

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

**RODRIGO DE MAMAN RIBEIRO**

**CARACTERIZAÇÃO DE BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS  
DE VIDRO E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ELÁSTICO EM FUNÇÃO DO  
DIÂMETRO NAS TEMPERATURAS AMBIENTE E DE TRANSIÇÃO VÍTREA**

**SÃO LEOPOLDO**

**2018**

Rodrigo de Maman Ribeiro

CARACTERIZAÇÃO DE BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE  
VIDRO E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ELÁSTICO EM FUNÇÃO DO  
DIÂMETRO NAS TEMPERATURAS AMBIENTE E DE TRANSIÇÃO VÍTREA

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

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Mancio

São Leopoldo

2018

## RESUMO

A utilização de materiais não metálicos como reforço de estruturas de concreto armado visa aumentar a durabilidade da construção, considerando a corrosão do aço o principal problema que afeta a vida útil projetada nas obras que se utilizam desse material, principalmente quando inseridas em regiões com ambiente potencialmente agressivo, que propiciam aceleração da corrosão. Assim, muitos materiais vêm ganhando cada vez mais notoriedade como reforço de estruturas de concreto armado, frente às armaduras tradicionais de aço, como as barras de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP – Glass Fiber Reinforced Polymer), recebendo, inclusive, espaço no comércio varejista nacional, sem dispor de uma base de conhecimento necessária para caracterização e dimensionamento dessas estruturas no país. Nesse sentido, este trabalho visa caracterizar esse tipo de barra e analisar o comportamento elástico em função do diâmetro nas temperaturas ambiente e de transição vítrea, sendo fatores que divergem do comportamento conhecido de barras metálicas. A utilização de análises térmicas e ensaios de tração adaptados com âncoras para aferir tais propriedades se mostrou satisfatória, e a caracterização se apresentou conforme referências do fabricante, enquanto que, no ensaio de tração em temperatura ambiente, foi possível observar uma tendência de diminuição do módulo de elasticidade conforme aumenta o diâmetro da barra, devido a um corte de cisalhamento que ocorre na seção transversal. A mesma tendência foi possível de ser observada também no ensaio com exposição à temperatura de transição vítrea, no qual ainda foi notada uma diminuição em relação ao módulo de elasticidade aferido no ensaio realizado em temperatura ambiente. Observa-se que muitas pesquisas ainda são necessárias nesse novo material, principalmente em âmbito nacional, tanto em relação à sua composição quanto às propriedades mecânicas e desempenho em serviço, principalmente sob elevadas temperaturas.

**Palavras-chave:** GFRP. Módulo de elasticidade. Resistência à tração. Materiais compósitos. Barra.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de classificação de compósitos.....	14
Figura 2 – Representação esquemática da seção transversal de barra de FRP .....	15
Figura 3 – Montagem do teste.....	23
Figura 4 – (a) Fixação montada e amostra cortada; (b) Corpo principal desmontado .....	23
Figura 5 – (a) Seção transversal da amostra; (b) Configuração do teste de flexão...24	
Figura 6 – Esquema geral dos adaptadores – Lado (a) .....	25
Figura 7 – (a) Detalhe da ancoragem; (b) Instalação em segmento de grade .....	26
Figura 8 – Instalação de armadura da camada superior de plataforma de ponte em GFRP .....	28
Figura 9 – Construção do edifício hospitalar em San Antonio / Texas .....	28
Figura 10 – Ressonância Magnética do Sul do Texas ( <i>MRI - Magnetic Resonance Imaging</i> ), em San Antonio / Texas .....	29
Figura 11 – <i>Emma Park Bridge</i> - Utah .....	29
Figura 12 – Muro de proteção de rodovia com barras GFRP - Maui/Havaí .....	30
Figura 13 – Ponte de pedestres e ciclistas em Rhyl / País de Gales .....	30
Figura 14 – Representação esquemática estruturas moleculares (a) linear, (b) ramificada, (c) com ligações cruzadas, (d) em rede.....	31
Figura 15 – Variação de volume específico com o aumento da temperatura.....	35
Figura 16 – Curva de TGA para reação de decomposição térmica em uma etapa...38	
Figura 17 – Curva de TGA (linha tracejada) e DTG (linha sólida) para reação de decomposição térmica em uma etapa.....	39
Figura 18 – Curva de DSC de fluxo de calor.....	41
Figura 19 – Curvas típicas de tensão-deformação para alguns compósitos .....	42
Figura 20 – Vista esquemática do processo de pultrusão.....	44
Figura 21 – Tratamentos superficiais .....	48
Figura 22 – Barras de FRP com tubos de aço divididos presos nas extremidades...51	
Figura 23 – Modo de falha típico das barras de GFRP .....	51
Figura 24 – Detalhe do segmento de uma das amostras.....	58
Figura 25 – Fluxograma do programa experimental.....	59
Figura 26 – Foto da amostra de GFRP - detalhe nas regiões onde foram coletados materiais para as análises.....	60

Figura 27 – Foto da amostra de GFRP (a) Detalhe nas regiões onde foram coletados materiais para as análises; (b) Detalhe seção transversal preparada.....	61
Figura 28 - Amostras utilizadas nos ensaios de tração .....	62
Figura 29 – Máquina de teste de tração .....	63
Figura 30 – Máquina de teste de tração com forno .....	68
Figura 31 – Amostra 4.3 – Modo de falha .....	78
Figura 32 – Amostra 4.4 – Modo de falha .....	79
Figura 33 – Amostra 6.3 – Modo de falha (nas duas ancoragens).....	80
Figura 34 – Amostra 6.4 – Modo de falha (nas duas ancoragens).....	81
Figura 35 – Amostra 8.3 – Modo de falha .....	82
Figura 36 – Amostra 8.4_ Modo de falha .....	83
Figura 37 – Amostra 12,5.3 – Modo de falha .....	84
Figura 38 – Amostra 12,5.4 – Modo de falha .....	85
Figura 39 – Amostra 14.2 – Modo de falha .....	86
Figura 40 – Amostra 14.3_ Modo de falha .....	87
Figura 41 – Representação esquemática do comportamento das tensões na seção transversal das barras de GFRP .....	90
Figura 42 – Amostra 4.2 – Modo de falha .....	95
Figura 43 – Amostra 6.2 – Modo de falha .....	96
Figura 44 – Amostra 8.2 – Modo de falha .....	97
Figura 45 – Amostra 12,5.2 – Modo de falha .....	98
Figura 46 – Amostra 14.4_ Modo de falha .....	99
Figura 47 – Amostra 8,00mm após ensaio, com vista interna do forno utilizado.....	100
Figura 48 – Amostra Ø10,00mm ensaiada sem ancoragem .....	110
Figura 49 – Tubos de aço Ø1” e comprimento 7,00cm .....	111
Figura 50 – Ancoragens prontas para instalação .....	112
Figura 51 – Estrutura de madeira para alinhamento da ancoragem .....	112
Figura 52 – Estrutura de madeira para alinhamento da ancoragem .....	113
Figura 53 – Resina <i>Compound® Adesivo</i> .....	114
Figura 54 – Cura final da resina de base epóxi .....	114
Figura 55 – Ancoragem finalizada .....	115
Figura 56 – Representação de amostra de teste com tubos de aço .....	116
Figura 57 – Curvas tensão/deformação típica para diferentes materiais metálicos	117

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva TGA/DTG da amostra de Barra de Polímero reforçado com Fibras de Vidro (GFRP).....	72
Gráfico 2 – Curva TGA da amostra de Barra de Polímero reforçado com Fibras de Vidro (GFRP).....	74
Gráfico 3 – Curva TGA/DTG da amostra de Barra de Polímero reforçado com Fibras de Vidro (GFRP).....	75
Gráfico 4 – Amostra 4.3 – Gráfico tensão/deformação .....	78
Gráfico 5 – Amostra 4.4 – Gráfico tensão/deformação .....	79
Gráfico 6 – Amostra 6.3 – Gráfico tensão/deformação .....	80
Gráfico 7 – Amostra 6.4 – Gráfico tensão/deformação .....	81
Gráfico 8 – Amostra 8.3 – Gráfico tensão/deformação .....	82
Gráfico 9 – Amostra 8.4_ Gráfico tensão/deformação .....	83
Gráfico 10 – Amostra 12,5.3 – Gráfico tensão/deformação .....	84
Gráfico 11 – Amostra 12,5.4 – Gráfico tensão/deformação .....	85
Gráfico 12 – Amostra 14.2 – Gráfico tensão/deformação .....	86
Gráfico 13 – Amostra 14.3_ Gráfico tensão/deformação .....	87
Gráfico 14 – Curva de DSC do primeiro aquecimento da Barra de Polímero reforçado com Fibra de Vidro (GFRP).....	92
Gráfico 15 – Curva de DSC do resfriamento e segundo aquecimento da Barra de Polímero reforçado com Fibra de Vidro (GFRP) .....	92
Gráfico 16 – Curva DSC da amostra de Barra de Polímero reforçado com Fibras de Vidro (GFRP).....	93
Gráfico 17 – Amostra 4.2 – Gráfico tensão/deformação .....	95
Gráfico 18 – Amostra 6.2 – Gráfico tensão/deformação .....	96
Gráfico 19 – Amostra 8.2 – Gráfico tensão/deformação .....	97
Gráfico 20 – Amostra 12,5.2 – Gráfico tensão/deformação .....	98
Gráfico 21 – Amostra 14.4_ Gráfico tensão/deformação .....	99
Gráfico 22 – Linhas de tendência dos respectivos módulos de elasticidade.....	118

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Onde se deve considerar a utilização de barras de polímero reforçado com fibras.....	16
Quadro 2 - Propriedades típicas de tração de barras de reforço.....	49
Quadro 3 – Organização das amostras da pesquisa .....	65
Quadro 4 – Amostra 4.3 – Dados do ensaio .....	78
Quadro 5 – Amostra 4.4 – Dados do ensaio .....	79
Quadro 6 – Amostra 6.3 – Dados do ensaio .....	80
Quadro 7 – Amostra 6.4 – Dados do ensaio .....	81
Quadro 8 – Amostra 8.3 – Dados do ensaio .....	82
Quadro 9 – Amostra 8.4_Dados do ensaio .....	83
Quadro 10 – Amostra 12,5.3 – Dados do ensaio .....	84
Quadro 11 – Amostra 12,5.4 – Dados do ensaio .....	85
Quadro 12 – Amostra 14.2 – Dados do ensaio .....	86
Quadro 13 – Amostra 14.3_Dados do ensaio .....	87
Quadro 14 – Resumo dos módulos de elasticidade .....	89
Quadro 15 – Amostra 4.2 – Dados do ensaio .....	95
Quadro 16 – Amostra 6.2 – Dados do ensaio .....	96
Quadro 17 – Amostra 8.2 – Dados do ensaio .....	97
Quadro 18 – Amostra 12,5.2 – Dados do ensaio .....	98
Quadro 19 – Amostra 14.4_Dados do ensaio .....	99
Quadro 20 – Resumo dos módulos de elasticidade .....	101

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA .....	11
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	12
1.3 OBJETIVOS .....	12
<b>1.3.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>12</b>
<b>1.3.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>12</b>
<b>2. COMPÓSITOS DE FRP</b> .....	<b>14</b>
2.1. EVOLUÇÃO DOS PRODUTOS COMPÓSITOS DE FRP .....	16
2.2. PADRONIZAÇÃO E ENSAIOS .....	20
<b>2.2.1. Normalização</b> .....	<b>22</b>
2.3. CONSTRUÇÕES COM FRP .....	27
2.4. POLÍMEROS: CONCEITOS BÁSICOS .....	31
<b>2.4.1. Análises térmicas</b> .....	<b>36</b>
2.4.1.1. Análise termogravimétrica (TGA) e Análise termogravimétrica derivada (DTG) .....	36
2.4.1.2. Calorimetria diferencial de varredura (DSC).....	40
2.5. FIBRAS DE REFORÇO.....	41
2.6. PULTRUSÃO .....	43
2.7. COMPORTAMENTO MECÂNICO .....	45
<b>2.7.1. Aderência</b> .....	<b>47</b>
<b>2.7.2. Compressão</b> .....	<b>48</b>
<b>2.7.3. Resistência à tração</b> .....	<b>49</b>
<b>2.7.4. Cisalhamento</b> .....	<b>51</b>
<b>2.7.5. Vida útil</b> .....	<b>52</b>
<b>2.7.6. Recomendações de projeto</b> .....	<b>53</b>
<b>2.7.7. Comportamento em temperaturas elevadas</b> .....	<b>55</b>
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>58</b>
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DAS BARRAS DE GFRP .....	60
3.2. COMPORTAMENTO ELÁSTICO NA TRAÇÃO – TEMPERATURA AMBIENTE .....	61
3.3. COMPORTAMENTO ELÁSTICO NA TRAÇÃO – TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA .....	67

<b>4. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>71</b>
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DAS BARRAS DE GFRP.....	71
4.2. COMPORTAMENTO ELÁSTICO NA TRAÇÃO – TEMPERATURA AMBIENTE .....	77
4.3. COMPORTAMENTO ELÁSTICO NA TRAÇÃO – TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTEA .....	91
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>103</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>105</b>
<b>APÊNDICE A – ANCORAGEM PARA ENSAIO DE TRAÇÃO .....</b>	<b>110</b>
<b>APÊNDICE B – ANÁLISE COMPARATIVA COM MATERIAL METÁLICO.....</b>	<b>117</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Mehta e Monteiro (2008) relatam que, apesar dos danos em estruturas de concreto armado estarem geralmente vinculados a mais de um motivo, já é de conhecimento prático que a corrosão da armadura é a principal causa de deterioração dessas estruturas, seguida de outros mecanismos tais como reação álcali-silica e ataque por sulfatos, entre outros.

Em situações habituais, a alcalinidade do concreto promove uma proteção à armadura de aço, garantindo que não irá ocorrer oxidação. Entretanto, principalmente em construções localizadas em ambientes potencialmente agressivos, como regiões litorâneas onde há grande exposição à cloretos, ou estruturas rodoviárias localizadas em países frios (onde é lançado sal na faixa de rolamento para diminuição da temperatura de fusão da água e derretimento da camada de gelo formada nos períodos mais frios do ano), ou em estruturas expostas a altas concentrações de CO<sub>2</sub>, as reações que surgem nesses casos podem reduzir a alcalinidade do concreto, retirando a proteção inicial e ocasionando a corrosão das armaduras, o que acarreta em onerosas despesas para manutenção, e, em última análise, pode vir a causar desfragmentação do concreto por pressão interna do produto do processo da corrosão. (ACI 440.1R, 2015).

Diante disso, com a intenção de se aproveitar das ótimas propriedades encontradas nos compósitos de polímero reforçado com fibras (denominados FRP - *Fiber Reinforced Polymer*), como a elevada relação resistência/peso, resistência à corrosão, e não condutibilidade térmica e elétrica, a utilização desse material vem ganhando cada vez mais espaço na construção civil. (ACI 440R, 2007).

Nas áreas das indústrias aeroespacial, marítima, elétrica, automotiva e outras, pode-se considerar que os compósitos de FRP representaram uma revolução, por apresentarem propriedades que se opunham a alguns princípios conhecidos de comportamentos que eram notados nos materiais isoladamente. Assim, tal como fez nesses outros mercados, os compósitos de FRP podem realizar uma transformação também nos segmentos de arquitetura e construção, contanto que saiba se aproveitar de suas potenciais vantagens. (ACMA, 2016).

Entretanto, para conseguir viabilizar a utilização segura de compósitos de FRP na construção civil, é primordial que a implementação desse material seja acompanhada de pesquisas para que se promova um maior nível de entendimento

dos engenheiros, operários, auditores, e demais trabalhadores da construção civil, sobre os vários aspectos relevantes da tecnologia e da prática dos FRP. (BAKIS et al. 2002). Pois, embora existam algumas orientações para projeto em âmbito internacional, novos produtos continuam a ser desenvolvidos, e os processos atuais também recebem constante revisão. (ACI 440R, 2007).

Dentre alguns aspectos relevantes e imprescindíveis de serem considerados pelos projetistas quando optarem por utilizar as barras de polímero reforçado com fibras de vidro está o fato que, em contraponto ao aço, onde a resistência à tração cresce linearmente com o aumento do diâmetro da barra e o módulo de elasticidade permanece constante, nas barras de compósitos de polímero reforçado com fibras de vidro, tanto a resistência à tração quanto o módulo de elasticidade à tração são parâmetros significativamente influenciados pelo diâmetro da barra. (ACI 440R, 2007; ACI 440.1R, 2015).

Outro ponto importante para os materiais de construção civil é o comportamento em situações de incêndio, o qual vem ganhando cada vez mais exposição principalmente desde janeiro de 2013, quando, como relata Schuquel (2018), há cinco anos, um incêndio em uma casa noturna de Santa Maria/RS se transformou em uma das maiores tragédias do Brasil, com 242 mortes e mais de 600 feridos.

Tema esse que voltou ao foco das mídias, não somente na esfera da engenharia, com o recente desabamento de um prédio no centro de São Paulo/SP, conforme descreve Galvão (2018), após um incêndio causado por um curto-circuito no 5º andar de um prédio composto de 24 andares.

Assim, na área da engenharia, como relata Correia et al. (2010), é requerido que os materiais de construção civil tenham uma reação ao fogo apropriada, de modo que evite a ignição do fogo, a geração ou aumento excessivo de fumaça ou a propagação da chama, e, quando utilizados em funções estruturais, também é necessário que os materiais empregados apresentem resistência ao fogo, de modo a evitar o colapso estrutural por tempo suficiente para que se possibilite a total evacuação do local. Entretanto, em um ambiente com elevada temperatura, o comportamento de uma estrutura de concreto armado com barras de FRP ainda não é bem conhecido (CORREIA et al., 2010).

Além disso, o conhecimento do comportamento dos materiais em temperaturas elevadas, também é bastante válido para que se consiga garantir o

cumprimento dos parâmetros definidos em cada região pelos requisitos dos códigos de construções, levando em consideração a localização geográfica das obras. (ABBASI; HOGG, 2005).

### 1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA

Atualmente, o Brasil já dispõe de empresas que fabricam materiais compósitos, e dentre eles, um dos produtos já presentes são as barras de polímero reforçado com fibras de vidro para armadura de concreto, estando disponível, inclusive, de se adquirir tal produto no mercado varejista nacional. Ao passo que, o conhecimento técnico vigente para aplicação desse material, no Brasil, ainda está em fase embrionária, haja vista a falta de informação local sobre o tema, e a ausência de normas, e de prescrições nacionais para métodos de caracterização e ensaios dessas barras.

O Sistema Nacional de Avaliação Técnica de Produtos Inovadores e Sistemas Convencionais (SiNAT), que é parte da estrutura do Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H), descreve em seu regimento (2016, p. 9), que é considerado produto inovador o material “[...] que não seja objeto de Norma Brasileira elaborada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) ou outra entidade credenciada pelo Conselho Nacional de Metrologia [...]”. Conceito esse que é possível de se utilizar para o material de estudo dessa pesquisa.

Nesse sentido, o tema se justifica no objetivo de buscar agregar ao conhecimento vigente desses materiais, que já estão inseridos no mercado varejista nacional, mesmo sem dispor, no Brasil, de itens como base de cálculo para projeto, boas práticas de construção ou análises de vida útil.

O que justifica, também, o fato de ter se buscado realizar a pesquisa com materiais produzidos e disponibilizados no Brasil, abordando temas relatados em bibliografias, que divergem do habitual comportamento das armaduras de aço, sendo eles, além da caracterização para maior familiarização do material, a análise do comportamento elástico em função do diâmetro nas temperaturas ambiente e de transição vítrea, para que se possa vir a ponderar também tais observações na previsão de utilização desse material, além de se fomentar novas pesquisas de investigação das potenciais vantagens e desvantagens que se pode conseguir

utilizando barras de polímero reforçado com fibras de vidro em armadura de estruturas de concreto.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O tema pesquisado foi a caracterização de barras de polímero reforçado com fibras de vidro e análise do comportamento elástico na tração, em função do diâmetro das barras, nas temperaturas ambiente e de transição vítrea, levando em consideração, na análise dos resultados, as adaptações realizadas durante os ensaios, pelo fato de não ter sido objetivo dessa pesquisa a análise das barras inseridas em corpos de prova de concreto.

O material foco desse estudo, como já mencionado, foram barras de polímero tipo vinil éster reforçado com fibras de vidro, entretanto, significativa parte da bibliografia referencia esse tipo de material pelo grande grupo dos compósitos de FRP, tanto na questão histórica, quanto em algumas propriedades, fato que enriqueceu o referencial teórico apresentado, pois, por vezes, não foi possível abordar temas importantes sem referenciar outros tipos de produtos como chapas de duas dimensões utilizadas para fortalecimento externo de estruturas.

