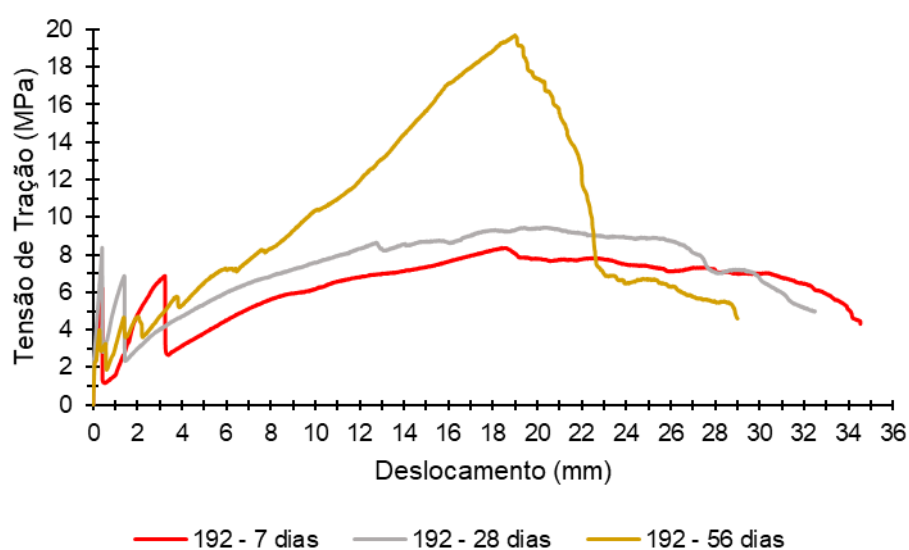
deslocamento (Figura 65), foi escolhida, para cada idade, a amostra que atingiu os melhores resultados: F-192-7-2, F-192-28-1 e F-192-56-2, sendo assim, sua interpretação voltada aos resultados potenciais.

Tabela 17 – Propriedades na primeira fissura e na resistência máxima das amostras com reforço AR-192

Compósito	Idade de ensaio	Número da amostra	Primeira Fissura			Resistência máxima		
			P (N)	$\sigma$ (MPa)	$\delta$ (mm)	P (N)	$\sigma$ (MPa)	$\delta$ (mm)
Matriz + AR-192	7	F-192-7-1	362,9	6,5	0,43	438,9	7,9	18,75
		F-192-7-2	369,9	6,2	0,42	498,8	8,4	18,38
		F-192-7-3	296,8	5,0	0,36	384,2	6,5	27,75
	28	F-192-28-1	413,7	8,4	0,41	467,4	9,5	20,33
		F-192-28-2	431,0	9,0	0,40	431,0	9,0	0,40
		F-192-28-3	446,7	7,4	0,40	446,7	7,4	0,40
	56	F-192-56-1	197,0	4,1	0,27	818,3	17,2	18,77
		F-192-56-2	177,2	4,0	0,28	872,2	19,7	18,98
		F-192-56-3	414,8	9,4	0,40	687,5	15,5	23,21

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 65 – Curva tensão vs deslocamento das amostras com reforço AR-192