## 1.3 OBJETIVOS

Os objetivos desse trabalho consistem em:

### 1.3.1 Objetivo Geral

Caracterizar barras de polímero reforçado com fibras de vidro e analisar o comportamento elástico em função do diâmetro nas temperaturas ambiente e de transição vítrea.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Verificar a viabilidade de realização da caracterização das barras de polímero reforçado com fibras de vidro através de análises térmicas;

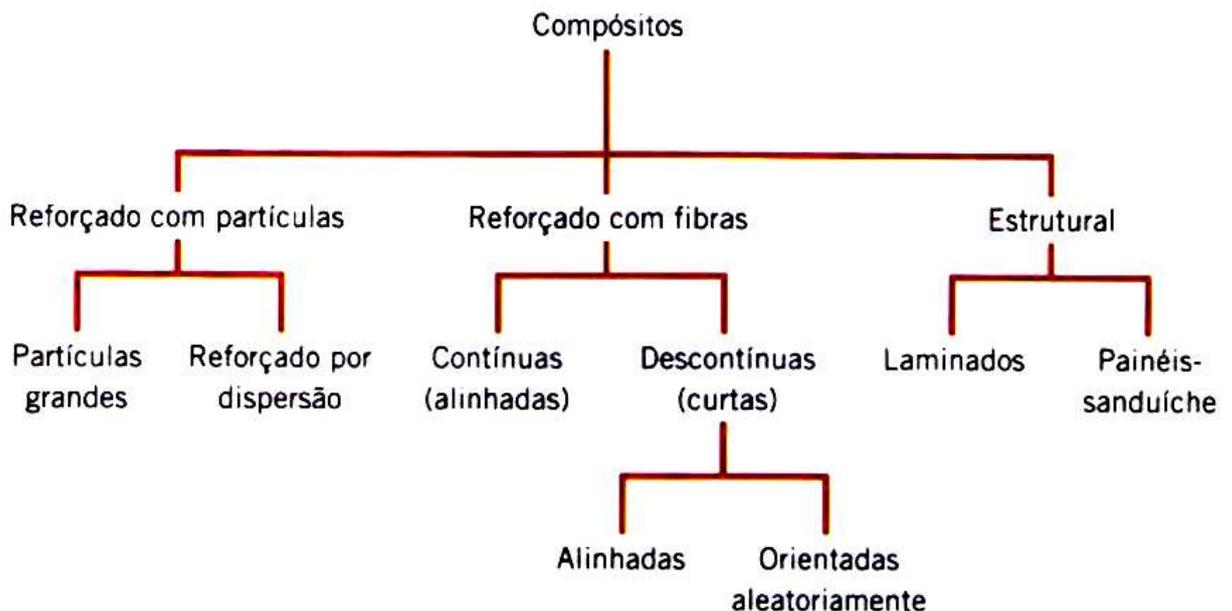
- b) Elaborar um método para adaptação de âncoras nas barras de polímero reforçado com fibras de vidro que possibilite realizar ensaios de tração uniaxial, com base nas recomendações de bibliografias;
- c) Adaptar o ensaio de tração uniaxial com elevação de temperatura, para possibilitar a extração de dados relevantes sobre os compósitos expostos a temperaturas acima da temperatura de transição vítrea do polímero.

## 2. COMPÓSITOS DE FRP

É considerado “compósito” todo sistema de dois ou mais materiais que possuem uma zona de interface identificável com uma região de transição. Nessa região de transição, comumente é aplicado um tratamento superficial, de maneira a aumentar a adesão da matriz com o reforço utilizado. (ACI 440R, 2007).

Os materiais compósitos são classificados principalmente em três divisões, conforme apresentado esquematicamente na Figura 1. (CALLISTER; RETHWISCH, 2015).

Figura 1 – Esquema de classificação de compósitos



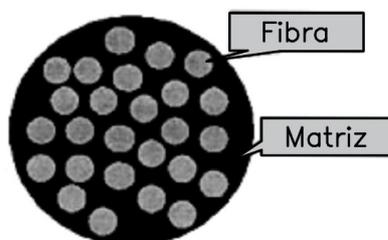
Fonte: Callister Jr. e Rethwisch (2013, p. 537).

Os compósitos unidirecionais de polímero reforçados com fibras utilizados como armadura para concreto são basicamente barras constituídas por fibras contínuas inseridas em uma matriz de resina polimérica. (ACI 440R, 2007).

A principal motivação de se desenvolver um material compósito é combinar as propriedades de dois ou mais materiais, possibilitando atingir características que não são encontradas nesses materiais individualmente. Como exemplo, pode-se citar a interação de fibras de vidro com uma matriz polimérica, onde essas, sem elevar consideravelmente a densidade dos polímeros, tornam-nos mais rígidos. (ASKELAND; WRIGHT, 2014).

Segundo Uomoto et al. (2002), as fibras contínuas usualmente utilizadas na produção de barras de FRP para reforço de concreto são as de carbono (CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*), aramida (AFRP – *Aramid Fiber Reinforced Polymer*), vidro (GFRP – *Glass Fiber Reinforced Polymer*) e álcool polivinílico. Uma representação esquemática da seção transversal de uma barra de FRP é apresentada na Figura 2, sendo que, as fibras representadas na ilustração são extremamente finas em uma situação real, e nessa interface fibra/matriz, um tratamento superficial é adicionado, conforme necessidade, para concordância dos materiais. (UOMOTO et al., 2002).

Figura 2 – Representação esquemática da seção transversal de barra de FRP



Fonte: Adaptado de Uomoto et al.(2002, p. 192).

Com relação ao comportamento mecânico desses compósitos de FRP, significativamente a maior parte de um carregamento é resistido pelas fibras, ficando a matriz polimérica responsável pela distribuição das cargas entre a barra e o concreto circundante e internamente entre as fibras, além de protegê-las de ataques físicos e mecânicos. (ACI 440R, 2007).

Para melhor aderência dos compósitos de FRP com o concreto, é realizado na barra um tratamento superficial antes da cura da resina, estando disponíveis para a indústria diferentes formas de tratamento. (BAKIS et al., 2002).

Algumas considerações relevantes sobre locais onde a aplicação de barras de FRP pode ser potencialmente interessante, levando em consideração suas propriedades, foram resumidas pelo ACI 440.1R (2015), e estão apresentadas no Quadro 1. O mesmo documento sugere que, devido ao baixo conhecimento atual desses compósitos em relação às armaduras de aço amplamente utilizadas em concreto armado, as aplicações das barras de FRP ainda devem ser preferencialmente previstas nesses casos onde elas sabidamente apresentam consideráveis vantagens em relação ao aço. (ACI 440.1R, 2015).

Quadro 1 - Onde se deve considerar a utilização de barras de polímero reforçado com fibras

- a) Qualquer estrutura de concreto suscetível à corrosão por íons cloreto ou produtos químicos;*
- b) Qualquer estrutura de concreto que requeira reforço não metálico devido a considerações eletromagnéticas;*
- c) Como uma alternativa econômica ao uso de revestimento de epóxi e galvanizado;*
- d) Primeira tentativa de redução de custos ao uso de barra de aço inoxidável;*
- e) Estruturas temporárias, principalmente túneis e mineração;*
- f) Aplicações que não requerem condutividade térmica;*
- g) Em concreto massa exposto a cloretos marinhos, próximo à exposição dos cloretos, podendo ser utilizado em aplicações híbridas com aço.*

Fonte: Adaptado de ACI 440.1R (2015, p. 8).

Em se tratando de barras de FRP para armadura de concreto, o processo produtivo usualmente utilizado é a pultrusão, onde as fibras são puxadas linearmente através de uma matriz, impregnando-as com essa resina. Posteriormente, são conformadas em um molde, e sujeitas à aplicação do tratamento superficial pertinente, para então serem cortadas no comprimento específico. (BAKIS et al., 2002).

Quanto ao custo das estruturas de concreto armadas com barras de GFRP, de acordo com Abbasi e Hogg (2005), devido às potenciais vantagens das GFRP de menor peso próprio e maior resistência à corrosão, há longo prazo, tendem a ser significativamente mais em conta que estruturas de concreto armadas com aço, mesmo contando com um investimento inicial maior. Entretanto, os mesmos autores alertam que, essa análise financeira, para ser representativa do custo da utilização desse material compósito, ainda carece de dados expressivos de durabilidade e desempenho há longo prazo, principalmente tratando-se do desempenho dessas estruturas em condições atípicas como situações de incêndio, necessárias de ser consideradas na ocasião do projeto.

## 2.1. EVOLUÇÃO DOS PRODUTOS COMPÓSITOS DE FRP

O produto precursor da revolução gerada pelos avanços das pesquisas em compósitos de FRP que se tem conhecimento foi um casco de barco fabricado com esse material, combinando tecido de fibra de vidro com resina de poliéster, datado de meados da década de 1930. (ACMA, 2016).

Na década de 1940, após a Segunda Guerra Mundial, com o reconhecimento dos benefícios de alta resistência e baixo peso dos FRP, a indústria aeroespacial e de defesa expandiu enormemente o uso desses compósitos durante a Guerra Fria. (ACI 440.1R, 2015).

A indústria química é mais um exemplo de campo que vem usando largamente compósitos de FRP em processos e produtos, aproveitando as propriedades das fibras estruturais incorporadas a polímeros selecionados que proporcionam resistência química a ambientes específicos, além de alta resistência mecânica e durabilidade notável (BAKIS et al., 2002). A inserção dos FRPs nas indústrias químicas data do início da década de 1950, e ainda é crescente atualmente, destacando-se, por exemplo, áreas como a indústria petroquímica e de tratamento de resíduos, empregados em forma de reservatórios para estocagem de produtos, plataformas de acesso e inspeção, ou outras finalidades. (ACMA, 2016).

De meados década de 1950, datam os primeiros materiais de FRP utilizados na área de engenharia e arquitetura, inicialmente compondo estruturas provisórias, passando, posteriormente, para restaurações e reforços estruturais, sendo comercializados principalmente produtos 2D, como placas translúcidas e painéis para ambientes externos. (ACMA, 2016). Nos EUA, na mesma década, devido ao sal lançado nas ruas e avenidas para derretimento da camada de gelo que se formava sobre a pista de rolamento em épocas de frio, e do sal marinho que atacava as construções costeiras, foi identificado que as armaduras de aço dessas estruturas apresentavam acentuada corrosão, culminando na necessidade de elevados investimentos para manutenção. (ACI 440R, 2007).

Nos anos que se seguiram, muitas pesquisas experimentais foram realizadas, com intuito de investigar soluções viáveis para resolver o problema do ataque sofrido pelas armaduras metálicas, dentre elas, destacaram-se os revestimentos galvanizados, resinas em pó aplicadas por pulverização eletrostática e revestimentos epóxi. Como primeira solução tentou-se revestimento galvanizado aplicado nas barras de aço, que logo não se mostrou adequado, principalmente por causa de uma reação eletrolítica entre o aço e o revestimento à base de zinco, levando a uma perda de proteção contra corrosão. Posteriormente, optou-se por utilizar o revestimento de epóxi nas armaduras instaladas em ambientes quimicamente agressivos, por terem se apresentado aparentemente como melhor

solução, dando início a esta técnica ainda utilizada nos dias atuais. (ACI 440R, 2007).

Na década de 1960, o mercado que mais consumiu produtos de compósitos de FRP foi o marítimo, sendo ultrapassado na década seguinte, 1970, pelo mercado automotivo, que nos dias atuais ainda mantém a posição de maior usuário desse tipo de produto. (ACMA, 2016). Um nicho selecionado da indústria aeroespacial, nos anos de 1960 e 1970, também viu um crescente uso de produtos de FRP em projetos mais desafiadores de viagens de exploração espacial, onde foram empregadas fibras com maior resistência, como fibras de boro, carbono e aramida. (BAKIS et al., 2002).

De volta à área da construção civil, ainda na década de 1960, pesquisas realizadas sobre incorporação de polímeros em concreto encontraram uma barreira na sua utilização, devido à incompatibilidade de seu coeficiente de expansão térmico com o coeficiente das armaduras de aço. Para solução desse obstáculo, a empresa “*Marshall-Vega Corporation*” realizou pesquisas que levaram a fabricação de barras de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP), que se tornaram uma opção para armadura de concretos poliméricos. (ACI 440R, 2007).

Apesar de já presente em pesquisas, as barras de polímero reforçado com fibras de vidro foram comercializadas apenas no final da década de 1970. Na época, inspeções já mostravam corrosão nas barras de aço revestidas com epóxi utilizadas anteriormente, e a busca por métodos alternativos encontrou nos FRP outra aplicabilidade além dos concretos poliméricos, agora em estruturas de decks de pontes e outras construções do tipo. (BENMOKRANE et al., 1996 *apud* ACI 440.1R 2015).

Elementos de FRP de fibra de vidro e resina poliéster, com resistência a tração de 150 kgf/mm<sup>2</sup> e módulo de elasticidade de 5100 kgf/mm<sup>2</sup>, foram utilizados para a construção de uma ponte de aproximadamente 6,50 metros na Alemanha. (WAASER; WOLF, 1986 *apud* UOMOTO et al. 2002). Sendo essa a primeira estrutura rodoviária que se utilizou da tecnologia de barras de FRP, em 1986. (MEIER, 1992 *apud* ACI 440R, 2007). Atualmente, já é possível encontrar exemplos de utilização de compósitos de FRP em centenas de pontes, utilizados em formas de reforços externos e internos. (ACMA, 2016).

Na década de 1980, as vantagens dos FRP foram se tornando cada vez mais desejadas, na medida em que as pesquisas revelavam mais conhecimento sobre

suas potenciais propriedades, e surgiam exigências de concretos com requisitos de desempenhos especiais, como propriedades não magnéticas. Uma dessas pesquisas surgiu de uma exigência do mercado por um tipo de armadura não condutora de eletricidade, para aplicação em estruturas de aparelhos médicos de ressonância magnética, tornando-se padrão nesse tipo de aplicação o uso dos FRP, e, posteriormente, também difundidas em bases de reatores de subestação e pistas de aeroportos. (BROWN; BARTHOLOMEW, 1996 *apud* ACI 440.1R, 2015).

Bakis et al. (2002) explana que, apesar do conhecido conservadorismo presente na indústria da construção civil e de infraestrutura, com os projetos de pesquisa e financiamentos de indústrias e governos no final da década de 1980, e ao longo de toda década de 1990, a aceitação dos materiais de FRP foi aumentando, impulsionada também pela notória necessidade de utilização de novos materiais para resolução de problemas nas áreas de infraestrutura e construção e pela redução de preços praticados pelas indústrias fabricantes de compósitos, pressionadas para continuarem em expansão mesmo com a diminuição do consumo do mercado de defesa da época.

Nas pesquisas, os primeiros problemas a serem explorados foram a resistência à fadiga de barras de FRP, considerando seu módulo de elasticidade sensivelmente linear até a ruptura, além de árduos projetos dedicados a melhorar a durabilidade das fibras de vidro no ambiente alcalino do concreto, e a prevenir a deterioração das resinas de epóxi expostas a radiação ultravioleta. (UOMOTO et al. 2002). Na década de 1990, o país que mais possuía obras com compósitos de FRP era o Japão. Já na década seguinte, 2000, apresentando obras variadas, como pontes e construções subterrâneas, a China assumiu a liderança de aplicações desses compósitos em novas construções. (YE et al., 2003 *apud* ACI 440.1R, 2015).

Tavares (2006) menciona que, no Brasil, as primeiras pesquisas registradas sobre compósitos de FRP datam de meados da década de 1990, onde foram realizadas pesquisas isoladas sobre o material em Fortaleza/CE. E, posteriormente, dois artigos foram publicados no III Congresso de Engenharia Civil em Juiz de Fora/MG, sendo eles: Barras de armação em FRP: Discussão de parâmetros para normalização (ALVES, A. B.; CASTRO, P. F., 1998) e Comportamento de vigas de concreto de alta resistência com armadura não metálica tipo FRP (RAYOL, J. O.; MELO, G. S., 1998).

Durante as pesquisas realizadas para confecção deste relato histórico, foram encontrados alguns trabalhos acadêmicos nacionais sobre compósitos de FRP em aplicações da área de engenharia civil, formados por pesquisas isoladas em diferentes pontos do país. Entretanto, não foi localizado nenhum núcleo com relevantes concentrações de publicações sobre esses materiais.

Nos EUA, através de uma parceria público-privada milionária, em 2015, foi fundado um instituto voltado à área de compósitos avançados, que terá como principais atividades: pesquisas para diminuição dos custos de fabricação, diminuição de energia na produção, e facilitação do processo de reciclagem. (ACMA, 2016).

Atualmente, as barras de FRP já dispõem de dados analíticos e experimentais adequados para servir de armadura de concreto, com construções realizadas durante as últimas décadas que comprovam sua boa aplicabilidade. Entretanto, na intenção da utilização de tais materiais, é necessário levar em consideração as limitações desse tipo de reforço, e atentar que muitas pesquisas relevantes ainda estão em andamento ou serão realizadas, o que irá proporcionar uma contínua evolução nos métodos de projeto e construção com esses compósitos. (ACI 440.1R, 2015).

## 2.2. PADRONIZAÇÃO E ENSAIOS

Na construção civil, os pesquisadores dos compósitos de FRP encontraram um grande desafio na elaboração de padrões para testes, projetos e construções com esse tipo de produto. (UOMOTO et al. 2002). As primeiras instruções publicadas foram principalmente formuladas a partir de códigos pré-existentes de estruturas de concreto armado com aço, levando em consideração o comportamento dos FRP conhecidos através de pesquisas e equações empíricas, ainda carentes de detalhes pelo desconhecimento do exato comportamento do material. (PILAKOUTAS; NEOCLEOUS; GUADAGNINI, 2002).

Os registros de padrão para construção e projeto com FRP mais antigos datam de 1997, quando foram publicadas as primeiras recomendações técnicas pela Sociedade de Engenheiros Civis do Japão (*JSCE - Japan Society of Civil Engineers*), produzidas a partir de estudos que se iniciaram na década de 1980, baseadas, principalmente, na “Especificação Padrão para Projeto e Construção de

Estruturas de Concreto” da mesma instituição, de 1986, utilizada para estruturas de concreto em geral. Posteriormente, o Canadá, que já vinha com grandes estudos e publicações sobre o assunto, aprovou em 2001, a seção do “Código de Projeto de Ponte Rodoviária Canadense”, que tratava especificamente de concreto com reforço de FRP, pela Associação Canadense de Padrões (*CSA - Canadian Standards Association*). (BAKIS et al., 2002).

Nos Estados Unidos, o avanço do estudo dos compósitos de FRP foi principalmente impulsionado pela criação do *Comitê 440 - Reforço de FRP*, pelo Instituto Americano de Concreto (*ACI - American Concrete Institute*), em 1991. Este comitê produziu primeiramente um relatório sobre o estado da arte dos FRP, em 1996, e mais tarde, em 2001, publicou dois materiais com orientações técnicas para projeto e construção em FRP. (BAKIS et al., 2002). Sendo este baseado predominantemente no ACI 318-99 que tratava de estruturas de concreto armadas com aço, implementando as alterações necessárias em relação à diferença de comportamento dos materiais que compunham a armadura. (PILAKOUTAS; NEOCLEOUS; GUADAGNINI, 2002).

A Europa, através da Federação Internacional de Concreto (*FIB - Fédération Internationale du Béton*), também publicou alguns materiais sobre FRP, sendo em 2007, o primeiro sobre diretrizes de projeto e construção utilizando FRP, com aspectos semelhantes aos materiais que vinham sendo publicados internacionalmente. (ACI 440.1R, 2015).

Atualmente, o ACI 440.3R (2012) prescreve métodos de teste tanto para elementos de FRP unidirecionais (barras para armadura de concreto), quanto para elementos bidirecionais (laminados utilizados em reforços externos para fortalecimento de estruturas de concreto e alvenaria existentes). Estes métodos não são prescritos como normas, mas sim como recomendações do Comitê 440 do ACI, baseados no conhecimento provindo da literatura mundial e em resultados de pesquisas realizadas a respeito dos compósitos de FRP, originando métodos particulares, que levam em consideração as diferenças do comportamento físico e mecânico desses materiais em relação ao aço. (ACI 440.3R, 2012).

Cabe ressaltar que as pesquisas sobre compósitos de FRP estão em constante atualização, principalmente se tratando do recente interesse nesses materiais, em comparação com outros já largamente empregados na construção civil. Assim, muitos métodos vêm surgindo ou se adequando ao comportamento dos

compósitos verificado nos ensaios, aprimorando o conhecimento das propriedades e do desempenho. (ACI 440.1R, 2015).

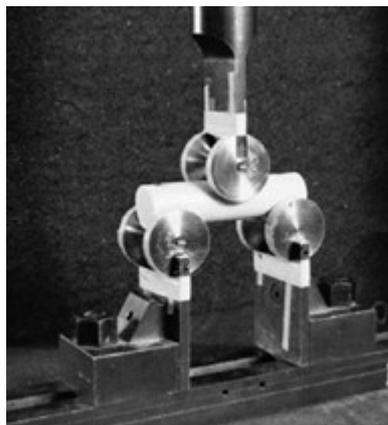
### **2.2.1. Normalização**

O ACI 440.3R (2012) foi formado com intenção de apresentar a forma mais adequada de métodos de testes para determinação das propriedades requeridas pelo pesquisador, sendo basicamente composto das seguintes maneiras: referenciando apenas métodos de testes produzidos pelo próprio Comitê 440, referenciando um ou mais padrões ASTM para a verificação de uma dada propriedade, ou recomendando padrões ASTM com métodos de testes complementares da ACI. (ACI 440.3R, 2012). Sua versão vigente foi revisada em 2012, sendo anteriormente válida a versão de 2004, e através da análise de ambas versões, pode-se notar a busca por evolução dos métodos de testes para esse material.

No que tange os métodos de teste para obtenção da tensão de cisalhamento resistida por barras de FRP, por exemplo, enquanto que o ACI 440.3R (2004) indicava como um dos padrões o ASTM D4475, o ACI 440.3R (2012) passou a indicar somente o ASTM D7617/D7617M.

No padrão ASTM D4475, que teve sua última revisão em 2016, e trata sobre o teste utilizado para determinação da resistência ao cisalhamento horizontal de barras de FRP, o ensaio é realizado com uma amostra pequena, sendo simplesmente apoiada em duas bases, permitindo trabalhabilidade da amostra, conforme pode ser visto na Figura 3. Na mesma figura, também se pode notar a cabeça móvel da máquina (superior), responsável pelo carregamento do conjunto, sendo esse sempre centrado e perpendicular à barra ensaiada, cessando apenas quando da ocorrência de uma fratura de corte, comumente no plano médio horizontal da barra ensaiada. (ASTM D4475, 2016).

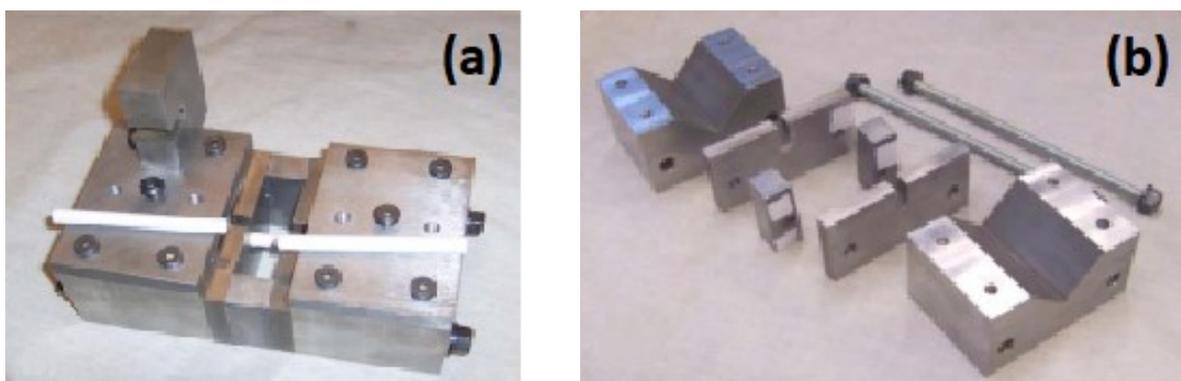
Figura 3 – Montagem do teste



Fonte: ASTM D4475 (2016, p. 2).

Já no padrão ASTM D7617 / D7617M, que teve sua última revisão em 2017, e também trata sobre método de teste para determinação da resistência ao cisalhamento horizontal de barras de FRP, o ensaio é realizado com a montagem da barra a ser ensaiada em um dispositivo de corte duplo, sendo o carregamento proporcionado por uma lâmina móvel (superior), forçando a amostra sobre duas lâminas fixas (inferiores), ambas de aço, conforme pode ser visto na Figura 4 (a) e na Figura 4 (b). (ASTM D7617 / D7617M, 2017).

Figura 4 – (a) Fixação montada e amostra cortada; (b) Corpo principal desmontado

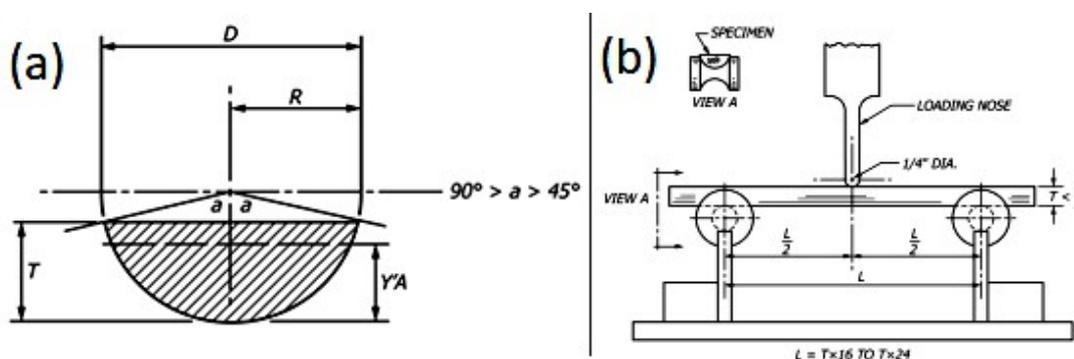


Fonte: ASTM D7617 / D7617M (2017, p. 4).

Um exemplo de padrão que se manteve como uma das referências, tanto no ACI 440.3R (2004), quanto no ACI 440.3R (2012), é o ASTM D4476/D4476M, com sua mais atual revisão de 2014, trata do método de teste utilizado para determinação das propriedades de resistência à flexão de barras de FRP. Para realização do teste, é necessária uma prévia preparação da amostra, que deve ser

cortada longitudinalmente, conforme pode ser visto na Figura 5 (a). Essa especificação da utilização de parte da seção transversal convém para a eliminação das forças de cisalhamento prematuro, que foram notadas em testes realizados com barras inteiras durante testes de flexão de três pontos. Após, a barra semicircular é posta sobre dois suportes fixos, tendo carregamento efetuado na área central entre os apoios, assim, devido à configuração explicada, vista também na Figura 5 (b), o rompimento da barra se dará pelas máximas tensões de tração que irão ocorrer nas fibras inferiores, perpendiculares à cabeça horizontal móvel de carregamento. (ASTM D4476/D4476M, 2014).

Figura 5 – (a) Seção transversal da amostra; (b) Configuração do teste de flexão



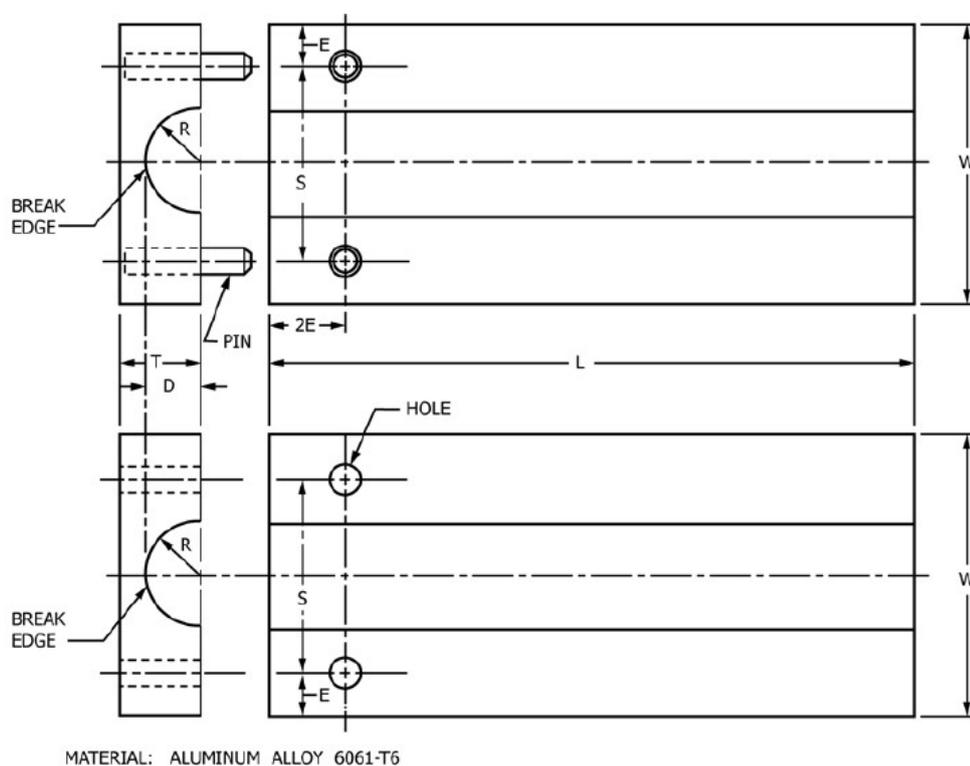
Fonte: ASTM D4476/D4476M (2014, (a) p. 2; (b) p. 3).

O ASTM D3916, com sua última revisão em 2016, foi o método referenciado pelo ACI 440.3R (2004), para o teste de determinação das propriedades de resistência à tração das barras de FRP. (ACI 440.3R, 2004).

Para efetuar o procedimento de tração uniaxial, pouca preparação no corpo de prova é requerida, entretanto, o método reforça que, devido à alta resistência à tração axial, e a baixa resistência à compressão transversal apresentada pelos compósitos, um problema particular na execução de testes de tração é encontrado no ensaio tradicional. Dada à grande pressão exercida pelas garras da máquina para ancoragem da peça e posterior aplicação da força axial, há a tendência de esmagar a barra, ocasionando uma prematura falha que se inicia na zona de ancoragem e não no comprimento livre da amostra, sendo necessário o descarte da tensão de ruptura medida, pois esta não está fidedigna com a resistência real da peça. (ASTM D3916, 2016).

No intuito de solucionar o problema da falha prematura nas ancoragens, a ASTM D3916 (2016) prescreve o uso de adaptadores reutilizáveis de alumínio, usinados conforme diâmetro da barra, de tamanho apropriado para redução e melhor distribuição das forças de compressão à barra. Na Figura 6 é possível verificar as características dessa ancoragem. Um par desses adaptadores é necessário para cada teste, confeccionados com a liga de alumínio 6061-T6, caracterizada por apresentar boa resistência mecânica e à corrosão. O método ainda indica a utilização de solvente para limpeza das superfícies do molde antes da montagem do ensaio, para retirada de qualquer óleo, ou outro material que possa ter deixado resíduo na fabricação. (ASTM D3916, 2016).

Figura 6 – Esquema geral dos adaptadores – Lado (a)



Fonte: ASTM D3916 (2016, p. 2).

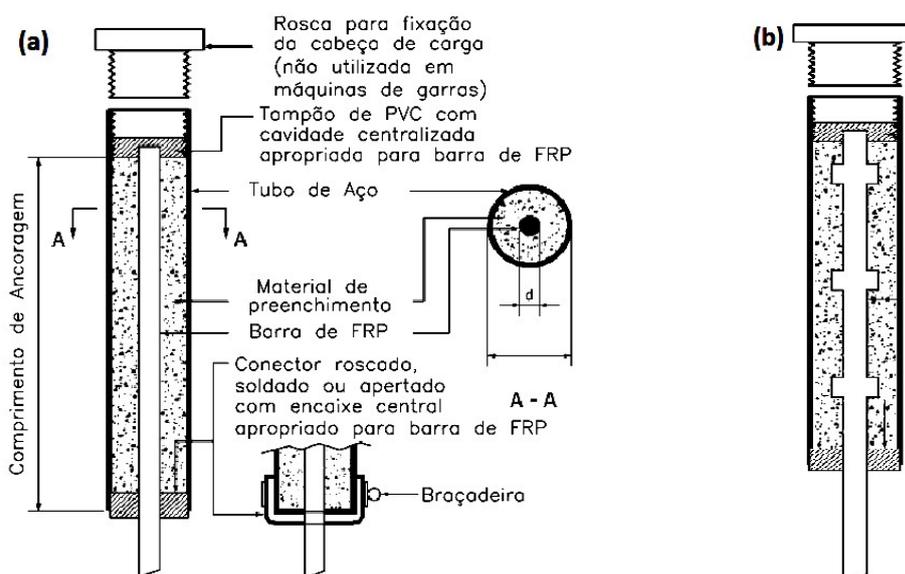
Todavia, o atual padrão a ser seguido para pesquisas que buscam estudar propriedades de resistência à tração e módulo longitudinal dos compósitos de FRP é o ASTM D7205/D7205M (2016), prescrito pelo ACI 440.3R (2012). (ACI 440.3R, 2012).

Na norma ASTM D7205/D7205M (2016), tal qual nas outras da ASTM citadas nesse trabalho, não são abordadas, em sua totalidade, as precauções de segurança

necessárias para o projeto de estruturas com barras de polímero reforçado com fibras de vidro, tendo o profissional, a responsabilidade de aplicação desse material com segurança, levando em consideração todas suas limitações. Especificamente, esse padrão prescreve um método de ensaio para obtenção da resistência de tração quase estática para barras e segmentos lineares cortados de grades (2D), sendo necessário caracterização adicional para uso sob solicitações que contém variações ao longo do tempo, como carregamentos cíclicos ou sustentados por longos períodos. (ASTM D7205/D7205M, 2016).

Por apresentar o mesmo problema de ancoragem na máquina, exposto anteriormente sobre testes de tração em barras de FRP, há nesse método a recomendação de dispositivo para evitar danos nas extremidades das barras, além de evitar o escorregamento da peça durante o ensaio. A norma aborda essa ancoragem como sugestão, não sendo obrigatória sua utilização, podendo se utilizar outro meio de ancoragem, desde que respeitada a condição da barra não romper devido às concentrações de tensão nas extremidades, possibilitando que apresente toda sua resistência. Conforme Figura 7 (a), pode-se notar que esta ancoragem sugerida é constituída por tubo de aço onde a barra é centralizada, e envolta por material de preenchimento resistente, de forma a distribuir melhor as tensões, a Figura 7 (b), apresenta a mesma ancoragem, sendo instalada em um segmento cortado de uma malha 2D. (ASTM D7205/D7205M, 2016).

Figura 7 – (a) Detalhe da ancoragem; (b) Instalação em segmento de grade



Fonte: Adaptado de ASTM D7205/D7205M (2016, (a) p. 8; (b) p. 10).

Com relação ao teste de tração uniaxial, alguns fatores do material que estão intimamente ligados à resposta que será apresentada por ele no ensaio, e, portanto, devem ser relacionados e considerados juntamente com os resultados na análise são: materiais constituintes, percentual de reforço de fibras e métodos de fabricação das barras. Da mesma forma, existem outros fatores também relevantes para a resposta à tração das barras de FRP que estão atrelados ao método e não às barras, sendo eles: o condicionamento e a preparação da amostra, o ambiente e a velocidade de teste, e a ancoragem utilizada para ensaio na máquina. (ASTM D7205/D7205M, 2016).

Como as barras de FRP não apresentam superfície uniforme, devido ao tratamento superficial para aderência mecânica com o concreto, um procedimento específico é prescrito para medição da área de seção transversal das barras. O comprimento livre mínimo deve ser o maior entre 380,00mm ou 40 vezes o diâmetro nominal da barra, e, quanto à amostragem, são prescritas cinco amostras para cada condição de teste ensaiada, aceitando-se uma quantidade menor quando, mesmo com essa redução de quantidade de amostras, se obterem resultados expressivos, relatando o método de amostragem utilizado na descrição do teste.

Por fim, para validação do ensaio, deve-se desconsiderar qualquer amostra que apresentar falhas evidentes que não sejam decorrentes da ação da força de tração. (ASTM D7205/D7205M, 2016).

### 2.3. CONSTRUÇÕES COM FRP

Considerando as construções que mais se beneficiariam com a utilização de armadura de FRP, alguns casos de aplicabilidade dada para esse tipo de reforço são apresentados nesse subcapítulo.

Em plataformas de pontes tornou-se interessante o uso de armaduras de GFRP, eliminando o problema de corrosão e não onerando significativamente a construção, considerando que, por vezes, eram usadas apenas na região de concreto mais exposta aos cloretos, como pode ser visto na Figura 8. (NANNI, 2003).

Figura 8 – Instalação de armadura da camada superior de plataforma de ponte em GFRP



Fonte: Nanni (2003, p. 441).

Edifícios hospitalares também utilizaram das propriedades das barras de GFRP na construção, como, por exemplo, em 1985, na composição de pilares, vigas e lajes de uma Unidade de Ressonância Magnética em San Antonio, Texas, mostrado na Figura 9 e na Figura 10. (ACI 440R, 2002).

Figura 9 – Construção do edifício hospitalar em San Antonio / Texas



Fonte: ACI 440R (2002, p. 43).

Figura 10 – Ressonância Magnética do Sul do Texas (*MRI - Magnetic Resonance Imaging*), em San Antonio / Texas



Fonte: ACI 440R (2002, p. 43).

Em Utah, na ponte *Emma Park Bridge*, construída em 2009, barras de GFRP foram usadas nas plataformas superior e inferior, como pode ser visualizado na Figura 11. (Gremel, 2012 *apud* ACI 440.1R, 2015).

Figura 11 – *Emma Park Bridge* - Utah



Fonte: Gremel (2012) *apud* ACI 440.1R (2015, p. 7).

Outro exemplo de barras de GFRP em construções com alta exposição à cloretos é o muro de proteção da Rodovia Honoapiilani, em Maui, Havaí, construído com armaduras de aço em 2001 e posteriormente refeito em 2012, onde foram utilizadas armaduras de GFRP, conforme pode-se visualizar, na fase de construção, na Figura 12. (ACI 440.1R, 2015).

Figura 12 – Muro de proteção de rodovia com barras GFRP - Maui/Havaí



Fonte: ACI 440.1R (2015, p. 8).

Muito mais avançadas que as barras unidirecionais, as aplicações de FRP na construção civil já se apresentam como alternativa a estruturas notavelmente diferenciadas. Como exemplo, a ponte de pedestres e ciclistas construída em 2013, na cidade de Rhyl, País de Gales, apresenta uma arquitetura moderna e esbelta, com duas plataformas de 30 metros de comprimento cada, e 6 metros de largura nos pontos mais largos, sendo ambos os lados móveis, que permitem trânsito de barcos quando necessário, apresentada na Figura 13. As plataformas são formadas em sua maior parte por fibras de vidro com resina de epóxi, somadas com quatro partes periféricas, colocadas nas bordas, que são reforçadas com fibras de carbono. A leveza do conjunto foi também pensada no intuito de diminuição da energia para operação da ponte. (ACMA, 2016).

Figura 13 – Ponte de pedestres e ciclistas em Rhyl / País de Gales



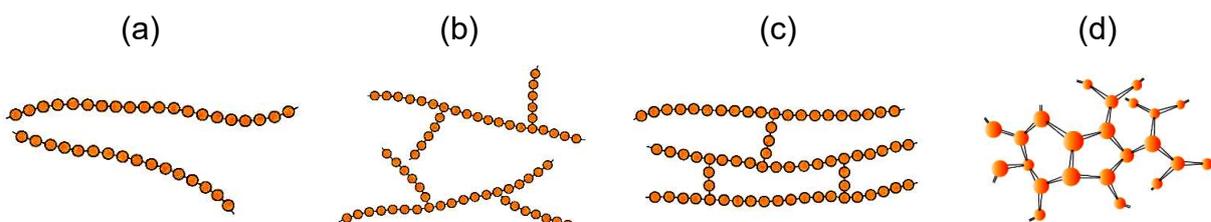
Fonte: ACMA (2016).

## 2.4. POLÍMEROS: CONCEITOS BÁSICOS

Uma macromolécula de polímero é criada através de diversas reações químicas, denominadas síntese de polímeros ou polimerização, que une extensas cadeias a partir de um arranjo unitário de moléculas que caracterizam um polímero, conhecido como monômero. (ASKELAND; WRIGHT, 2015).

Várias classificações podem ser realizadas para melhor entendimento dos polímeros. Considerando a estrutura molecular, pode-se separar em polímeros lineares, que apresentam cadeias longas, flexíveis e repetidas, análogo à uma massa de espaguete. Polímeros ramificados, apresentando cadeias chamadas secundárias, ligadas às cadeias lineares. Polímeros com ligações cruzadas, as quais podem ser alcançadas durante a sintetização ou através de reação química irreversível. E polímeros em rede, caracterizados por estruturas moleculares que apresentam muitas ligações cruzadas. Vale ressaltar que os polímeros comumente não são constituídos de uma única estrutura molecular específica, na Figura 14 pode ser visto esquematicamente essas estruturas. (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2013).