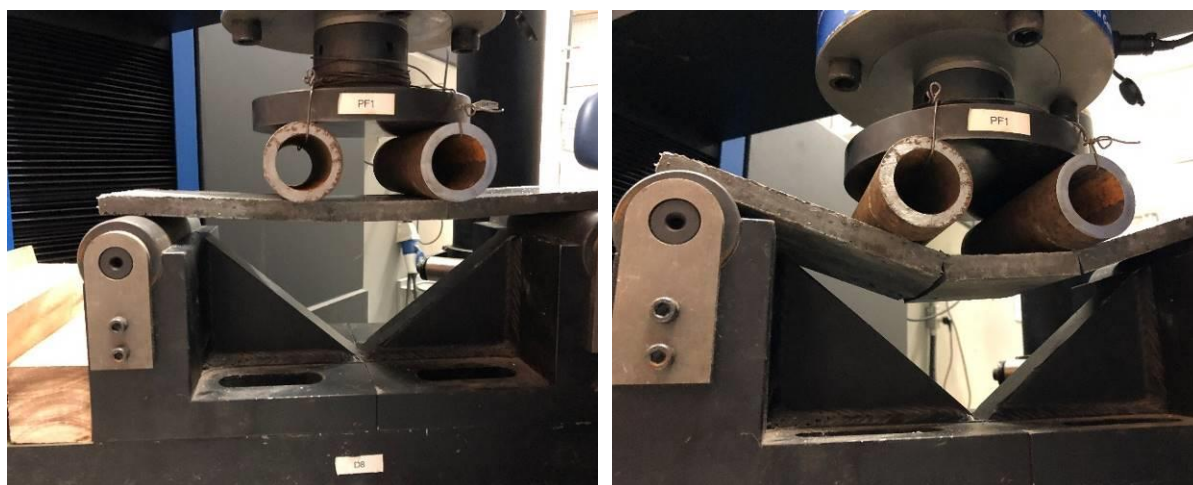


Fonte: Elaborada pelo autor.

Em relação à resistência máxima em que cada amostra representada na Figura 66 atingiu, percebe-se um pequeno ganho entre as idades de 7 e 28 dias. Outrora, os ensaios realizados aos 56 dias apontam para uma grande evolução de resistência à tração do compósito. O maior acréscimo verificado dos 28 aos 56 dias pode ser um indício da participação da sílica ativa no ganho de resistência da matriz, o que era esperado, de acordo com Mechtcherine, Schneider e Brameshuber (2016).

A amostra F-192-7-2, assim como as outras duas ensaiadas aos 7 dias, apresentou apenas fissuras nos dois pontos de aplicação de carga, como indica a Figura 6666.

Figura 66 – Ensaio na amostra F-192-7-2



Fonte: Elaborada pelo autor.

As amostras ensaiadas aos 28 dias também apresentaram o mesmo padrão de fissuração: duas fissuras localizadas logo abaixo do ponto de aplicação de carga. A Figura 67 apresenta a amostra F-192-28-1.

Figura 67 – Ensaio na amostra F-192-28-1



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em relação aos ensaios de 56 dias de cura, verificou-se outro comportamento de fissuração: surgimento de fissuras variadas na região central e mais tracionada das amostras. A Figura 68 mostra o ensaio em andamento na amostra F-192-56-2, na qual teve o aparecimento de 10 fissuras visíveis a olho nu e espaçadas em torno de 14 mm entre si.

Figura 68 – Ensaio na amostra F-192-56-2



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.4.3 Amostras sem reforço têxtil

A resistência à flexão da matriz também foi ensaiada aos 7, 28 e 56 dias. Contudo, os resultados da última idade podem ser divergentes, pois foram ensaiados

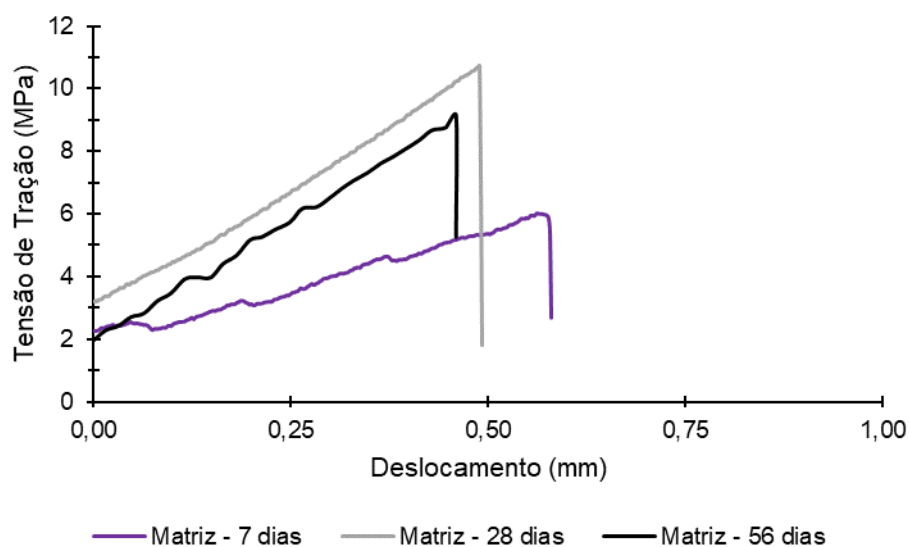
em outro equipamento. A Tabela 18 apresenta a carga, o momento, a tensão de tração e o deslocamento máximo. A Figura 69 ilustra as curvas tensão vs deslocamento de uma amostra por idade de ensaio: F-REF-7-2, F-REF-28-1 e F-REF-56-2.

Tabela 18 – Propriedades no pico de resistência das amostras sem reforço têxtil

Compósito	Idade de ensaio	Número da amostra	Primeira Fissura			Resistência máxima		
			P (N)	$\sigma$ (MPa)	$\delta$ (mm)	P (N)	$\sigma$ (MPa)	$\delta$ (mm)
Matriz	7	F-REF-7-1	-	-	-	136,5	5,4	0,16
		F-REF-7-2	-	-	-	211,7	6,0	0,56
	28	F-REF-28-1	-	-	-	336,5	10,8	0,49
		F-REF-28-2	-	-	-	240,3	6,7	0,32
	56	F-REF-56-1	-	-	-	200,0	5,8	0,22
		F-REF-56-2	-	-	-	320,5	9,1	0,05

Fonte: Elaborada pelo autor.

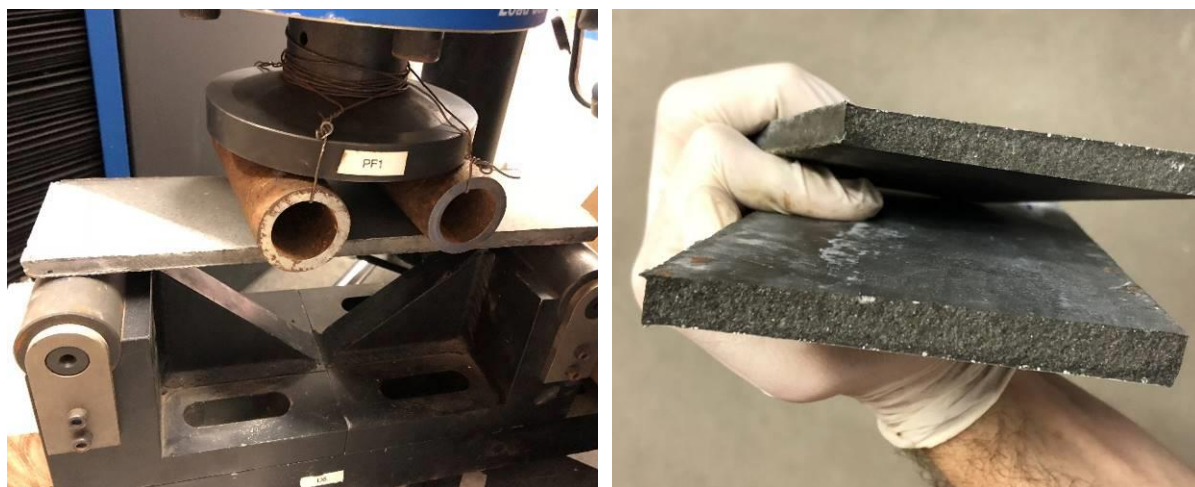
Figura 69 – Curva tensão vs deslocamento das amostras sem reforço têxtil



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 70 mostra o posicionamento de uma das amostras no dispositivo de ensaio, bem como a ruptura frágil das mesmas.