Figura 14 – Representação esquemática estruturas moleculares (a) linear, (b) ramificada, (c) com ligações cruzadas, (d) em rede



Fonte: Callister Jr. e Rethwisch (2013, p. 466).

Outra forma de classificação de polímeros é a respeito de seu comportamento térmico e mecânico, onde se apresentam três classes principais: termoplásticos, termofixos e elastômeros. Os termoplásticos apresentam comportamento mecânico plástico e dúctil, e amolecem e se fundem quando aquecidos, o que os torna de fácil reciclagem. Os termofixos comumente apresentam resistência mecânica maior que os termoplásticos, entretanto, apresentam comportamento mais frágil, e quando aquecidos não se fundem, mas começam a se degradar pelo rompimento das

ligações cruzadas, o que os torna de difícil reciclagem. Já os elastômeros apresentam deformações reversíveis de ordens superiores a 200% de seu tamanho em repouso (sem aplicação de forças), e seu comportamento quando aquecidos é dependente de sua composição. (ASKELAND; WRIGHT, 2014).

Quanto à composição, os termoplásticos possuem cadeias lineares flexíveis, ramificadas ou não, com ligações fracas entre cadeias, e podem ser amorfos ou semicristalinos. Os termofixos possuem cadeias lineares ou ramificadas, com moléculas fortemente ligadas umas as outras, de modo a formar uma rede rígida tridimensional (reticulação), são tão amorfos quanto maior o número de ligações cruzadas, pois estas impedem o rearranjo das cadeias para o alinhamento em uma estrutura cristalina. Já os elastômeros, por sua vez, podem ser formados por termoplásticos ou termofixos com poucas ligações cruzadas. (ASKELAND; WRIGHT, 2014).

Nos compósitos de FRP, o estudo dos polímeros é de fundamental importância, pois possuem, analogamente, papel semelhante ao concreto para o bom desempenho das armaduras metálicas. Mesmo sendo as fibras o constituinte principal para resistir às cargas solicitantes de tração, muitas são as propriedades de responsabilidade da matriz polimérica, como distribuir as tensões do concreto para a barra e internamente entre as fibras, evitar a flambagem das fibras fornecendo resistência lateral ao conjunto quando solicitadas por compressão, reduzir as fissuras em algum ponto não reforçado das barras, proteger mecanicamente as fibras, e proporcionar durabilidade do compósito, levando em consideração os possíveis danos ambientais do meio onde se localizar. (ACI 440R, 2007).

Mais propriedades importantes das barras de FRP, influenciadas também pela matriz polimérica, são a resistência ao cisalhamento longitudinal entre as fibras, recorrentes de esforços de flexão, e resistência ao cisalhamento na seção transversal, presentes principalmente quando solicitadas por esforços de torção. (ACI 440R, 2007).

Atualmente, as principais resinas que vêm sendo utilizadas na produção de barras de FRP são epóxis, ésteres de vinil e poliésteres. E já é de conhecimento que a durabilidade desses compósitos aumenta consideravelmente, caso na fabricação consiga se promover uma aplicação de um micro revestimento individualmente disposto em cada fibra. Podendo atribuir a diminuição de resistência verificada

quando a resina é desconformemente aplicada às tensões heterogeneamente distribuídas entre as fibras. (UOMOTO et al. 2002).

Tanto termoplásticos, como o nylon, quanto termofixos, principalmente poliésteres, ésteres de vinil e epóxis, podem ser utilizados na produção de FRP, entretanto, os termofixos são atualmente mais utilizados para este fim. Comparativamente, enquanto que os termoplásticos possuem vantagens como alta resistência ao impacto e possibilidade de moldagem secundária, como confecção de uma curva através do aquecimento da barra de FRP, também apresentam desvantagens como sua grande viscosidade em estado líquido, sendo de difícil inserção no processo industrial utilizado na confecção das barras. (ACI 440R, 2002).

Os termofixos, por sua vez, apresentam desvantagens comparativas como maior fragilidade e baixa elasticidade, quase não apresentando deformação até a ruptura, mas também possuem grandes vantagens como melhores resistência química e estabilidade térmica, menor retração que os termoplásticos, e, mesmo apresentando menor tempo para realização do ciclo de moldagem, pois possuem cura mais acelerada após a mistura com os catalisadores, seu estado líquido exibe baixa viscosidade, o que proporciona melhor homogeneização, sem carecer de consideráveis níveis de temperaturas e pressão para umedecer as fibras. (ACI 440R, 2002).

É comum, nas matrizes poliméricas, a inserção de adições e aditivos para diferentes finalidades, por exemplo: reduzir o custo da resina, buscar propriedades mecânicas específicas, alcançar um grau maior de resistência ao fogo, inibir efeitos nocivos dos raios de UV, facilitar liberação de moldes ou proporcionar algum tipo de pigmentação. (ACI 440R, 2002).

Quanto ao desempenho mecânico dos polímeros com relação à taxa de carregamento, é notado que, quanto maior a carga, ou quanto menor a duração do carregamento, a estrutura de polímero se comportará de forma rígida e quebradiça. Enquanto que com cargas menores, ou longos períodos de carregamento, pode-se conseguir um comportamento dúctil e elevados valores de resistência com os mesmos materiais. (ACI 440R, 2002).

Nos polímeros, itens como a temperatura, a taxa de realização de certo experimento, ou a inserção de tensões externas interferem significativamente nas suas propriedades físicas e mecânicas, de maneira que é essencial o conhecimento

das temperaturas em que ocorrem as transições no estudo desses materiais. (LISBÃO, 2012).

Três são as temperaturas características de maior interesse em polímeros, sendo: temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), temperatura de fusão cristalina ( $T_m$ ), e temperatura de cristalização ( $T_c$ ). (CANEVAROLO JR., 2013).

As propriedades afetadas pela transição vítrea estão relacionadas somente às regiões amorfas do polímero, sendo, portanto, mais intensamente verificadas quanto menor o grau de cristalinidade do material, permanecendo as regiões cristalinas praticamente inertes. (LISBÃO, 2012).

Abaixo da temperatura de transição vítrea ( $T_g$  - *glass temperature*), não há energia interna suficiente, nas cadeias de fase amorfa do polímero, que lhe dê a condição de poder se conformar através do deslocamento de uma cadeia em relação à outra. Assim, a  $T_g$  indica a faixa de temperatura média, que ocorre durante o acréscimo de temperatura em um polímero, onde inicia a fase que as moléculas adquirem mobilidade, passando da região de imobilidade, para a região de mobilidade ressonante, e posterior mobilidade, deixando o estado vítreo que anteriormente se encontravam, com características de sólido duro, rígido e quebradiço, para um estado com comportamento flexível borrachoso. Como exemplo de propriedades que alteram com a  $T_g$  podem-se citar o módulo de elasticidade, o coeficiente de expansão e o volume específico. (CANEVAROLO JR., 2013).

A principal característica estrutural que define a  $T_g$  em um polímero é a flexibilidade da cadeia polimérica. E, o valor da  $T_g$  em relação a temperatura ambiente relaciona o estado físico que os materiais poliméricos amorfos se apresentarão, podendo ser vítreos ou borrachosos. (AKCELRUD, 2007).

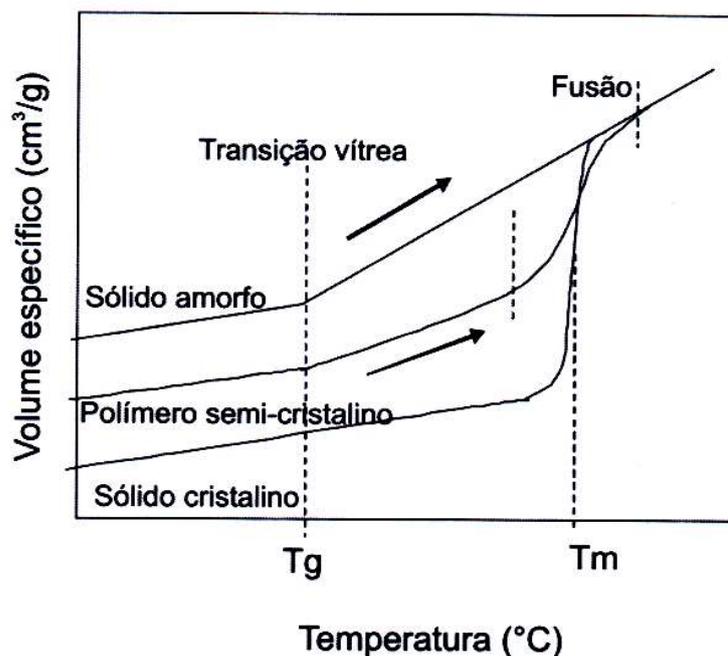
A temperatura de fusão cristalina ( $T_m$ ) define uma transição que ocorre na fase cristalina do polímero, sendo marcada pela faixa de temperatura média, durante o aquecimento, onde ocorre a fusão das regiões cristalinas do polímero, alterando de um estado borrachoso para o estado fundido viscoso (*melting temperature* - temperatura de fusão). Isso ocorre pois o sistema atingiu uma energia tal, que foi possível destruir a estrutura criada entre as cadeias. (CANEVAROLO JR., 2013).

A temperatura de cristalização ( $T_c$ ) se dá durante o resfriamento da massa fundida, podendo operar de duas formas diferentes, sendo uma com a redução brusca da temperatura, até a temperatura de cristalização, onde a temperatura é

estabilizada até a finalização do processo de cristalização, e outra com redução gradual da temperatura, ocorrendo, nesse caso, a cristalização em uma faixa de temperatura. Essas duas formas de cristalização são denominadas de isotérmica e dinâmica, respectivamente. (CANEVAROLO JR., 2013).

Com essas definições, pode-se traçar um paralelo na análise de variação volumétrica dos polímeros em função do aumento da temperatura, conforme nota-se na Figura 15. Enquanto que um sólido completamente amorfo apresenta um ponto de inflexão na  $T_g$ , marcando o aumento da mobilidade das moléculas, mantendo a mesma inclinação durante o outro trecho do gráfico por não apresentar cristais na sua constituição. Um sólido totalmente cristalino, apresenta o ponto de inflexão próximo à  $T_m$ , devido a expansão térmica da rede cristalina, não apresentando modificação na  $T_g$ , por não apresentar fase amorfa. Já no polímero semi-cristalino, com uma fase cristalina envolta em uma fase amorfa, o aquecimento dele apresenta expansão térmica na  $T_g$  devido a mobilidade adquirida pela fase amorfa, e, posteriormente, continuando o acréscimo de temperatura, apresenta fusão gradual dos cristais de diferentes tamanhos, marcando uma faixa de temperatura de fusão e um aumento de volume mais suave, em relação ao sólido cristalino, até alcançar o volume total equivalente. (CANEVAROLO JR., 2013).

Figura 15 – Variação de volume específico com o aumento da temperatura



Fonte: Canevarolo Jr. (2013, p. 151).

Quanto aos principais problemas que devem ser levados em consideração sobre degradação nos polímeros utilizados como matriz para confecção de compósitos, especialmente tratando-se das barras de FRP da área da engenharia civil, onde há o predomínio do uso de éster vinílico, poliéster e epóxi, os defeitos mais relevantes são a plastificação e o inchaço, além da degradação por hidrólise, que afeta principalmente o grupo éster. (CHEN et al., 2007).

#### **2.4.1. Análises térmicas**

Análises térmicas são constantemente utilizadas em caracterização de polímeros, mas também podem ser utilizadas em pesquisas de diferentes materiais, sendo aplicadas de forma singular ou associadas a outras técnicas termoanalíticas ou a técnicas físico-químicas convencionais. (MATOS; MACHADO, 2003).

A definição de análise térmica, segundo Canevarolo Jr. (2013, p. 249), “Abrange todos os métodos nos quais são realizadas medidas em uma dada propriedade, que é dependente da temperatura, com o seu aumento ou redução ou ainda sua variação com o tempo, a uma temperatura fixa.”.

Para uma técnica ser considerada termoanalítica, ela deve proporcionar, direta ou indiretamente, a aferição de uma propriedade física em função de um controle de temperatura programado. (MATOS; MACHADO, 2003).

Na essência, as análises térmicas apresentam peculiaridade em seus instrumentos utilizados nos ensaios, sendo formados por uma célula onde a amostra é resfriada ou aquecida sob controle, enquanto que suas propriedades de interesse são registradas e constantemente apuradas em uma unidade controladora, que intervém no ensaio se for necessário, para que este permaneça dentro dos parâmetros pré-estabelecidos. (MATOS; MACHADO, 2003).

##### **2.4.1.1. Análise termogravimétrica (TGA) e Análise termogravimétrica derivada (DTG)**

A técnica de análise térmica TGA (*Thermogravimetric Analysis* – Análise Termogravimétrica), também denominada TG (Termogravimetria), possibilita determinar alterações de massa de uma amostra com o aquecimento dela, detectando pontos de estabilidade e decomposição térmica através da medição da

variação da massa de uma amostra em função do tempo ou da temperatura, mantendo a temperatura constante, ou progressivamente crescente. (LISBÃO, 2012).

A norma ASTM E1131 (2014) apresenta uma técnica que utiliza termogravimetria para registro da variação de massa de uma amostra sólida ou líquida, com aquecimento controlado, em um ambiente adequado, como função do tempo ou temperatura, podendo ser útil como análise composicional quando o operador achar conveniente. A massa é expressa em porcentagem, e a faixa de temperatura do teste é geralmente entre temperatura ambiente à 1000°C. (ASTM E1131, 2014).

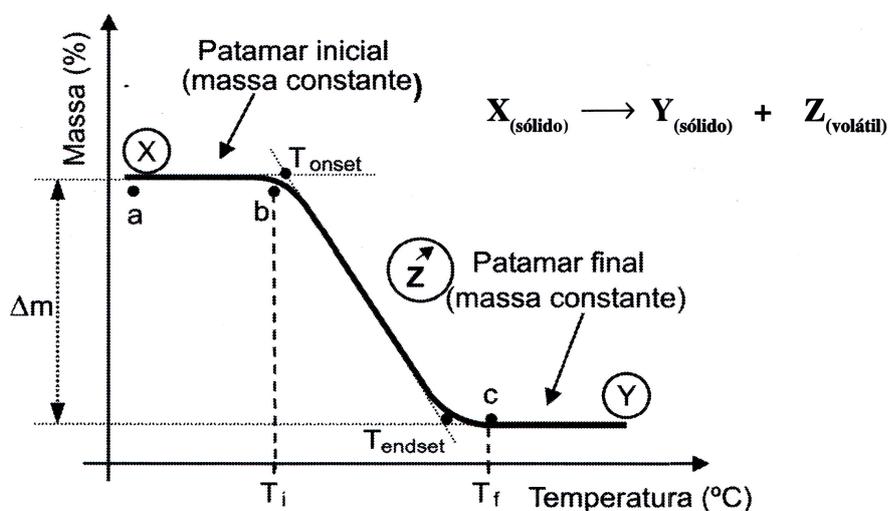
Na Termogravimetria Derivada, ou Análise Termogravimétrica Derivada (DTG), como o nome sugere, as curvas obtidas correspondem à derivada primeira das curvas de TGA. Podendo ser a derivada da variação de massa em relação ao tempo ( $dm/dt$ ) ou em relação à temperatura ( $dm/dT$ ). E, uma observação importante é que, em um mesmo ensaio, essas curvas contêm os mesmos dados apresentados pelas curvas de TGA, apenas expressos de forma diferente, que facilita a visualização. (MATOS; MACHADO, 2003).

A análise de várias informações retiradas das curvas termogravimétricas dos gráficos de TGA é realizada de forma empírica, uma vez que a única propriedade registrada quantitativamente é a variação de massa, e que tanto as características das amostras, quanto a instrumentação utilizada, afetam as temperaturas dos eventos térmicos gravados. (MATOS; MACHADO, 2003).

Na interpretação de um gráfico de TGA, os patamares representam estabilidade térmica, sendo que o ensaio sempre começa no maior valor possível do eixo vertical esquerdo, representando a totalidade da massa, numa região denominada patamar inicial. A temperatura inicial ( $T_i$ ) é a menor temperatura onde é detectado um início de variação de massa; e a temperatura final ( $T_f$ ) é a maior temperatura onde ainda se pode verificar variação de massa, representando, assim, a conclusão do processo de variação de massa. A temperatura *onset* ( $T_{onset}$ ) representa o início extrapolado do evento térmico, encontrada na intersecção da tangente do segmento do gráfico onde a massa ainda é constante, com a tangente do segmento inclinado da curva na reação; e a temperatura *endset* ( $T_{endset}$ ), encontrada de forma análoga à  $T_{onset}$ , representa o final extrapolado do evento térmico. (COSTA, 2017).

Na Figura 16, é demonstrado um exemplo de curva de TG típica para uma reação de decomposição térmica em uma única etapa, com a identificação das características descritas. A variação de massa, nesse caso, é medida pela diferença calculada no eixo vertical esquerdo, entre os trechos de  $T_i$  e  $T_f$ . (MATOS; MACHADO, 2003).

Figura 16 – Curva de TGA para reação de decomposição térmica em uma etapa



Fonte: Matos e Machado (2003, p. 214).

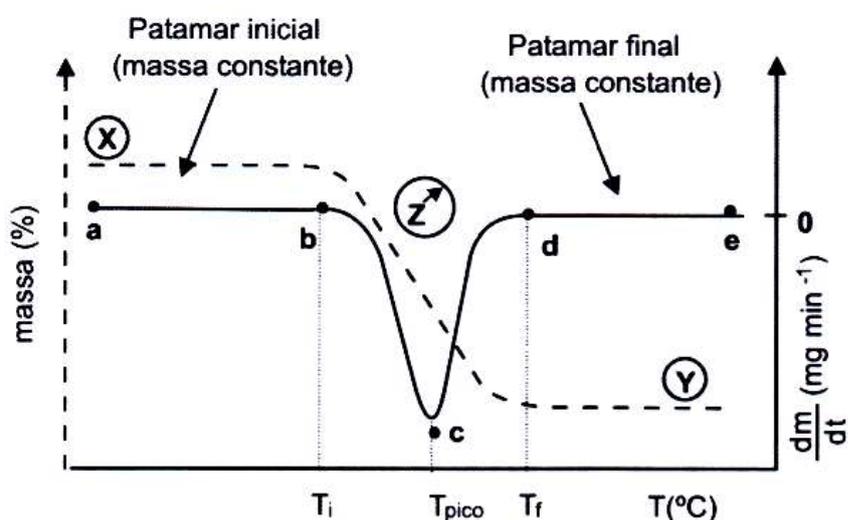
Comumente, nos polímeros, uma pequena perda de massa inicial é atribuída à liberação de componentes voláteis como solventes, por vezes assumindo também ser perda de água, quando essa ocorre a 100°C. (LISBÃO, 2012).

A análise de uma curva de DTG também deve ser feita atentando a alguns detalhes característicos, o degrau anteriormente apresentado em uma curva de TGA é substituído por um pico para cada evento térmico, com área diretamente proporcional à variação de massa sucedida nesse evento, o que facilita na segregação de reações sobrepostas, que poderiam não ser tão bem visualizadas no gráfico de TGA. Nos patamares horizontais da curva TGA, a curva DTG irá apresentar patamares também horizontais, com valor de derivada nula, pois  $dm/dt=0$  quando não ocorre perda de massa, e, na ocorrência de perda de massa, os pontos de início e final da curva da DTG, concordam, respectivamente, com os pontos de  $T_i$  e  $T_f$  da curva de TGA, sendo a temperatura de pico ( $T_{pico}$ ) da curva de DTG, aquela

em que a massa da amostra está variando mais rapidamente. (MATOS; MACHADO, 2003).

Na Figura 17, é demonstrado um exemplo de curva de DTG para uma reação de decomposição térmica que ocorre em uma única etapa, tendo como base a curva de TG apresentada na Figura 16, com a identificação das características descritas. O intervalo da reação visualizado na curva de DTG, entre  $T_i$  e  $T_f$ , também pode ser relacionado com a velocidade da reação. (MATOS; MACHADO, 2003).

Figura 17 – Curva de TGA (linha tracejada) e DTG (linha sólida) para reação de decomposição térmica em uma etapa



Fonte: Matos e Machado (2003, p. 215).

Algumas das aplicações típicas de TG e DTG, em polímeros, estão relacionadas a estudos de estabilidade térmica relativa, determinação de umidade, avaliação do efeito de retardantes de chama em polímeros, determinação quantitativa de resina acrílica em revestimentos, acompanhamento das reações de cura em tintas, determinação de carga inorgânica em polímeros e determinação da composição de copolímeros. (MATOS; MACHADO, 2003).

O ensaio de TGA pode ser realizado em atmosferas com gás reativo ou inerte sendo sua escolha dependente do tipo de estudo ou das características da amostra ensaiada. (MATOS; MACHADO, 2003).

#### 2.4.1.2. Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

A técnica de análise térmica DSC (*Differential Scanning Calorimetry* – Calorimetria Diferencial de Varredura) é utilizada para caracterização de materiais. É realizada através da medição da diferença do fluxo de calor entre a amostra ensaiada e uma de referência, expondo ambas a um controle de aquecimento ou resfriamento, de maneira a manter amostra e referência constantemente em temperaturas idênticas. (CANEVAROLO JR., 2013).

A técnica de DSC é a mais empregada para determinação da T<sub>g</sub> de polímeros, depositando-se alguns miligramas da amostra que se deseja ensaiar em invólucros selados, ao passo que a referência é apenas um invólucro idêntico vazio. (AKCELRUD, 2007).

A norma ASTM D3418 (2015) apresenta uma técnica, que utiliza calorimetria diferencial de varredura, para determinação de temperaturas de transição e entalpias de fusão e cristalização de polímeros, utilizando amostras na forma granular, ou em qualquer forma fabricada a partir da qual é possível cortar amostras apropriadas. No ensaio, a faixa de temperatura de operação é normalmente de temperaturas negativas até 600 ° C. (ASTM D3418, 2015).

Esse ensaio pode ser realizado por duas técnicas diferentes, o DSC de compensação de potência e o DSC de fluxo de calor. E, em ambos os casos, a análise do gráfico é feita da mesma maneira, pois a curva apresentada em um é exatamente o inverso da apresentada no outro, sendo a alteração apenas nas regiões do gráfico. (MACHADO; MATOS, 2003).

A primeira observação a ser feita em uma curva de DSC, é a identificação do fluxo de calor, sendo, normalmente representado pelas palavras exo e endo, acompanhadas de uma seta. (COSTA, 2017).

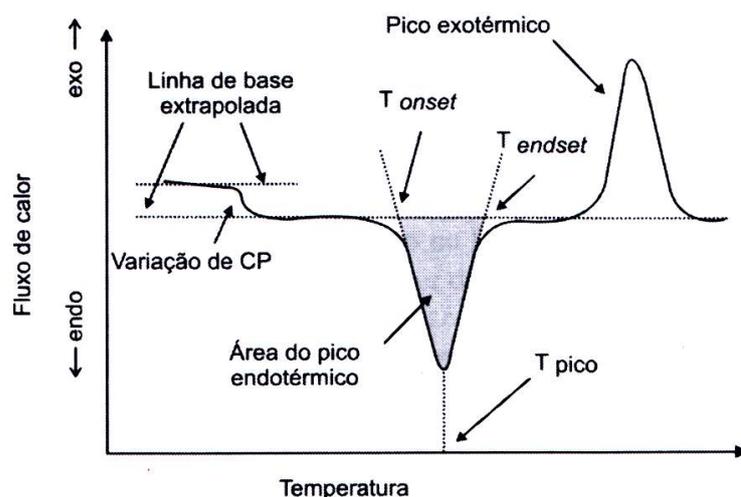
No DSC de compensação de potência, os eventos endotérmicos são ascendentes, representando variação positiva de entalpia, enquanto que no DSC de fluxo de calor, a representação é inversa. (MACHADO; MATOS, 2003).

Para interpretação de um gráfico de DSC, é preciso levar em consideração os eventos térmicos que geram reações que podem ser visualizadas nele, sendo elas as transições de primeira ordem (variações de entalpia), e as transições de segunda ordem (variação da capacidade calorífica). Alguns exemplos importantes de variações de entalpia endotérmica observadas em polímeros são: fusão, perda de

massa, reações de redução e dessorção. Já nas exotérmicas, para os mesmos materiais, temos: cristalização, polimerização, adsorção, cura e outras. Em ambos os casos, as reações de primeira ordem dão origem a formação de picos, diferentemente das reações de segunda ordem, que, por não estarem atreladas a variações de entalpia, apresentam apenas uma translação da linha base em forma de “S”, podendo indicar, por exemplo, a temperatura de transição vítrea. (MACHADO; MATOS, 2003).

A Figura 18 apresenta uma curva de DSC de fluxo de calor com suas características, sendo que uma curva de DSC de compensação de potência para o mesmo ensaio teria a mesma configuração, verticalmente invertida. (MACHADO; MATOS, 2003).

Figura 18 – Curva de DSC de fluxo de calor



Fonte: Machado e Matos (2003, p. 232).

Utilizando esta técnica, é possível conseguir dados sobre temperaturas de transição de polímeros, como:  $T_g$  (temperatura de transição vítrea),  $T_c$  (temperatura de cristalização) e  $T_m$  (temperatura de fusão cristalina). Além de poder aferir características do material como entalpia de fusão ( $\Delta H$ ), e analisar possível degradação térmica durante o uso. (CANEVAROLO JR., 2013).

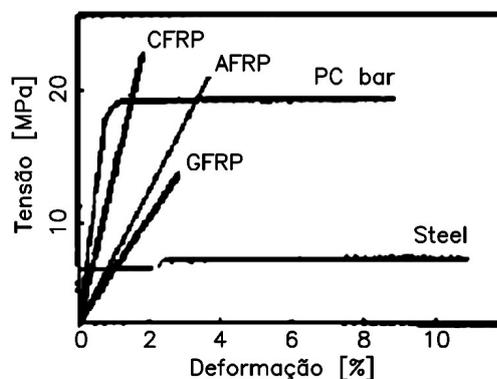
## 2.5. FIBRAS DE REFORÇO

As fibras são responsáveis por resistir à maior parte da carga de tração solicitante, sendo essa a principal propriedade requerida quando inseridas em uma

estrutura de concreto armado. Como já relatado, as principais fibras utilizadas na produção de barras de FRP para armadura são as de carbono, aramida, vidro e álcool polivinílico. Quanto à seção transversal, individualmente, as fibras possuem diâmetros que variam de cerca de 6 microns, para fibras de carbono, até cerca de 15 microns, no caso das fibras de aramida e vidro. (UOMOTO et al., 2002).

Para título de comparação, um gráfico esquemático é apresentado na Figura 19 com a representação das curvas de tensão-deformação dos compósitos constituídos com as principais fibras utilizadas, sendo incluídas também, no mesmo gráfico, as curvas típicas de barras de aço comum e aço utilizado com protensão. As abreviaturas utilizadas no gráfico designam de: CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer* – Polímero Reforçado com Fibras de Carbono), AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymer* – Polímero Reforçado com Fibras de Aramida), GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer* – Polímero Reforçado com Fibras de Vidro), *Steel* (armadura de aço comum), *PC bar* (*Bar Prestressed Concrete* – armadura de aço para protensão). (UOMOTO et al., 2002).

Figura 19 – Curvas típicas de tensão-deformação para alguns compósitos



Fonte: Uomoto et al. (2002, p. 193).

Com análise no gráfico, é possível notar que, apesar de apresentarem maior resistência à tração quando comparados ao aço, os compósitos de FRP possuem pequena deformação até a ruptura, sendo essa, frequentemente, a causa de inviabilidade de aplicação desses compósitos para armadura em concreto, onde é considerado como um dos parâmetros de cálculo nos projetos uma significativa deformação antes da ruptura. (UOMOTO et al., 2002).

Existem barras de FRP para concreto armado comum e protendido, sendo uma das principais diferenças de aplicação a se considerar o nível de tensão

desejado em serviço para escolha da fibra constituinte. Comumente, é optado pelas fibras de vidro quando utilizadas em concreto comum devido ao seu baixo custo, ao passo que, em situações de utilização em concreto protendido, a capacidade de resistir a maiores tensões das fibras de aramida e carbono de alta resistência se torna uma grande vantagem na escolha. (BAKIS et al., 2002).

Abordando individualmente cada tipo de fibra quanto à composição, em uma análise sucinta, fibras de carbono são um aglomerado de cristais de grafite finos, sendo suas características dependentes da composição e orientação desses cristais, fibras de aramida são orgânicas, fortemente orientadas e com grande resistência, fibras de álcool polivinílico são produzidas com álcool polivinílico de alto grau de reticulação, e, durante seu processo produtivo, são enroladas para alcançar maior resistência e elasticidade. Por sua vez, as fibras de vidro mais comuns utilizadas em barras de FRP são de dois tipos, sendo uma com expressiva quantidade de zircônia para prevenção da corrosão por ataques alcalinos da matriz de cimento, e outra com grande quantidade de ácido bórico e aluminato. (UOMOTO et al., 2002).

Com relação aos principais problemas que devem ser considerados especificamente nas fibras de vidro aplicadas em barras para armadura de concreto apresentam-se a lixiviação e o rompimento da estrutura das fibras por íons hidroxílicos, por estarem inseridas em um ambiente aquoso e alcalino. (CHEN et al., 2007).

## 2.6. PULTRUSÃO

A indústria de compósitos possui vários métodos disponíveis para produção, tendo cada processo suas particularidades, que podem ser atraentes ou não, dependendo do produto final a ser produzido. Nas barras de FRP para armadura em concreto o processo mais amplamente utilizado é a pultrusão. (ACI 440R, 2007).

O processo de pultrusão para produtos de FRP foi desenvolvido nos anos de 1970, em resposta a problemas de degradação prematura que vinham sendo encontrados nos compósitos. Tais problemas foram relacionados ao fato de que parte das fibras se encontravam aleatoriamente distribuídas nos FRP, impossibilitando que todas elas contribuíssem na resistência à tração, pois recebiam

tensões diferentes quando solicitadas. (KOBAYASHI et al., 1987, *apud*. UOMOTO et al., 2002).

A técnica do processo consiste na concordância dos materiais envolvidos, sendo eles os reforços de fibras e a resina matriz. A pultrusão é utilizada para moldagem de peças compósitas de perfil transversal constante, em um processo contínuo e que pode ser consideravelmente automatizado, e concede à barra uma estrutura bem característica com fibras longitudinais contínuas imersas em uma matriz polimérica. (ACI 440R, 2007).

Basicamente, os reforços, que podem se apresentar em forma de tecidos, filamentos e outros tipos, são estrategicamente dispostos para serem tracionados entre guias que formam o perfil a ser produzido, passando por um banho de resina que deixa o material de reforço totalmente impregnado da matriz polimérica. Posteriormente, o material saturado de resina é conformado por um molde metálico aquecido, que define a dimensão e forma final da seção transversal da peça, em seguida, parte para um aquecimento controlado, que promove a cura gradual do polímero, através da ativação da polimerização da matriz pelo controle da temperatura transferida à peça, onde a resina passa de líquida para sólida. (ACI 440R, 2007).

Adicionalmente, incorporam-se ao processo, a inserção de tratamentos superficiais específicos utilizados nos produtos. (BAKIS et al., 2002).

Por fim, o perfil (laminado ou barra), já em estado sólido, com a forma final desejada, recebe o corte no tamanho prescrito. (ACI 440R, 2007).

Quanto a custos de fabricação, a pultrusão se apresenta como um dos processos produtivos mais econômicos quando se trata de compósitos reforçados com fibras com seção transversal constante. Esquemáticamente, é apresentada na Figura 20 uma visão geral do processo. (TUTUM; BARAN; DEB, 2014).

Figura 20 – Vista esquemática do processo de pultrusão



Fonte: Adaptado de TUTUM; BARAN; DEB (2014, p. 1206).

Durante o processo de pultrusão, dada a sua configuração, uma pequena tensão é aplicada nas fibras, entretanto, essa tensão é tão diminuta, que não afeta a resistência do produto final. Além disso, essa tensão aplicada durante o processo é responsável por alisar as fibras, eliminando possíveis torções que possam ter, o que proporcionará também, posteriormente, uma distribuição mais uniforme de tensões entre as fibras quando da aplicação do carregamento. (UOMOTO et al., 2002).

Através de toda essa tecnologia envolvida no processo de pultrusão, já é possível fabricar, com essa técnica, desde pequenas barras simples, até perfis complexos e com grandes dimensões, facilitando a aplicação em determinadas obras e otimizando o tempo de construção. Entretanto, peças com grandes dimensões sempre são limitadas pela logística que se tem disponível, fato que, por vezes, torna inviável a aplicação em algumas estruturas, mesmo sendo possível a fabricação. (ACI 440R, 2007).

Outro fato muito importante de ser considerado quando se utiliza pultrusão na produção desses compósitos é que as tensões de fratura das resinas devem ser compatíveis com as fibras. Fibras de vidro ou aramida, que apresentam maior deformabilidade em relação às fibras de carbono, por exemplo, são mais indicadas para serem usadas com resinas éster vinílicas. Enquanto que fibras de carbono são mais adequadas para se utilizar com resinas de epóxi, pois ambas (fibras de carbono e resinas epoxídicas) apresentam menor deformabilidade. (UOMOTO et al., 2002).

## 2.7. COMPORTAMENTO MECÂNICO

Conforme Callister Jr. e Rethwisch (2013), durante o uso de um material em serviço, suas respostas aos estímulos externos dependerão de suas propriedades, podendo-se agrupar as principais propriedades de materiais sólidos em seis categorias, sendo elas: mecânica, elétrica, térmica, magnética, óptica e de deterioração. As relações extraídas entre a deformação do material, frente a uma força controlada aplicada nele, são chamadas de propriedades mecânicas.

Evidentemente, as características dos compósitos de FRP não devem ser negligenciadas para determinação da adequação desse tipo de material em qualquer aplicação requerida. (ACI 440.1R, 2015).

Uomoto et al. (2002) salienta que, enquanto em outras áreas, como mecânica automotiva, eletrônica e engenharia aeroespacial, a utilização predominante dos compósitos de FRP é em formato de placas (duas dimensões), a utilização desse produto combinado com concreto é mais fortemente representada por elementos unidirecionais. Esse fato acarreta em concepções divergentes de propriedades requeridas, pois nos compósitos de duas dimensões a flambagem se apresenta como principal deformação a ser resistida, enquanto que nos elementos unidirecionais, a tração se torna a principal solicitação requerida, sendo mais dirigido o estudo das propriedades do produto no que diz respeito à fluência e módulo de elasticidade.

As propriedades mecânicas dos compósitos de FRP estão diretamente relacionadas com a orientação das fibras em relação ao carregamento, pois eles apresentam comportamento anisotrópico com relação ao sentido de disposição das fibras tanto em barras unidirecionais quanto em placas laminadas de FRP, sendo caracterizados por alta resistência à tração apenas quando o carregamento é paralelo às fibras. (ACI 440.3R, 2012).

Devido aos diferentes formatos e propriedades apresentadas pelos compósitos de FRP, não raras vezes, os padrões e normas existentes não são representativos, ou são até inexistentes para a aferição de alguma propriedade específica. Assim, os dados dos fabricantes com relação aos valores de resistência para projeto, e métodos de testes utilizados pelos fabricantes para encontrar esses resultados divulgados, devem ser analisados e considerados quando da concepção e projeto de alguma estrutura particular, o que torna difícil comparar, entre os diferentes fabricantes, os resultados desses testes. (ACI 440.3R, 2012).

Na aplicação de barras de compósitos de FRP para armadura de concreto, os meios de inserção podem proporcionar alterações das propriedades dessas peças antes, durante e após a construção, devido à possibilidade de reação desse material em ambientes com presença de água, exposição aos raios ultravioletas, deterioração em temperaturas elevadas, soluções alcalinas ou ácidas e soluções com grandes quantidades de sais. O que pode acarretar em aumento, diminuição, ou constância no que diz respeito à resistência e módulo de elasticidade, dependendo dos materiais e aditivos utilizados e do ambiente que se está expondo. (ACI 440.1R, 2015).

Uomoto et al. (2002), salienta que as propriedades mecânicas apresentadas pelas barras de FRP estão relacionadas principalmente com as características das fibras de reforço e da matriz polimérica utilizadas e a relação fibra/matriz empregada na fabricação.

O ACI.440R (2007), acrescenta que, além destes, outros fatores como comprimento da barra utilizada, forma e composição das fibras, e aderência entre fibra e matriz também são cruciais para se conseguir boas resistências em barras de FRP.

No ACI 440.1R (2015), o Instituto Americano do Concreto apresenta tópicos como tipo e orientação das fibras, tipo de resina, controle de qualidade na fabricação, e proporção fibra/matriz como importantes aspectos para bom desempenho das características das barras de FRP. Assim, pode-se também esperar disparidade no comportamento mecânico de barras com mesmo diâmetro aparência e materiais constituintes, porém com diferenças nas taxas de cura do polímero, diferentes processos produtivos ou baixo controle de qualidade no mesmo processo produtivo. (ACI 440.1R, 2015).

Nesse sentido, devido à diversidade de fatores que influenciam nas características das barras de FRP, torna-se difícil chegar a qualquer conclusão generalizada para propriedades dessas barras, entretanto, dentre os aspectos conhecidos e geralmente considerados quando se pensa na aplicação dos compósitos de FRP na construção civil, destacam-se: comportamento linear de tensão/deformação até a ruptura brusca, a deformação apresentada pelos compósitos é significativamente menor quando comparada com o aço, e a resistência à tração é comumente maior que barras de aço de mesmo diâmetro. (UOMOTO et al., 2002).

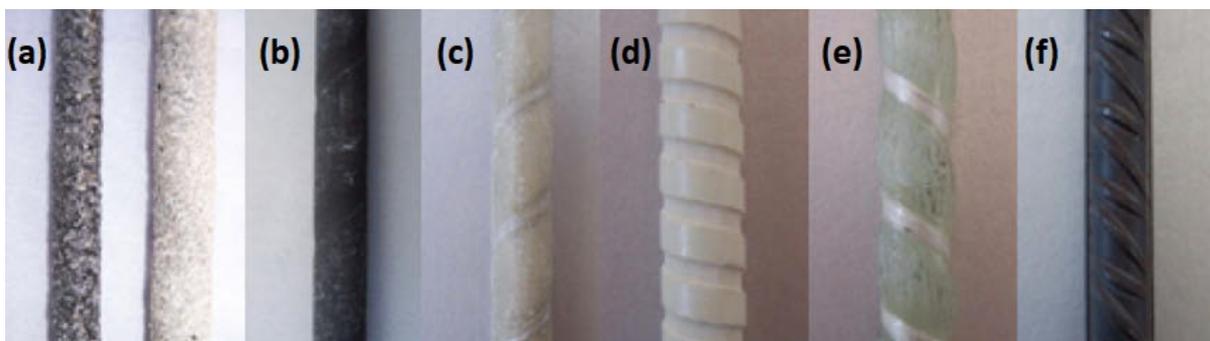
### **2.7.1. Aderência**

Com relação à aderência, para melhorar as forças de ligação dos compósitos de FRP com o concreto, é realizado na barra um tratamento superficial antes da cura da resina, sendo, os mais utilizados, feitos por: moldagem de nervuras ao longo do comprimento da barra; invólucro de filamentos de fibras em forma de hélice ao longo do comprimento da barra; invólucro de filme texturizado ao longo do comprimento da barra, para criação de uma impressão com a remoção dele; e

impregnação de agregados finos ao longo do comprimento da barra, colados com algum tipo de resina, podendo ser optado por utilizar um ou mais tipos destes tratamentos combinados no processo produtivo. (BAKIS et al., 2002).

Em uma pesquisa que se dedicou a analisar, especificamente, o comportamento de aderência de barras de FRP com concreto, foram utilizadas barras fabricadas por diferentes empresas, com tratamentos superficiais diversos. Na Figura 21 são apresentados alguns tipos de tratamentos superficiais analisados nessa pesquisa, sendo: (a) barras de CFRP e GFRP com superfície impregnada com areia; (b) barra de CFRP com superfície texturizada; (c) barra de GFRP com superfície de tratamento combinado de invólucro helicoidal de fibras e impregnação de areia; (d) barra de GFRP com superfície ranhurada; (e) barra de GFRP com invólucro helicoidal de fibras sem areia na superfície; (f) barra de aço utilizada para comparação durante a pesquisa. (BAENA et al., 2009).

Figura 21 – Tratamentos superficiais



Fonte: BAENA et al.(2009, p. 785).

### 2.7.2. Compressão

Com relação ao comportamento à compressão, é de conhecimento que os compósitos de FRP apresentam significativamente menor resistência quando comparados com seu comportamento com relação à tração, sendo, em geral, diretamente proporcionais às resistências apresentadas na tração, ou seja, um compósito reforçado com fibras de carbono, por exemplo, que apresenta maior resistência à tração que um compósito reforçado com fibras de vidro, também apresentará maior resistência à compressão, exceto para compósitos reforçados com fibras de aramida, onde as resistências verificadas quando solicitados à

compressão são significativamente menores que os compósitos com os demais reforços, mesmo quando maiores na tração. (ACI 440.1R, 2015).