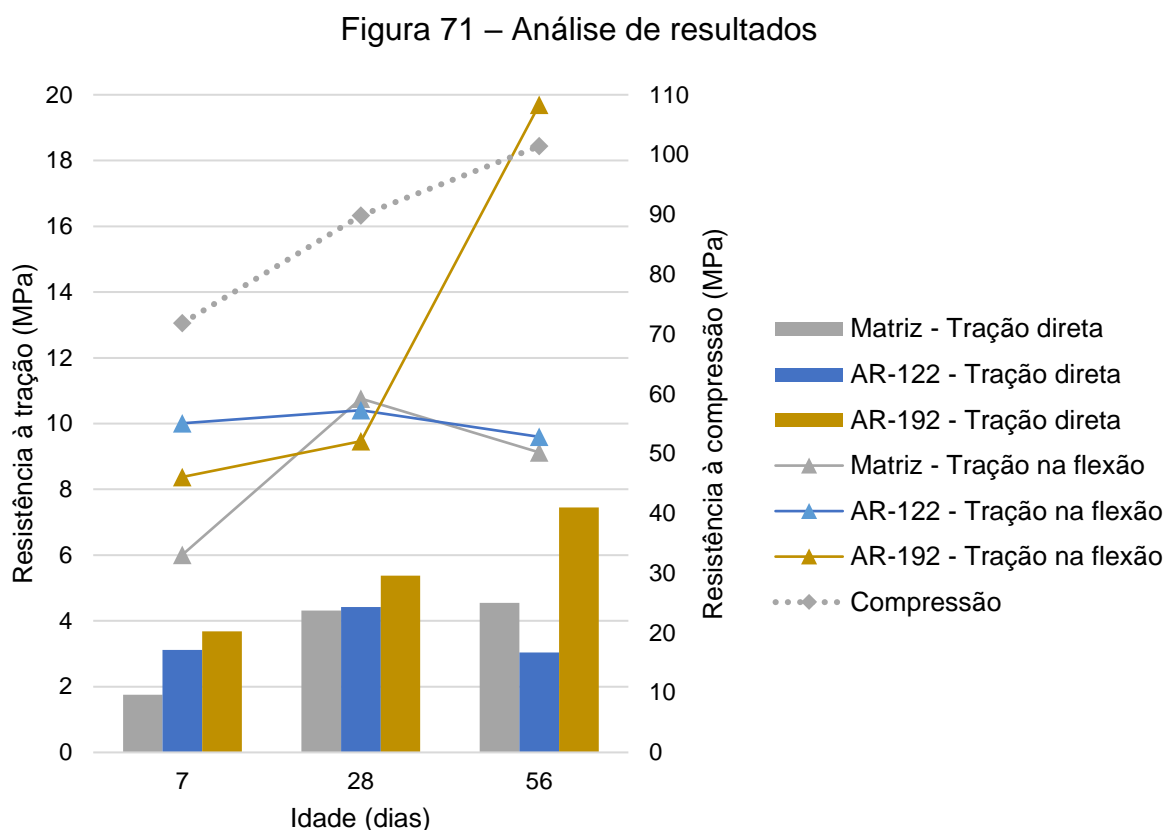
Figura 70 – Ensaio na amostra F-REF-7-2



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5 DISCUSSÃO

A Figura 71 relaciona os resultados dos ensaios de compressão, tração direta e tração na flexão. Percebe-se que a evolução das propriedades mecânicas das amostras de concreto têxtil é orientada principalmente pela resistência mecânica da matriz.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Entre 7 e 28 dias, as resistências à compressão, tração direta e tração na flexão da matriz cresceram praticamente na mesma proporção. Havia a tendência de que essa proporcionalidade fosse mantida entre as idades de 28 e 56 dias. Contudo, os ensaios de tração na flexão e tração direta da matriz foram realizados em um equipamento distinto, prejudicando a análise de resultados nesta idade.

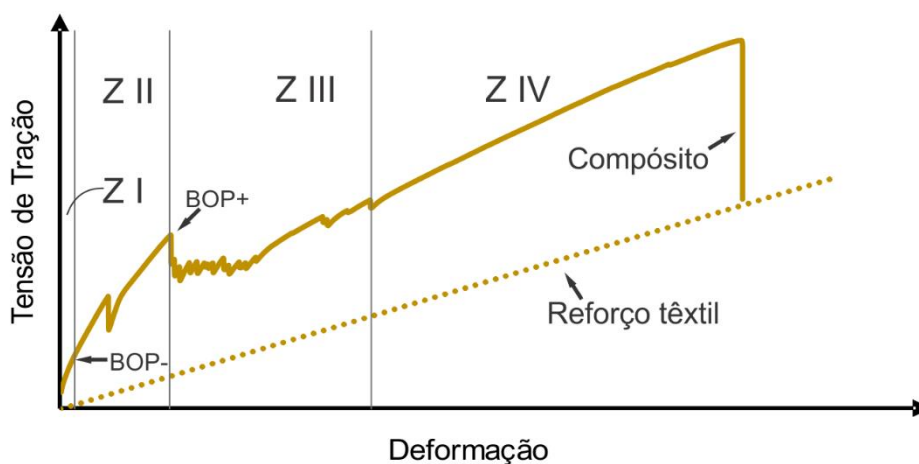
O compósito reforçado com o têxtil AR-192-RA-06 apresentou ganhos de resistência à tração direta e tração na flexão de maneira semelhante à resistência à compressão da matriz. Além disso, a ancoragem das fibras à matriz evoluiu ao longo do tempo, melhorando a adesão entre os materiais. Isto é evidenciado pelo aumento

do número de fissuras e pelas maiores deformações sob altas tensões verificadas nas idades mais avançadas.

Já o reforço têxtil AR-122-RA-04 apresentou ganhos de resistência menos expressivos ao longo do tempo, o que já era esperado, pois sua malha tem abertura de 8x10 mm, praticamente o dobro da abertura do outro reforço analisado, que é de 5x5 mm. Assim, a taxa de reforço da peça de concreto é menor, com menos pontos de ancoragem. Estes resultados concordam com o estudo de Zargarán (2013), no qual o autor constatou que uma malha com abertura de 5x5 mm possuía maior resistência mecânica do que outra malha com abertura de 10x10 mm.

A Figura 72 mostra a identificação dos quatro estágios apontados por Mobasher (2016) em uma típica curva tensão vs deformação de peças de concreto têxtil. Também foram apontados os pontos de inflexão BOP- e BOP+. Para tal, utilizou-se a curva da amostra reforçada com o tecido de fibra de vidro AR-192-RA-06 na idade de 56 dias.

Figura 72 – Identificação das zonas de comportamento



Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, de acordo com Mobasher (2016) e Peled, Bentur e Mobasher (2017), identifica-se a Zona I como sendo a região elástica da matriz. A Zona II corresponde à faixa entre a primeira fissura (BOP-) e o momento em que uma fissura se propaga ao longo de toda seção transversal do corpo de prova (BOP+). A Zona III representa a fase da multifissuração e aumento de tensões e deformações. Por fim, a Zona IV é

caracterizada pelo aumento da espessura das fissuras e a atuação efetiva do reforço têxtil.

Os estudos conduzidos por Colombo et al. (2013) em materiais semelhantes aos utilizados nesta pesquisa indicam valores de resistência à tração direta bastante superiores. As maiores resistências verificadas nos compósitos reforçados com os tecidos fabricados no Brasil, AR-122 e AR-192, foram 4,42 e 7,45 MPa, respectivamente. Já os pesquisadores europeus atingiram, em seus estudos, resistências à tração direta na ordem de 18 MPa.

Os resultados dos ensaios de tração na flexão apontam para concordância com outros pesquisadores: tensões máximas de 9,6 e 19,7 MPa para os reforços AR-122 e AR-192, respectivamente. Volkova et al. (2016) estudaram peças de concreto têxtil reforçadas com fibra de vidro AR e obtiveram resistência à flexão de cerca de 9 MPa. Já Tsesarsky et al. (2015) apud Peled, Bentur e Mobasher (2017) utilizaram sílica ativa na composição da matriz e atingiram 26 MPa.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O concreto têxtil é um compósito com grande potencial para o desenvolvimento de construções com maior durabilidade e sustentabilidade. Na Europa, vem se consolidando no mercado. Por ser um material relativamente novo no Brasil, ainda está na fase de pesquisa, porém já conta com a parceria de algumas empresas privadas para o seu desenvolvimento.

O objetivo deste estudo foi verificar o desempenho mecânico de uma matriz cimentícia reforçada com dois tipos de têxteis de fibra de vidro álcali resistente (AR) produzidos no país. A diferença entre os dois reforços foi a abertura da malha: enquanto que o tecido AR-122-RA-4 possuía abertura de 10x8 mm, o têxtil AR-192-RA-06 tinha abertura da malha de 5x5 mm.

Através de ensaios, foram determinadas propriedades, como a resistência à tração e a deformação, tanto no momento em que a primeira fissura surgia como em seu pico de resistência. Além disso, a verificação da presença ou não de um padrão de fissuração foi outro parâmetro analisado, pois é uma importante característica, além de necessária, para que seja possível projetar elementos de concreto têxtil. O compósito reforçado com o têxtil AR-192-RA-06 atingiu resistência à tração direta de 7,85 MPa sob deformação de 3,90%. Já a sua capacidade de suportar tensões de flexão foi de 19,7 MPa e com flecha de 19 mm. O material reforçado com o tecido AR-122-RA-04 resistiu às tensões menores e teve seu pico associado à resistência da matriz: 4,42 e 10,41 MPa de resistência à tração direta e à flexão, respectivamente, ambas sob deformações baixas.