Devido essa baixa resistência apresentada, a parcela de contribuição das barras de FRP para resistir à compressão em uma estrutura de concreto deve ser considerada nula, tanto em estruturas predominantemente solicitadas por compressão, como pilares, quanto estruturas predominantemente solicitadas por flexão, como vigas, onde comumente admite-se contribuição de resistência à compressão da armadura de aço. Em situações, por exemplo, onde se apresentam reversões de momentos, é aceitável submeter os compósitos de FRP à compressão, entretanto, deve-se considerar principalmente os dados dos fabricantes de métodos e resultados das resistências à compressão para calcular a adaptação dessa necessidade, devido aos padrões atuais de teste para aferição de resistência de compressão ainda não estarem completamente estabelecidos. (ACI 440.1R, 2015).

### 2.7.3. Resistência à tração

Quanto às solicitações de tração, as barras de FRP apresentam comportamento tensão/deformação linearmente elástico até a ruptura. Estudos experimentais geraram uma tabela com resultados de propriedades de tração para barras de FRP comumente comercializadas apresentados no Quadro 2, considerando volume de fibras de 50% a 70% em relação à massa do compósito. (ACI 440.1R, 2015).

Quadro 2 - Propriedades típicas de tração de barras de reforço

<i>Tipo de reforço</i>	<i>Barra de Aço</i>	<i>GFRP</i>	<i>CFRP</i>	<i>AFRP</i>
<i>Resistência à tração (MPa)</i>	<b>483 a 1600</b>	<b>483 a 690</b>	<b>600 a 3690</b>	<b>1720 a 2540</b>
<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	<b>200</b>	<b>35 a 51</b>	<b>120 a 580</b>	<b>41 a 125</b>

Fonte: Adaptado de ACI 440.1R (2015, p. 10).

Em contraponto ao aço, onde a resistência à tração cresce linearmente com o aumento do diâmetro da barra, nos GFRP, tanto a resistência à tração, quanto o módulo de elasticidade à tração, são parâmetros significativamente influenciados pelo diâmetro da barra. (ACI 440R, 2007) e (ACI 440.1R, 2015). Os compósitos de CFRP não demonstram discordância nessas propriedades como os de GFRP, e os

de AFRP demonstram baixa sensibilidade com relação a variação do diâmetro da seção transversal, apresentando divergências em resultados de diferentes fabricantes. Assim, seja em GFRP, CFRP, ou AFRP, na determinação da tensão máxima e do módulo de elasticidade a serem considerados, deve-se sempre ser obtidas com o fabricante, avaliando os resultados e métodos empregados por ele nos ensaios. (ACI 440.1R, 2015).

Faza (1991) *apud* ACI 440R (2002), relaciona essa variação no comportamento das propriedades dos GFRP com o fato de que as fibras localizadas na região central da barra recebem tensão menor que as fibras localizadas na superfície externa dela, devido ao corte de cisalhamento que ocorre na seção. Como resultado, ocorre uma redução da força máxima resistida e do módulo de elasticidade da peça, conforme aumenta o diâmetro da seção transversal. (ACI 440R, 2002).

No que diz respeito a métodos de testes para determinação das propriedades de resistência à tração das barras de FRP, o ACI 440.1R (2015) já salienta a dificuldade, considerando desafiador esta análise. O problema principal por trás desse ensaio está no surgimento de concentrações de tensão nos pontos de ancoragem da máquina na barra, ocasionando ruptura das fibras das bordas prematuramente nessas regiões, e exigindo uma ancoragem resistente, que distribua melhor a tensão das garras nas barras de FRP ensaiadas. (ACI 440.1R, 2015).

Quando submetidos a tensões de tração, os compósitos de FRP apresentam diferentes modos de falhas típicos, dentre eles, pode-se citar, por exemplo, ruptura nas fibras, fissura da matriz polimérica e falha na região de interface entre fibra/matriz. (UOMOTO et al., 2002).

Em um estudo realizado sobre comportamento mecânico à tração de barras de GFRP e CFRP, em testes acelerados para coleta de dados em diferentes ambientes, Chen et al. (2007) utilizou ancoragem confeccionadas com tubos de aço, com 200mm de comprimento, cortados longitudinalmente, e colados nas barras com resina epóxi, sendo pressionados com abraçadeiras metálicas até a cura completa da resina, como pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 – Barras de FRP com tubos de aço divididos presos nas extremidades



Fonte: CHEN et al. (2007, p. 104).

E foi verificado, nesse estudo, que a falha típica notada nas barras de GFRP, com tratamento superficial de invólucro helicoidal de fibras, se deu através do rompimento inicial das fibras externas da seção transversal, seguido da ruptura do invólucro helicoidal de fibras presente na superfície, como pode ser visualizado na Figura 23. (CHEN et al., 2007).

Figura 23 – Modo de falha típico das barras de GFRP



Fonte: CHEN et al. (2007, p. 107).

#### 2.7.4. Cisalhamento

Quanto à força de cisalhamento interlamelar de barras de FRP, elas apresentam baixa resistência nesse aspecto, pois esta aparece nos pontos que não apresentam reforço de fibras, sendo governadas pela baixa resistência da resina que preenchem estes espaços. Em barras de GFRP com tratamento superficial de invólucro helicoidal de fibras, semelhantes às anteriormente apresentadas na Figura 22, essas fibras helicoidais contribuem para a resistência ao cisalhamento das barras por estarem ordenadas em uma direção fora do eixo das fibras longitudinais. Entretanto, análogo às outras propriedades desse produto, sempre devem ser

consultados os métodos de testes e resultados fornecidos pelos fabricantes quando da necessidade das propriedades de cisalhamento para alguma estrutura particular. (ACI 440.1R, 2015).

### **2.7.5. Vida útil**

Devido à recente adoção desse tipo de reforço em relação ao aço já utilizado amplamente, um grande problema na utilização de barras de FRP foi o desconhecimento de seu comportamento em longo prazo. Tanto em relação ao aumento de tensão com carga constante, quanto em relação à diminuição da carga resistida quando em constante deformação. Tornando a fadiga um dos principais empecilhos para aplicação desse material. (UOMOTO et al., 2002).

Quanto à fluência, de maneira geral, as fibras de vidro são as mais suscetíveis a sofrer ruptura quando em tensões constantemente aplicadas, seguidas pelas fibras de aramida e de carbono, que sofrem menor impacto nesse aspecto. Fato que contribui para altos coeficientes de segurança adotados nos cálculos de estruturas de concreto com esses reforços. (ACI 440.1R, 2015).

Para contribuir com o conhecimento atual sobre o ciclo de vida dos compósitos de FRP utilizados como armadura para concreto, tendo em vista a grande variabilidade de ambientes possíveis de inserção de estruturas de concreto armado, é de fundamental importância a confecção de testes de durabilidade em longo prazo. Tais ensaios devem ser adequados para cada situação que se deseja aplicar, podendo, por exemplo, considerar situações como: ciclos constantes de molhagem e secagem, sais marinhos em estruturas costeiras ou sais para degelo em regiões de clima frio, e ataques químicos gerados pelo concreto, devido aos elevados valores de pH, na faixa de 12,4 a 13,7. (CHEN et al., 2007).

Uomoto et al. (2002) também reforça que em aplicações de barras de FRP como reforço interno de concreto, a alta durabilidade em ambiente alcalino é uma importante propriedade requerida, enquanto que na utilização de lâminas de FRP para reforço externo de estruturas, a durabilidade contra radiação UV se torna uma propriedade mais interessante. Assim, a durabilidade de produtos de FRP pode ser relacionada com diversos fatores, como as propriedades das resinas e das fibras, características de superfície utilizadas no processo de fabricação e meio ambiente onde estão inseridas, sendo os resultados de testes acelerados em laboratórios

apenas uma representação de um comportamento geral, que pode ser considerado para a criação de uma bateria de testes apropriadas à real utilização que se dará aos compósitos, formuladas caso a caso. (UOMOTO et al., 2002).

### **2.7.6. Recomendações de projeto**

Levando em consideração todos os fatores apresentados, e outras características não abordadas completamente sobre o comportamento conhecido dos materiais de FRP, um projeto estrutural que prevê a utilização desse tipo de material ainda é considerado muito conservador, pois em vários parâmetros utilizados de forma empírica, são previstos coeficientes de segurança para tentativa de diminuição dos erros atrelados a eles. (ACI 440.1R, 2015).

Mesmo com análises de capacidade de tensões análogas ao aço, todas as diferenças nas propriedades encontradas na comparação de barras de FRP com barras metálicas devem ser consideradas para uma adequação da teoria do projeto estrutural. Sendo uma das mais relevantes a questão de que as barras de FRP apresentam tensão/deformação linear até a ruptura, não podendo ser considerada em projeto a ductilidade apresentada por elementos metálicos. (BAKIS et al., 2002).

Pilakoutas et al. (2002) salienta também que na adoção de qualquer tipo de material estrutural novo, como as barras de FRP, o processo de desenvolvimento de padrões de testes para criação de um método de cálculo maduro pode levar muitos anos para ser concluído, e durante esse processo, os níveis reais de segurança ou de confiabilidade dos cálculos não são totalmente mensuráveis ou conhecidos, variando entre os diferentes fabricantes, entre o método considerado no cálculo e até mesmo entre as solicitações que está se analisando, devido também ao seu comportamento anisotrópico, acarretando em coeficientes de segurança radicais para evitar ruptura das estruturas, principalmente na consideração de solicitações de abalos sísmicos. (PILAKOUTAS et al., 2002).

Tantas considerações de segurança expostas, levam o ACI 440.1R (2015) relatar que o uso de reforço de FRP ainda deve ser limitado a estruturas que se beneficiarão significativamente de suas propriedades, como o comportamento não corrosivo ou não-condutor que apresentam. (ACI 440.1R, 2015).

Atualmente, os aspectos mais conhecidos para concepção de projetos com barras de FRP são quanto às solicitações de flexão, onde já se dispõem de

princípios básicos bem evoluídos. Resumidamente se considera dois modos de ruptura, sendo que, quando empregado barras com baixa proporção fibra/matriz, considera-se que a ruptura será por tração nas barras de FRP, enquanto que, quando previsto o emprego de barras com alta proporção fibra/matriz, considera-se que a ruptura será por compressão no concreto antes de se alcançar a tensão máxima de tração das barras de FRP. Ambos os modelos de ruptura apresentarão pouca ou praticamente nenhuma plasticidade, entretanto, o modelo que considera a ruptura no concreto ainda é considerado mais desejável, pois apresenta uma falha levemente mais gradual, com maior absorção de energia e deformabilidade antes da ruptura. (BAKIS et al., 2002).

O ACI 440.1R (2015) prevê que a compensação da falta de ductilidade das barras de FRP deve ser feita pelo emprego de um coeficiente de segurança consideravelmente maior que o coeficiente utilizado em estruturas de aço, além de que, na previsão de barras de FRP com curvas, a resistência à tração considerada pode reduzir de 40% a 50%, comparada a resistência apresentada por barras retas. (ACI 440.1R, 2015).

Bakis et al. (2002) relata que alguns meios alternativos para verificação de sinais de ruptura podem ser empregados para maior segurança de uma estrutura, sendo baseados em uma “pseudoductilidade” que a estrutura apresentaria antes da falha, como índices de deformabilidade, que exigiriam constante monitoramento das estruturas. Adicionalmente, o ACI 440.1R (2015) também explana sobre alguns sinais limitados de falha que poderiam ser visualizados em estruturas de concreto armado com barras de FRP antes da ruptura, como extensas fissuras e certa deflexão, os quais também exigem monitoramento constante para identificação.

Outro aspecto de grande importância para projetos estruturais, trazido em um estudo por Uomoto et al. (2002), é que devido a fragilidade das barras de FRP na ruptura, nos elementos estruturais de concreto em flexão, que se considerar várias camadas de reforço à tração, como constantemente é considerado em vigas nos projetos que preveem utilização de aço para armadura, é provável que aconteça a ruptura da estrutura ao atingir a capacidade de resistência máxima apenas da camada mais externa das barras de FRP, mesmo que as outras camadas ainda não tenham apresentado toda sua resistência. Ainda segundo Uomoto et al. (2002), isso aconteceria pois, diferentemente do aço, onde sua grande deformabilidade, em um caso análogo, proporcionaria que todas as camadas entrassem em carregamento

mesmo depois da camada mais externa já estivesse teoricamente “passado” de sua máxima resistência, nos FRP, a falta de ductilidade faz as camadas mais externas romper bruscamente, sem possibilitar que a área total de reforço à tração seja efetivamente utilizada.

### **2.7.7. Comportamento em temperaturas elevadas**

Em um ambiente com elevada temperatura, o comportamento de um elemento de concreto armado com barras de FRP ainda não é bem conhecido, sendo mais um desafio para concepção de um projeto com segurança que se utilize desses compósitos, assim, essa é outra questão importante, em relação a esses materiais, que também carecem de pesquisas para melhor entendimento. (CORREIA et al., 2010).

Atualmente, alguns estudos já demonstram itens como o tipo de reforço, tipo de agregado e espessura do concreto de recobrimento das barras como importantes no desempenho ao fogo dessas estruturas, pois diferentes tipos de barras se comportarão de diferentes maneiras quando aquecidas, e na transferência de calor para as barras, dois fatores que influenciarão consideravelmente serão o tipo de agregado e a espessura do recobrimento das barras, conseqüentemente alterando as temperaturas experimentadas por esses reforços. (ACI 440.1R, 2015).

Sabe-se que a matriz orgânica que compõem os compósitos de FRP, sendo predominantemente polímeros termofixos, quando moderadamente aquecida, com temperaturas na faixa de 100°C a 200°C, amolecem e se deformam, podendo levar a grandes deformações e posterior ruptura do elemento de concreto, além de que, quando expostas a temperaturas mais elevadas, na faixa entre 300°C a 500°C, se decompõem e trazem com essa reação a liberação de calor, fumaça, compostos voláteis tóxicos e fuligem. (CORREIA et al., 2010).

As propriedades da matriz polimérica na superfície da barra são fundamentais para a manutenção de uma boa aderência entre barra e concreto, entretanto, em temperaturas elevadas, as propriedades de aderência entre barra de FRP e concreto são diminuídas, devido à degradação apresentada pelo polímero. (ACI 440.1R, 2015).

Conforme Katz e Berman (2000), ao atingir a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), o polímero inicia o processo de perdas de suas propriedades mecânicas, e a

aderência do compósito com o concreto passa a ser predominantemente promovida por uma aderência residual do material inorgânico não degradado, no caso, das fibras. Diante disso, o ACI 440.1R (2015) prevê que não deve se utilizar as barras de FRP em ambientes que apresentem uma temperatura de serviço acima da  $T_g$  da resina do compósito em questão, para que se assegurem as propriedades mecânicas do polímero e a aderência entre compósito e concreto.

Com relação ao comportamento em temperaturas elevadas, um fator também muito importante é que nos compósitos de FRP ocorre uma expansão térmica significativamente maior na direção transversal, quando comparada com a expansão térmica apresentada por eles na direção longitudinal, sendo os coeficientes de expansão térmica dependentes do tipo de fibras, tipo de resina e fração de fibra/matriz empregada. O maior problema atrelado a esse fato é que o coeficiente de expansão térmica transversal das barras de FRP também é superior ao do concreto, o que pode acarretar fissuras no concreto devido ao aumento de volume, e até possível desagregação de fragmentos de concreto, se a expansão for suficientemente elevada. (ACI 440.1R, 2015).

Quanto a aspectos positivos do comportamento de barras de FRP em elevadas temperaturas, algumas pesquisas relacionam que, apesar da diminuição das propriedades de aderência devido à degradação da matriz polimérica, esse fato pode não ser tão relevante se um comprimento de barra significativo estiver promovendo uma ancoragem em uma região fora da área exposta às temperaturas elevadas, possibilitando que barras devidamente ancoradas apresentem resistências consideráveis, mesmo acima da temperatura de  $T_g$ . Além de que os compostos orgânicos voláteis presentes na composição das barras de FRP não contribuem fortemente para a toxicidade de um incêndio, devido ao fato do reforço se apresentar incorporado no concreto. (ACI 440.1R, 2015).

Outra propriedade que pode ser considerada atraente em relação ao comportamento em altas temperaturas, é que, em comparação com o aço que comumente é utilizado como armadura, os compósitos de FRP são muito bons isolantes térmicos, o que pode diminuir a propagação do calor entre ambientes, e, quando necessário, algumas medidas podem também ser tomadas para maximizar ainda mais o desempenho dos compósitos de FRP em situações de elevadas temperaturas, com aplicação de componentes específicos na superfície das barras. (CORREIA et al., 2010).

Com todas as questões de comportamento em elevadas temperaturas apresentadas, além de outras não abordadas, um projetista que se proponha utilizar de barras de FRP deve compreender as singularidades das propriedades e comportamento desse material, para adoção de critérios adequados de consideração dos eventos possíveis. Como, por exemplo, adequar aos cálculos já conhecidos a significativa redução da aderência das barras apresentada no aquecimento das estruturas, sendo esse um item não considerados tipicamente para barras de aço. (ACI 440.1R, 2015).

Para realização de ensaios em elevadas temperaturas, como testes de comportamento em incêndio para estruturas de concreto armado com FRP, deve-se utilizar a norma ASTM E119, e na maioria dos casos, é necessário que se considerem estruturas de concreto em escala real, mesmo que testadas por partes, mas em condições de carregamentos análogas às que serão encontradas na construção. Se algum método alternativo em escala reduzida for proposto, este deve ser ponderado para consideração global das circunstâncias que se apresentarão para a estrutura em questão, não apenas considerando a temperatura no FRP. (ACI 440.1R, 2015).

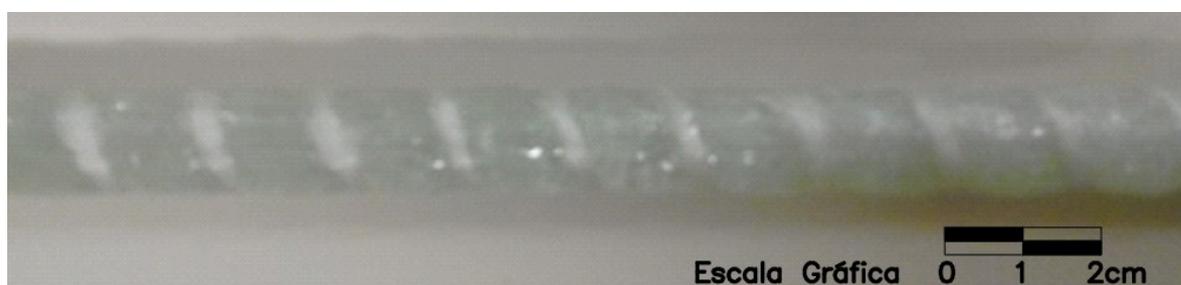
### 3. METODOLOGIA

Os corpos de prova utilizados na pesquisa foram barras de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP), fabricados por uma empresa nacional que será mantida anônima, a qual apresenta em seu portfólio não só barras para uso como armadura de concreto, mas também perfis, grades, e outros produtos compósitos utilizados principalmente em áreas industriais que apresentam ambiente potencialmente agressivo para outros tipos de materiais como o aço.

Segundo especificação do fabricante, o padrão de resina utilizado para esta aplicação é éster vinílico, por conta da elevada resistência química e por se mostrar a mais adequada para esta aplicação, porém, ainda segundo o próprio fabricante, do ponto de vista de fabricação, não há restrição de utilizar qualquer outro padrão de resina. A proporção de fibra nas barras, em peso, é maior que 80% em relação à matriz, o tratamento superficial utilizado pela empresa para esse material é de invólucro helicoidal de fibras, o processo produtivo é através da pultrusão, e as barras apresentam cor branca leitosa.

Todas as amostras recebidas possuíam 0,50m de comprimento e diferentes diâmetros, tendo quatro amostras para cada diâmetro. Na Figura 24, pode-se ver em detalhe um segmento de uma das amostras recebidas, onde é possível identificar visualmente algumas características físicas das barras citadas na descrição do fabricante.