Através da determinação das propriedades mecânicas, foi possível compreender o comportamento à tração do compósito: existem zonas definidas para as fases elástica da matriz, de fissuração, multifissuração e a fase final onde o compósito se encontra sob altas tensões e deformações. Contudo, nem todas amostras apresentaram todas as fases típicas. Falhas na aderência entre o reforço e a matriz foram verificadas, fazendo com que não fossem atingidas todas as potencialidades do material.

Estudos com materiais similares, principalmente em países europeus, apontam resultados bastante superiores aos encontrados nesta pesquisa. Entretanto, a análise realizada neste estudo não é definitiva, pois são muitas as variáveis envolvidas: composição da matriz, tipo de fibra, abertura da malha, quantidade de

camadas, compatibilidade química entre os materiais, entre outros Assim, sugere-se a realização de novos estudos mais aprofundados sobre a composição destes e outros tecidos produzidos no Brasil, de modo a alavancar o uso do concreto têxtil no país.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 13934**: Têxteis - Propriedades de tração de tecidos - Parte 1: Determinação da força máxima e alongamento à força máxima utilizando o método de tira. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 12546**: Materiais têxteis - Ligamentos fundamentais de tecidos planos: terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2017a.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2017b.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018b.

BAUNETZ WISSEN. **Fußgängerbrücke in Oschatz**. Berlim, 2018. Disponível em: <<https://www.baunetzwissen.de/beton/objekte/oeffentlicher-raum/fussgaengerbruecke-in-oschatz-69960>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

BOURNAS, D. Strengthening of existing structures: Selected case studies. In: TRIANTAFILLOU, T. **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. 1. ed. Duxford: Woodhead Publishing, 2016. p. 389-411.

BRAMESHUBER, Wolfgang; BROCKMANN, Tanja. **Report 36**: Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC. Paris: Rilem Publications, 2006.

BROCKMANN, Tanja; BRAMESHUBER, Wolfgang. **Mechanical and fracture mechanical properties of fine grained concrete for textile reinforced composites**. Fakultät für Bauingenieurwesen, 2006.

BUTLER, Marko; MECHTCHERINE, Viktor; HEMPEL, Simone. 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. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-010-9586-8>>. Acesso em: 4 jul. 2018.

COLOMBO, Isabela Giórgia et al. Erratum to: Textile Reinforced Concrete: experimental investigation on design parameters. **Materials and Structures**, v. 46, n. 11, p. 1953–1971, 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-013-0023-7>>. Acesso em: 4 jun. 2018.

DENARDI, Aline. **Concreto têxtil**: Uma revisão bibliográfica sobre desenvolvimentos, aplicações e perspectivas de estudos e empregos no Brasil. 2016. 106 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

FERREIRA, André Viola; ZANCUL, **Eduardo**. **Estudo sobre produtividade na construção civil**: desafios e tendências no Brasil. São Paulo: Ernest & Young, 2016. Disponível em: <[http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY\\_Estudo\\_Produtividade\\_na\\_Construcao\\_Civil/\\$FILE/Estudo\\_Real\\_Estate.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY_Estudo_Produtividade_na_Construcao_Civil/$FILE/Estudo_Real_Estate.pdf)>. Acesso em: 29 mar. 2018.

GRIES, T. et al. Manufacturing of textiles for civil engineering applications. In: TRIANTAFILLOU, T. **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. 1. ed. Duxford: Woodhead Publishing, 2016. p. 3-24.

GRIES, T.; OFFERMANN, P.; PELED, A. **Introduction - Report 36**: Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC. Paris: Rilem Publications, 2006. p. 11-27.

HAJEK, Petr. Concrete structures for sustainability in a Changing World. **Procedia Engineering**, v. 171, p. 207–214, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817303387>>. Acesso em: 15 abr. 2018.

HEGGER, J. et al. **Applications of textile reinforced concrete - Report 36**: Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC. RILEM publications, p. 237-266, 2006a. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-005-9039-y>>. Acesso em: 29 mar. 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, 2006b. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-005-9039-y>>. Acesso em: 29 mar. 2018.

HERING ARCHITECTURAL CONCRETE. **References**. Burbach, 2018. Disponível em: <<https://www.heringinternational.com/en/products-services/architectural-concrete/reference-projects>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

HINZEN, M.; BRAMESHUBER, W. Improvement of serviceability and strength of Textile Reinforced Concrete by using short fibres. In: **4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4)**. 2009.

LIEBOLDT, M.; HELBIG, U.; ENGLER, T. Textile reinforced concrete multilayer composite pipes. In: **ICTRC'2006-1st International RILEM Conference on Textile Reinforced Concrete**. Paris: Rilem Publications, 2006. p. 369-378.

MAMLOUK, Michael S.; ZANIEWSKI, John P. **Materials for Civil and Construction Engineers**. Nova Iorque: McGraw-Hill Education, 2014.

MECHTCHERINE, V.; SCHNEIDER, L.; BRAMESHUBER, W. Mineral-based matrices for textile-reinforced concrete. In: TRIANTAFILLOU, T. **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. 1. ed. Duxford: Woodhead Publishing, 2016. p. 25-43.

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p.

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.

MOBASHER, B. et al. Thermal and mechanical characterization of contiguous wall systems for energy efficient low-cost housing. In: **ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability**. American Society of Mechanical Engineers, 2011. p. 1909-1915.

MOBASHER, B. Textile fiber composites: Testing and mechanical behavior. In: TRIANTAFILLOU, T. **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. 1. ed. Duxford: Woodhead Publishing, 2016. p. 101-150.

MOHAMMADHOSSEINI, Hossein et al. Durability performance of green concrete composites containing waste carpet fibers and palm oil fuel ash. **Journal of Cleaner Production**, v. 144, p. 448–458, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616322144>>. Acesso em: 15 abr. 2018.

MORASSUTTI, Daniel Salvadori. **Passarela em concreto armado e concreto têxtil: comparativo entre metodologias de dimensionamento**. 2016. 81 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

PELED, A.; BENTUR, A.; MOBASHER, B. **Textile Reinforced Concrete**. 1. ed. Oxfordshire: Taylor & Francis, 2017. 473 p.

QUININO, Uziel Cavalcanti de. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. 2015. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2015.

RAUPACH, M.; CRUZ, C. Textile-reinforced concrete: Selected case studies. In: TRIANTAFILLOU, T. **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. 1. ed. Duxford: Woodhead Publishing, 2016. p. 275-299.

RAZ, S. **The Karl Mayer Guide to Technical Textiles**. Obertshausen: Karl Mayer Textilmaschinenfabrik, 2000.

REINHARDT, H. et al. **Composite materials - Report 36: Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC**. Paris: Rilem Publications, 2006.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE 232-TDT. 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**, v. 49, p. 4923-4927, 2016.

SCHEERER, S.; SCHLADITZ, F.; CURBACH, M. Textile reinforced concrete—from the Idea to a high performance material. **Proceedings of the FERRO-11 and 3rd ICTRC in Aachen**. Paris: Rilem Publications, 2015. p. 15-33

SIDDIQUE, Rafat; KLAUS, Juvas. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. **Applied Clay Science**, v. 43, n. 3-4, p. 392-400, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131708002706>>. Acesso em: 29 mar. 2018.

SOLIDIAN. **Textile-reinforced concrete is opening new avenues for design**. Albstadt, 2018. Disponível em: <<https://www.solidian.com/en/textile-reinforced-concrete/formability>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

SORANAKOM, C.; MOBASHER, B. Correlation of tensile and flexural responses of strain softening and strain hardening cement composites. **Cement and concrete Composites**, v. 30, n. 6, p. 465-477, 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946508000152>>. Acesso em: 15 abr. 2018.

TRIANAFILLOU, T. **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. 1. ed. Duxford: Woodhead Publishing, 2016. 452 p.

VLACH, T. et al. Soft Insert for Support Modeling of Slightly Textile Reinforced Concrete. In: **Key Engineering Materials**. Trans Tech Publications, 2018. p. 158-163.

VOLKOVA, Anna et al. Flexural Behavior of Textile-Reinforced Concrete. In: **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences, 2016. p. 01016.

ZARGARAM, Mojdeh. **Effect of fabric layer and mesh size on the bending performance of textile reinforced concrete**. Apr. 2013. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/272328202\\_Effect\\_of\\_fabric\\_layer\\_and\\_mesh\\_size\\_on\\_the\\_bending\\_performance\\_of\\_textile\\_reinforced\\_concrete](https://www.researchgate.net/publication/272328202_Effect_of_fabric_layer_and_mesh_size_on_the_bending_performance_of_textile_reinforced_concrete)>. Acesso em: 15 abr. 2018.