Figura 24 – Detalhe do segmento de uma das amostras



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

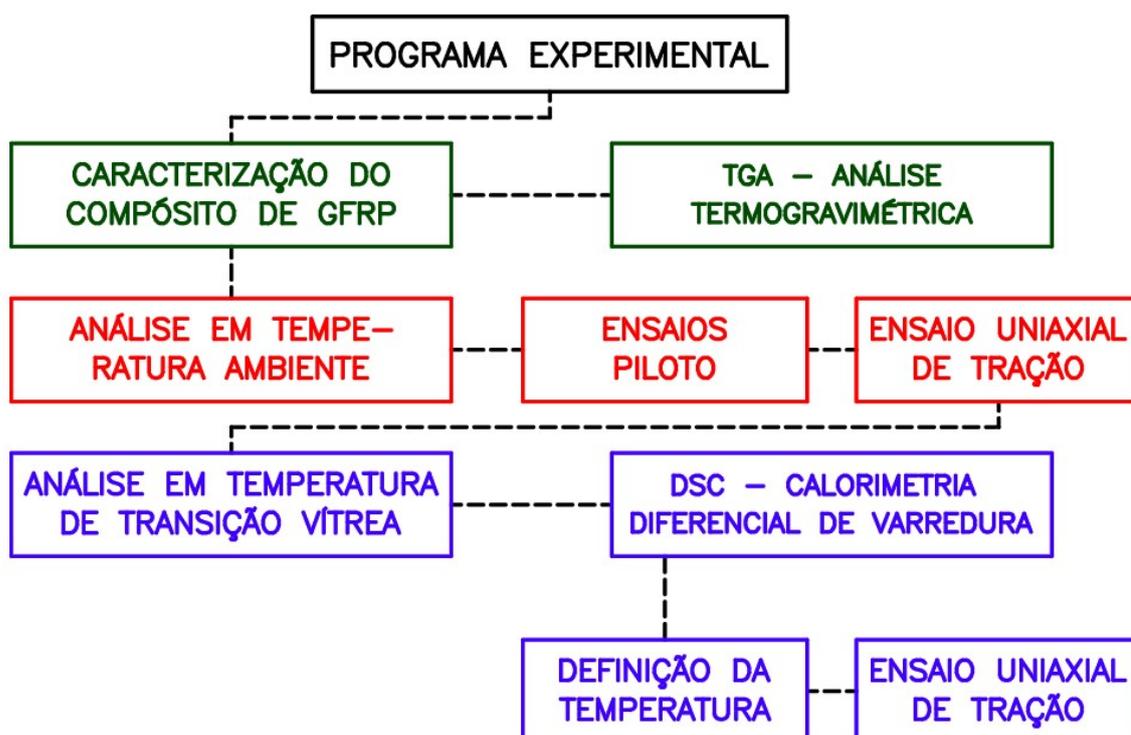
Como base para definição de ensaios e normas sobre o assunto foram utilizados principalmente materiais do ACI (Instituto Americano de Concreto - *American Concrete Institute*), por ser um instituto mundialmente respeitado, com

padrões constantemente revisados, e um Comitê (*Committee 440 - Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement*) que, conforme contextualizado no subcapítulo 2.2, se dedica especificamente a pesquisas e divulgação de informações e documentos de compósitos de polímero reforçado com fibras para reforço interno e externo de concreto, com abrangente conteúdo sobre o tema.

Adicionalmente, foram consultados livros, vídeos, trabalhos acadêmicos, normas técnicas padrão ASTM (por vezes apontadas pelos materiais do ACI), e, em maior quantidade, artigos técnicos internacionais publicados sobre pesquisas realizadas com os compósitos de FRP, haja vista que esse tipo de material se apresentou como a principal categoria de publicações encontradas sobre o tema.

A pesquisa foi dividida em três partes, iniciando por uma caracterização para maior familiarização com o material, seguida de análise do comportamento elástico na tração em função do diâmetro em temperatura ambiente, e, por fim, uma análise realizada com as barras expostas à uma temperatura ligeiramente maior que a temperatura de transição vítrea da matriz polimérica constituinte das barras. Esquemáticamente, está apresentado na Figura 25 um fluxograma do programa experimental realizado.

Figura 25 – Fluxograma do programa experimental



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

### 3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DAS BARRAS DE GFRP

Na caracterização da estrutura das barras de GFRP, a metodologia empregada foi através de análise térmica realizada para melhor compreensão e familiarização com a composição do material.

Foi utilizada uma amostra de diâmetro 13,00 mm, para retirada de fragmentos do material necessário na realização do ensaio de análise termogravimétrica e análise termogravimétrica derivada (TGA/DTG), o qual foi realizado duas vezes, devido a incoerências nos resultados apresentados na primeira bateria de testes em relação à descrição passada pelo fabricante. Esses ensaios foram terceirizados, juntamente com a análise de DSC que será abordada posteriormente no subcapítulo 3.3, sendo executados por laboratórios químicos específicos para caracterização de polímeros.

A primeira bateria de testes foi realizada no Centro Tecnológico de Polímeros SENAI, localizado em São Leopoldo/RS, com material retirado da periferia da seção transversal da barra, conforme apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Foto da amostra de GFRP - detalhe nas regiões onde foram coletados materiais para as análises.



Fonte: Centro Tecnológico de Polímeros SENAI (2018).

Posteriormente foram necessários novos ensaios, os quais foram realizados no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais - LCVMat, localizado no campus da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos, em São Leopoldo/RS, e, para essa bateria, foi entregue ao laboratório uma amostra previamente preparada da mesma barra de 13mm, sendo uma das partes de um segmento cortado longitudinalmente em quatro partes semelhantes, para retirada de fragmentos de material da região central da seção transversal da barra. O local de extração dessa amostra é apresentado na Figura 27 (a), e um detalhe da seção transversal da amostra preparada está apresentado na Figura 27 (b).

Figura 27 – Foto da amostra de GFRP (a) Detalhe nas regiões onde foram coletados materiais para as análises; (b) Detalhe seção transversal preparada.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2018).

No Centro Tecnológico de Polímeros SENAI (São Leopoldo/RS), a análise térmica de TGA foi realizada utilizando um analisador *Q500* da *TA Instruments*, para elevar a temperatura de 25°C a 900°C, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min, Atm de N<sub>2</sub> de temperatura ambiente até 600°C e Atm de Ar sintético de 600°C até 900°C, com método em conformidade com a ASTM E1131/14.

No Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais - LCVMat, localizado no campus da Unisinos (São Leopoldo/RS), a análise térmica de TGA foi realizada utilizando um analisador *PerkinElmer STA 8000*, para elevar a temperatura de 25°C até 850°C, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min e Atm de N<sub>2</sub> durante todo o ensaio.

A interpretação das curvas de TGA/DTG obtidas nos gráficos dos resultados de ambos os ensaios foi realizada conforme explicações expostas no subcapítulo 2.4.1.1.

### 3.2. COMPORTAMENTO ELÁSTICO NA TRAÇÃO – TEMPERATURA AMBIENTE

A propriedade pesquisada foi o módulo de elasticidade na tração das barras de GFRP, para posterior análise do comportamento desse módulo com variação do diâmetro, pois, como relatado no subcapítulo 2.7.3, em contraponto ao aço, onde a resistência à tração cresce linearmente com o aumento do diâmetro da barra, nos GFRP, tanto a resistência à tração, quanto o módulo de elasticidade à tração, são parâmetros significativamente influenciados pelo diâmetro da barra. (ACI 440R, 2007) e (ACI 440.1R, 2015).

Conforme Beer e Johnston Jr. (2011), o módulo de elasticidade é aferido na região linear de um gráfico tensão/deformação específica, onde ambas as grandezas são proporcionais. Nesse intervalo, habitualmente se projetam as

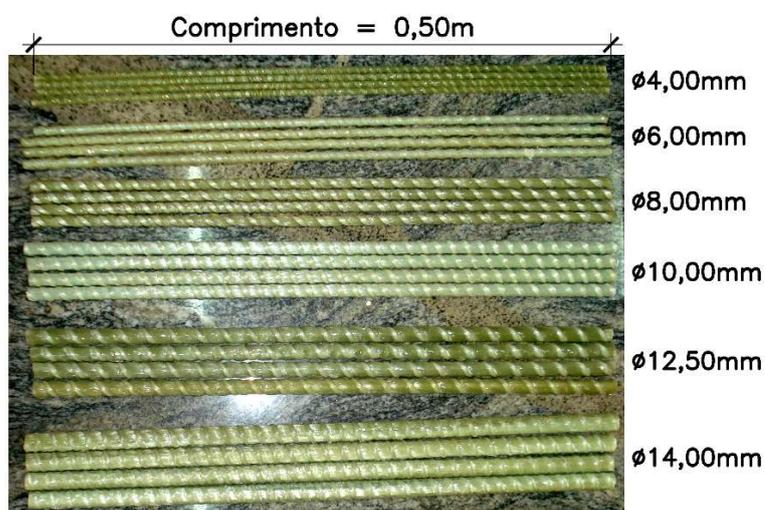
estruturas, e, ele é relacionado com a rigidez do material, ou, de forma análoga, à capacidade de resistir às deformações.

Para medição do módulo de elasticidade, e posterior análise do comportamento referido pelos documentos do ACI, foi seguido o ASTM D7205/D7205M (2016), pois, conforme apresentado no subcapítulo 2.2.1, é prescrito pelo ACI 440.3R (2012) como o padrão atual que confere o método de teste empregado para aferição das propriedades de tração de barras compostas de matriz de polímero reforçado com fibras.

No âmbito geral, todos os materiais aqui ensaiados foram fabricados pelo método da pultrusão, com utilização de polímero termofixo vinil éster reforçados com fibras de vidro, sendo essas fibras com percentual de aproximadamente 86% em massa na composição das barras. Todas as amostras foram mantidas acondicionadas em ambiente coberto e arejado, protegidas da luz solar e da umidade, e o laboratório, durante a realização desse ensaio, foi mantido em atmosfera padrão, com temperatura de  $23 \pm 3^\circ\text{C}$ . Demais informações relevantes dos ensaios, as quais tiveram ajustes durante o processo, serão relatadas posteriormente.

O lote recebido da empresa fabricante já estava separado com identificação das amostras conforme diâmetro nominal da seção transversal, não necessitando de aferição de diâmetro pelo método prescrito na ASTM D7205/D7205M (2016). Os corpos de prova utilizados nesta etapa da pesquisa estão apresentados na Figura 28, com a devida especificação.

Figura 28 - Amostras utilizadas nos ensaios de tração



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Conforme ASTM D7205/D7205M (2016), o teste é basicamente definido por uma barra de FRP, comumente dotada de dispositivos para ancoragem, carregada de forma uniaxial em uma máquina de ensaios mecânicos até a ruptura por tração, enquanto se faz o registro da força aplicada e deformação longitudinal. A máquina utilizada foi da marca *MTS modelo MTS Landmark® Testing Solutions 370.25*, do laboratório de ensaios mecânicos da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos (Campus São Leopoldo/RS), que pode ser visualizada na Figura 29, durante um dos ensaios da pesquisa.

Figura 29 – Máquina de teste de tração



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Com essa configuração, as propriedades que podem ser extraídas com a utilização desse método incluem: força máxima de tração, tensão máxima à tração,

módulo de elasticidade e gráfico tensão/deformação dos corpos de prova ensaiados. (ASTM D7205/D7205M, 2016).

Cabe ressaltar que, assim como relatado pelo ASTM D3916 (2016).no subcapítulo 2.2.1, e pelo ACI 440.1R (2015) no subcapítulo 2.7.3,.a norma aqui utilizada, a saber, a ASTM D7205/D7205M (2016), também salienta o desafio atrelado à execução desse ensaio, devido a alta resistência à tração axial, e a baixa resistência à compressão transversal apresentada pelos compósitos, o que acarreta na concentração de tensões de compressão das garras, e impede que o rompimento do compósito aconteça por solicitações de tração longitudinal. Desta forma, o método sugere a confecção de ancoragens, apresentadas no subcapítulo 2.2.1 com capacidade de resistência à compressão de modo a distribuir a força aplicada pela garra sobre as barras.

Esta dificuldade foi percebida durante o processo experimental realizado, e algumas amostras ensaiadas inicialmente serviram como piloto, para que se conseguisse atingir uma combinação de parâmetros que possibilitassem a correta realização dos ensaios, com possibilidade de extração de dados para análise.

Nesses ensaios piloto, foi averiguado, primeiramente, o comportamento das barras quando da realização do teste sem nenhum tipo de ancoragem. Nesta etapa foram utilizadas duas amostras de 10,00mm de diâmetro, e, como já se esperava pelas pesquisas bibliográficas realizadas, o comportamento das amostras ensaiadas nessa configuração foi inadequado para consideração do resultado como apropriado para análise da propriedade pesquisada, porém válido para certificar-se da inviabilidade de execução dos testes com essa configuração, e prosseguir com as pesquisas de possíveis ancoragens.

Posteriormente, foram pesquisados alguns tipos de ancoragens, dos quais se podem citar os previstos nas ASTM D3916 (2016) e ASTM D7205/D7205M (2016), apresentados no subcapítulo 2.2.1, além do método citado no subcapítulo 2.7.3, utilizado por Chen et al. (2007), para estudo sobre comportamento mecânico em testes acelerados, e, foi identificado que a ancoragem que melhor se adaptou ao teste seria a ancoragem sugerida pelo ASTM D7205/D7205M (2016).

Para contribuição de futuras pesquisas, especialmente se tratando das ancoragens para esse tipo de teste, está apresentado no “Apêndice A” uma explicação das etapas e materiais utilizados para confecção das ancoragens que

demonstraram comportamento satisfatório nos ensaios, juntamente com exemplos de falhas encontradas quando se tentou realizar o teste sem esses dispositivos.

Houve necessidade de algumas adaptações do método prescrito pelo ASTM D7205/D7205M (2016) impostas pelas amostras recebidas, sendo uma delas devido ao fato que os corpos de prova disponíveis totalizavam 50,00cm de comprimento, e, subtraindo o comprimento de 7,00cm já definido das ancoragens, mais um pequeno avanço após as ancoragens, se trabalhou com um comprimento livre de 35,00cm, o qual ficava próximo do comprimento livre mínimo. E a outra, relacionada com a expressiva quantidade de amostras utilizadas teste piloto, totalizando 09 unidades em uma amostragem de 24 corpos de prova, representando praticamente 38% das amostras utilizadas, o que se deve ao fato de se tratar de um estudo em um material inovador, com poucas informações de testes para esse material, assim, muitos parâmetros importantes foram sendo testados e ajustados. No Quadro 3 estão relacionadas as 24 amostras apresentadas na Figura 27, com o apontamento do uso de cada uma na pesquisa, agrupadas pela sinalização das cores.

Quadro 3 – Organização das amostras da pesquisa

<b><i>Diâmetro [mm]</i></b>	<b><i>Amostra</i></b>	<b><i>Utilização</i></b>
4,00	4.1	Ensaio piloto com ancoragem
	4.2	Ensaio uniaxial de tração com aplicação de temperatura
	4.3	Ensaio uniaxial de tração
	4.4	Ensaio uniaxial de tração
6,00	6.1	Ensaio piloto com ancoragem
	6.2	Ensaio uniaxial de tração com aplicação de temperatura
	6.3	Ensaio uniaxial de tração
	6.4	Ensaio uniaxial de tração
8,00	8.1	Ensaio piloto com ancoragem
	8.2	Ensaio uniaxial de tração com aplicação de temperatura
	8.3	Ensaio uniaxial de tração
	8.4	Ensaio uniaxial de tração
10,00	10.1	Ensaio piloto sem ancoragem
	10.2	Ensaio piloto sem ancoragem
	10.3	Ensaio piloto com ancoragem
	10.4	Ensaio piloto com ancoragem
12,50	12,5.1	Ensaio piloto com ancoragem
	12,5.2	Ensaio uniaxial de tração com aplicação de temperatura
	12,5.3	Ensaio uniaxial de tração
	12,5.4	Ensaio uniaxial de tração
14,00	14.1	Ensaio piloto com ancoragem
	14.2	Ensaio uniaxial de tração
	14.3	Ensaio uniaxial de tração
	14.4	Ensaio uniaxial de tração com aplicação de temperatura

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A velocidade do ensaio foi um parâmetro ajustado durante os testes, que teve valor inicial em 1mm/s, sendo diminuída até 0,02mm/s, a qual é a mesma prescrita pela ABNT NBR ISO 6892 (2015) para testes em corpos de prova metálicos. Dessa forma foi alcançada a condição imposta pela ASTM D7205/D7205M (2016), de taxa de deformação constante, de modo a produzir ruptura entre 1 a 10 minutos, a partir do início da aplicação da força.

Outra questão verificada dos ensaios piloto foi a pressão exercida pelas garras da máquina nas ancoragens, pois nos primeiros ensaios foram utilizados controles automáticos de pressão nas garras, o que acarretou em pressões muito elevadas, e gerou ruptura frágil das resinas de enchimento das âncoras antes da barra poder chegar à falha, assim, nos ensaios que se seguiram, foi delimitado 7MPa de pressão nas garras, o que proporcionou segura proteção contra o deslizamento das ancoragens, ao mesmo tempo que possibilitou a condução dos ensaios até a falha. Com exceção das barras de diâmetro 12,50mm, as quais apresentaram leve deslizamento durante o ensaio, e foi aumentada a pressão nas garras para que possibilitasse continuação dos testes.

Para análise dos dados extraídos dos ensaios, a norma prevê, ainda, as Fórmulas 1, 2 e 3, referidas abaixo, para tensão, deformação específica e módulo de elasticidade, respectivamente. (ASTM D7205/D7205M, 2016).

$$\sigma_i = P_i/A \quad (1)$$

$$\varepsilon_i = \delta_i/L_g \quad (2)$$

$$E_{chord} = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon \quad (3)$$

Onde, segundo apresentado na ASTM D7205/D7205M (2016):

- a)  $\sigma_i$  = tensão de tração no i-ésimo ponto [MPa]
- b)  $P_i$  = força de tração no i-ésimo ponto [N]
- c)  $A$  = área da seção transversal [mm<sup>2</sup>]
- d)  $\varepsilon_i$  = deformação específica no i-ésimo ponto [mm/mm]
- e)  $\delta_i$  = deslocamento no i-ésimo ponto [mm]
- f)  $L_g$  = comprimento inicial de controle [mm]
- g)  $E$  = módulo de elasticidade [MPa]
- h)  $\Delta\sigma$  = variação de tensão [MPa]
- i)  $\Delta\varepsilon$  = variação de deformação específica

Essas fórmulas foram utilizadas ponto a ponto para geração dos gráficos tensão/deformação e cálculo dos módulos de elasticidade, tendo como base, para esse último, os intervalos lineares dos gráficos.

### 3.3. COMPORTAMENTO ELÁSTICO NA TRAÇÃO – TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTEA

Adicionalmente, foram realizados estudos na pesquisa para análise do desempenho das barras de GFRP quando expostas a elevadas temperaturas através da verificação do comportamento do módulo de elasticidade, não sendo o objetivo mensurar a exata variação das propriedades após o aquecimento das barras, visto a pequena amostragem utilizada e a configuração adotada para o teste.

É importante ressaltar que todos os parâmetros e as adaptações utilizadas para os ensaios de tração em temperatura ambiente foram mantidos para esses ensaios, sendo assim, todo o exposto no subcapítulo 3.3 sobre velocidade, ancoragem, dimensões das amostras e máquina utilizada são válidos nesta etapa da pesquisa. Da configuração do ensaio, apenas foi adicionado um forno da marca Sanchis, que fica estrategicamente acomodado entre as garras da máquina de testes, equipado com resistências elétricas de modo a aquecer os corpos de prova durante a realização dos ensaios.

Conforme Eltz (2017), esse forno foi idealizado em um trabalho de conclusão de curso de um aluno da Engenharia Mecânica da Unisinos, sendo desenvolvido especificamente para essa máquina. O forno ainda conta com sensores de temperatura tipo termopares, que medem constantemente a sua temperatura interna, sendo essa processada e expressa em tempo real no display digital localizado no módulo de controle, onde é também possível fazer a escolha da temperatura requerida, e acompanhar quando essa se apresenta constante. (ELTZ, 2017).

Nos ensaios realizados nesta etapa da pesquisa, foram instaladas as amostras, realizado fechamento do forno, e posteriormente aguardado cerca de 2 minutos para estabilização e constância da temperatura de 205°C no forno, sendo acompanhada pelo módulo de controle, para que então fosse iniciada a tração nas barras. Na Figura 30 está apresentada a máquina durante um dos testes realizados, já equipada com o referido forno.

Figura 30 – Máquina de teste de tração com forno



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Algumas ponderações são importantes para contextualização desse experimento, tendo em vista o exposto no subcapítulo 2.7.7, principalmente é importante ressaltar que não pode se considerar esse ensaio como um teste de comportamento em situações de incêndio, pois em tal teste, como relatado pelo ACI 440.1R (2015) no item mencionado, deve-se utilizar a norma ASTM E119, e na maioria dos casos, é necessário que se considerem estruturas de concreto em escala real, mesmo que testadas por partes, mas em condições de carregamentos análogas às que serão encontradas na construção, não apenas considerando a temperatura no FRP, que foi a metodologia que se aplicou.

Entretanto, alguns cuidados foram tomados para que pudesse servir de base para futuros experimentos. Por exemplo, foram mantidas as ancoragens fora do forno utilizado para aquecimento, de maneira que se configurasse o ambiente relatado pelo ACI 440.1R (2015) no subcapítulo 2.7.7, quando menciona que, apesar da diminuição das propriedades de aderência devido à degradação da matriz polimérica, esse fato pode não ser tão relevante se um comprimento de barra significativo estiver promovendo uma ancoragem em uma região fora da área exposta às temperaturas elevadas. Assim, a temperatura não afetou as ancoragens das barras, possibilitando que essas fossem mantidas em carregamento durante a execução dos testes.

A amostragem utilizada para essa análise foi de cinco corpos de prova, sendo um de cada diâmetro das barras ensaiadas à tração em temperatura ambiente, a saber: 4,00mm; 6,00mm; 8,00mm; 12,50mm; e 14,00mm.

Quanto à temperatura adotada, sendo as barras, conforme descrição do fabricante, compostas por polímero vinil éster, e sendo esse um polímero termofixo que, como relatado no subcapítulo 2.4 por Askeland e Wright (2014), possuem estrutura amorfa, sendo tão amorfo quanto maior o número de ligações cruzadas. Uma temperatura que afeta fortemente suas propriedades é a temperatura de transição vítrea ( $T_g$  - *glass temperature*), pois, como relatado no mesmo item, segundo Canevarolo Jr. (2013), indica a faixa de temperatura média, que ocorre durante o acréscimo de temperatura em um polímero, onde inicia a fase que as moléculas adquirem mobilidade, deixando o estado vítreo que anteriormente se encontravam, com características de sólido duro, rígido e quebradiço, para um estado com comportamento flexível borrachoso.

Diante disso, essa se apresentou como uma temperatura relevante de se considerar, pois, mesmo que não pudesse caracterizar como ensaio de comportamento em situações de incêndio, é uma condição importante para os materiais que constituem esse compósito, confrontando as observações mencionadas no subcapítulo 2.7.7, onde é relatado que o ACI 440.1R (2015) prevê que não deve se utilizar as barras de FRP em ambientes que apresentem uma temperatura de serviço acima da  $T_g$  da resina do compósito, para que se assegurem as propriedades mecânicas do polímero.

Para medição da temperatura de transição vítrea, foi utilizada a técnica de análises térmicas de DSC, pois como relatado no subcapítulo 2.4.1.2 por Akcelrud

(2007), a técnica de DSC é a mais empregada para determinação da T<sub>g</sub> de polímeros.

O ensaio de DSC, assim como o TGA, também foi executado duas vezes, sendo que a segunda bateria de ensaios térmicos foi motivada principalmente pelas incoerências que se observou no TGA para caracterização das barras. Assim, analogamente ao TGA, foram utilizados os fragmentos retirados das mesmas regiões apresentadas no subcapítulo 3.1, e realizados nos mesmos laboratórios químicos terceirizados, específicos para caracterização de materiais poliméricos.

No Centro Tecnológico de Polímeros SENAI (São Leopoldo/RS), a análise térmica de DSC foi realizada em três fases, sendo aquecimento, resfriamento e segundo aquecimento, utilizando um analisador *Q100* da *TA Instruments*, em uma faixa de temperatura entre -20°C a 300°C para obtenção da curva do fluxo de energia, com uma taxa de aquecimento de 20°C/min, e método em conformidade com a ASTM D3418/15.

No Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais – LCVMat, localizado no campus da Unisinos (São Leopoldo/RS), a análise térmica de DSC foi realizada no mesmo ensaio que se obteve a curva de TGA, portanto em um único aquecimento, utilizando um analisador híbrido *PerkinElmer STA 8000*, para elevar a temperatura de 25°C a 850°C, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min.

A interpretação das curvas de DSC obtidas nos gráficos dos resultados de ambos os ensaios foi realizada conforme explicações expostas no subcapítulo 2.4.1.2.

## 4. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A apresentação dos resultados está ordenada conforme estrutura do capítulo 3, sendo, portanto, também organizada em três partes, iniciando por uma caracterização para maior familiarização com o material, seguida de análise do comportamento elástico na tração em função do diâmetro em temperatura ambiente, e, por fim, uma análise realizada com as barras expostas à uma temperatura ligeiramente maior que a temperatura de transição vítrea da matriz polimérica constituinte das barras.

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DAS BARRAS DE GFRP

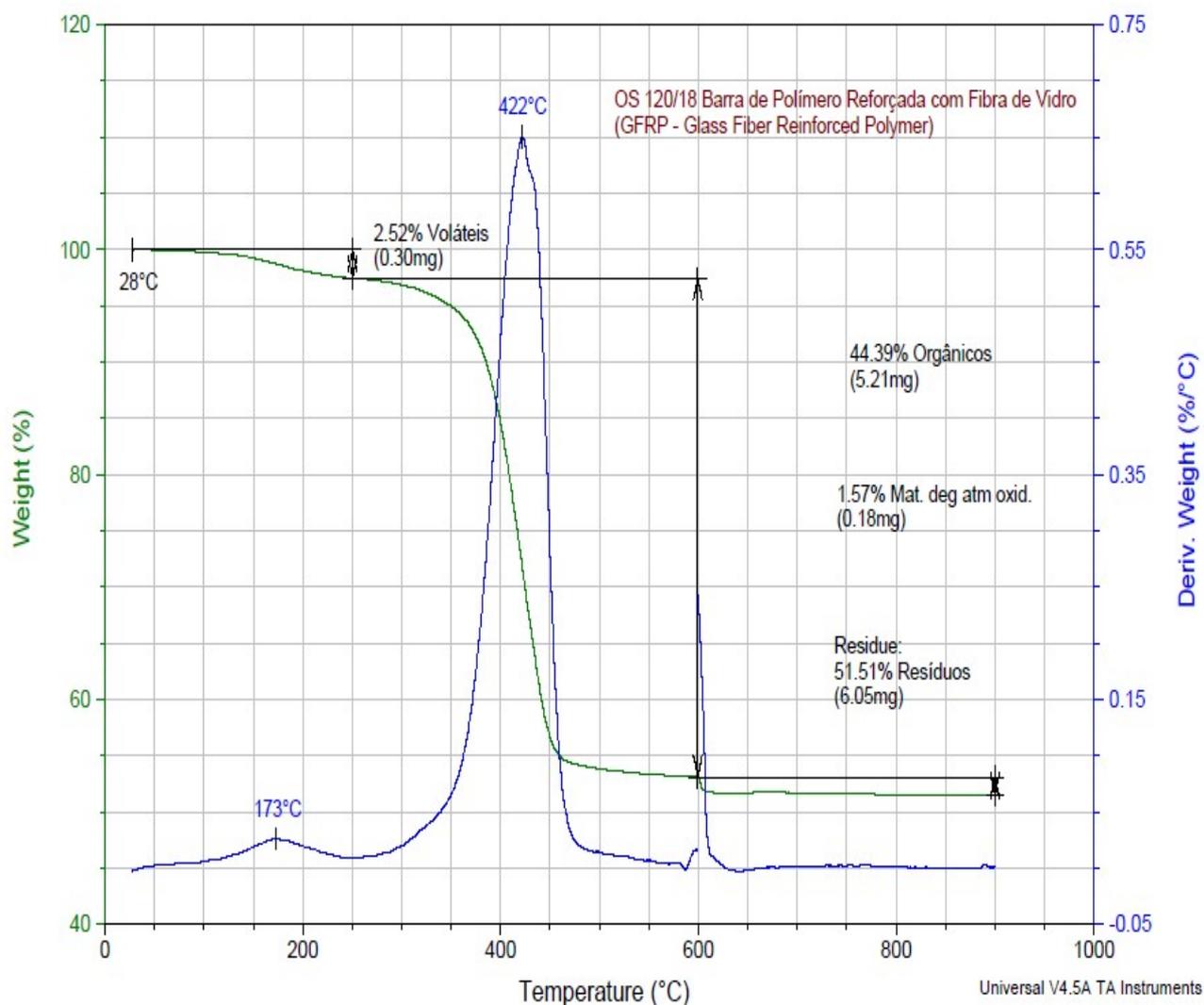
Quanto à estrutura macro, o processo de pultrusão concebe às barras um arranjo bem característico já apresentado no subcapítulo 2.6, sendo caracterizado por fibras longitudinais contínuas imersas em matriz de resina polimérica.

A análise térmica de TGA/DTG se mostrou satisfatória para caracterização da composição das barras, sendo que foram necessárias duas baterias de testes para confrontar os resultados e poder se chegar a valores coerentes com a descrição do fabricante. Mesmo tendo sido realizado os testes de caracterização em apenas uma amostra, os resultados de composição podem ser considerados para toda remessa recebida da empresa, pois, segundo informação do fabricante, as amostras foram produzidas com o mesmo padrão e controle de qualidade.

Com os gráficos das curvas de TGA/DTG dos ensaios realizados, foi possível analisar a proporção de fibras do compósito, bem como assimilar a quantidade de compostos orgânicos voláteis e de matriz polimérica presentes nas barras de GFRP estudadas.

No Gráfico 1, estão apresentadas as curvas de TGA/DTG, obtidas no ensaio realizado no Centro Tecnológico de Polímeros SENAI (São Leopoldo/RS), sendo que a curva em verde é referente à análise termogravimétrica, com a sua escala exposta do lado vertical esquerdo do gráfico, e a curva plotada em azul refere-se à análise termogravimétrica derivada, examinada pela escala localizada na parte vertical direita do gráfico.

Gráfico 1 – Curva TGA/DTG da amostra de Barra de Polímero reforçada com Fibras de Vidro (GFRP)



Fonte: Centro Tecnológico de Polímeros SENAI – São Leopoldo/RS (2018).

Como resultados do Gráfico 1, é possível identificar que há uma perda de massa inicial, na faixa de temperatura entre 28°C e 250°C, onde 2,52% de massa da amostra foram volatilizados, o que pode ser relacionado com perdas de materiais voláteis como solventes ou aditivos incorporados ao compósito, como relatado no subcapítulo 2.4.1.1, na explicação da análise do gráfico de TGA por Lisbão (2012), que atribui uma pequena perda de massa inicial à liberação de componentes voláteis.

Posteriormente, de 250°C até 600°C, se apresentou um grande decréscimo de massa, onde foram perdidos 44,39% da massa total da amostra, o que pode ser relacionado com perda de material orgânico, que, devido composição conhecida da

amostra, refere-se predominantemente ao polímero, como relaciona Correia et al. (2010), apresentado no subcapítulo 2.7.7 relatando que, quando expostas a temperaturas elevadas, na faixa entre 300°C a 500°C, as matrizes poliméricas comumente utilizadas em fabricação de compósitos de FRP se decompõem.

Na sequência, entre 600°C até 900°C foi detectado uma pequena perda de massa na amostra, de 1,57% da massa total, relacionada com perda de massa de material que se degrada sob atmosfera oxidativa, devido ao fato comentado no subcapítulo 3.1 que, neste ensaio, se utilizou Atm de N<sub>2</sub> de temperatura ambiente até 600°C e Atm de Ar sintético de 600°C até 900°C.

Por fim, restaram 51,51% da massa da amostra, referente a material inorgânico não degradado, que pode ser relacionado às fibras de vidro constituinte da barra.

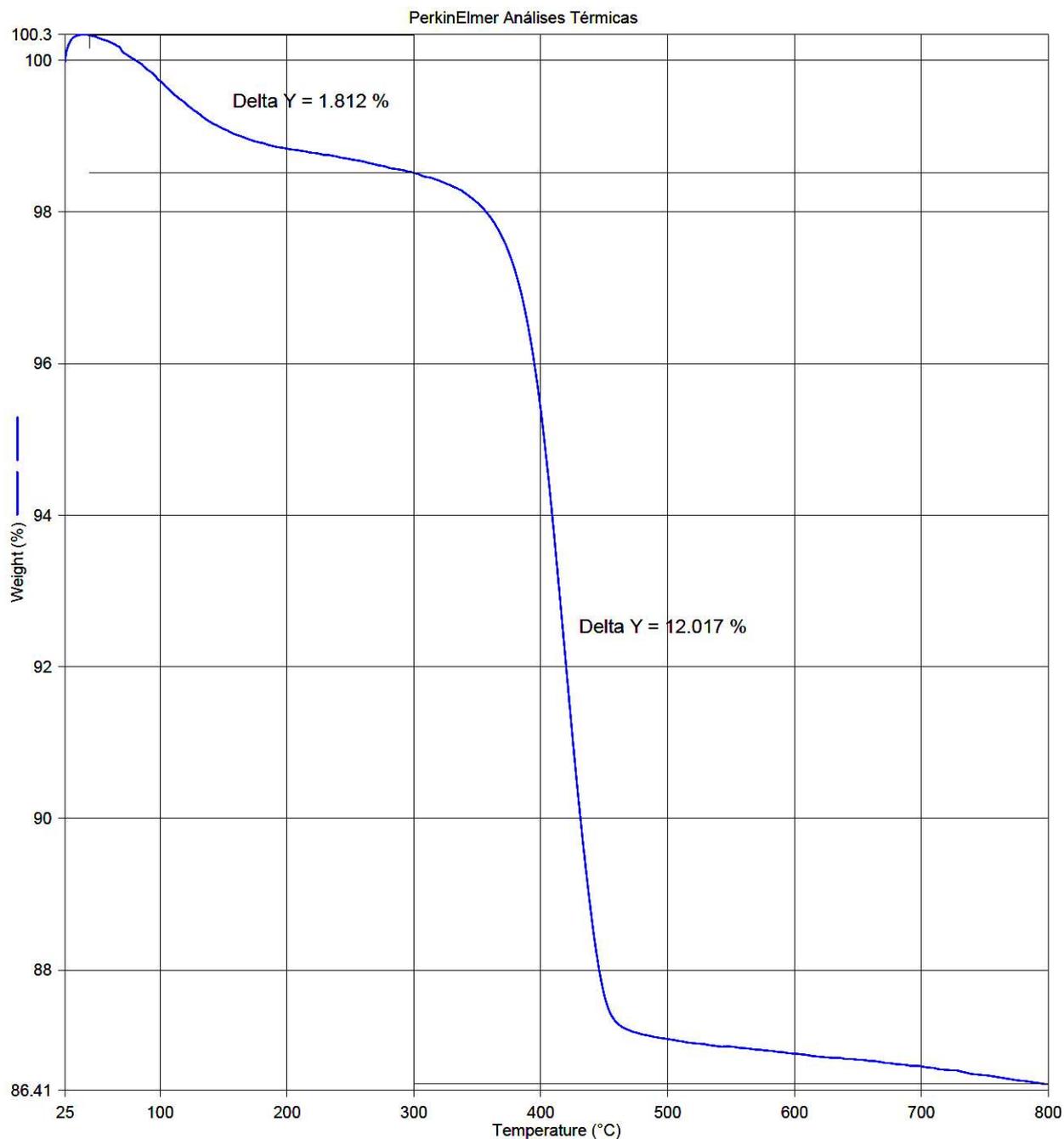
Na curva de DTG puderam-se notar os três picos, proporcionais às perdas de massa geradas em cada evento térmico que eles representaram, sendo o segundo pico, relacionado com a perda de material orgânico, o maior quando comparado com os demais.

O fato de ter apresentado somente 51,51% da massa da amostra relacionado a porcentagem presente de fibras veio em confronto à descrição do material recebido do fabricante, relatado no capítulo 3, onde esse menciona que a proporção de fibra nas barras, em peso, é maior que 80% em relação à matriz. E, como apresentado no subcapítulo 2.7, Uomoto et al. (2002), ACI.440R (2007) e ACI 440.1R (2015), salientam que, sendo as fibras o constituinte responsável pela sustentação da maior parte da carga de tração nas barras de FRP, a relação fibra/matriz é um dos principais parâmetros relacionados com as propriedades mecânicas apresentadas por essas barras.

Assim, uma discrepância da proporção fibra/matriz encontrada em relação à caracterização recebida da empresa fabricante seria uma grave constatação da pesquisa, o que fez surgir a necessidade de novo ensaio de TGA/DTG para verificação da disparidade levantada, quando se realizou no LCVMat (Unisinos, São Leopoldo/RS) um novo ensaio, no qual a amostra utilizada foi de um segmento da mesma barra, preparada conforme explicado no subcapítulo 3.1, que possibilitou a extração de fragmento de outra parte da seção transversal do corpo de prova, tendo os resultados constantes nos Gráfico 2 e Gráfico 3, sendo que a curva em azul é referente à análise termogravimétrica, com a sua escala exposta do lado vertical

esquerdo do gráfico, e a curva plotada em verde, do Gráfico 3, refere-se à análise termogravimétrica derivada, examinada pela escala localizada na parte vertical direita do gráfico.

Gráfico 2 – Curva TGA da amostra de Barra de Polímero reforçado com Fibras de Vidro (GFRP)

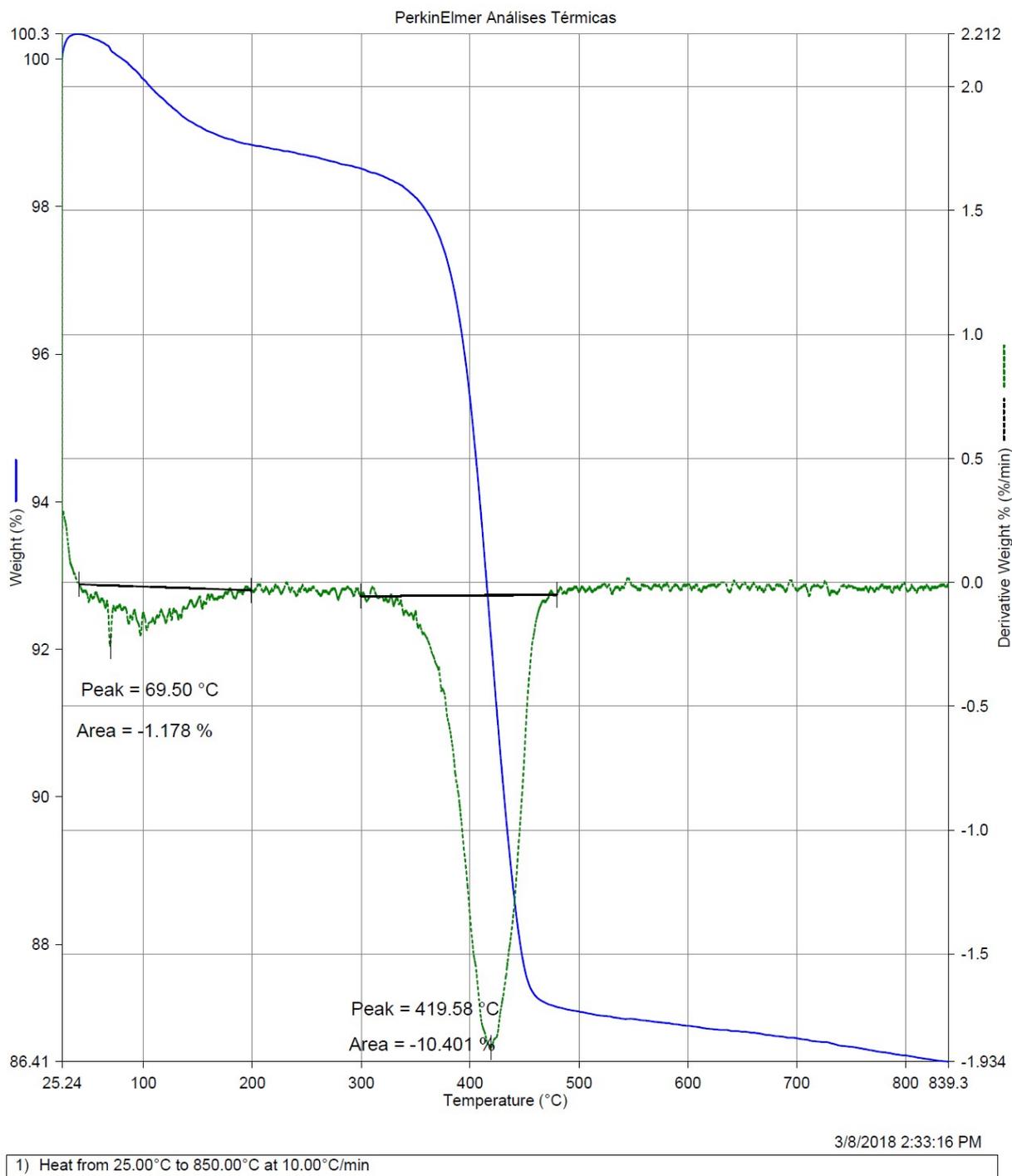


3/8/2018 2:31:59 PM

1) Heat from 25.00°C to 850.00°C at 10.00°C/min

Fonte: Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) – São Leopoldo/RS (2018).

Gráfico 3 – Curva TGA/DTG da amostra de Barra de Polímero reforçado com Fibras de Vidro (GFRP)



Fonte: Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) – São Leopoldo/RS (2018).

Como resultados dos Gráfico 2 e Gráfico 3, é possível examinar que há uma perda de massa inicial, na faixa de temperatura entre aproximadamente 25°C e 300°C, onde 1,812% da amostra foram volatilizados, o que pode ser relacionado

com perdas de materiais voláteis como solventes ou aditivos incorporados ao compósito. Posteriormente, de aproximadamente 300°C até 800°C, é apresentado um decréscimo de massa consideravelmente maior em relação ao primeiro evento térmico, onde se perdeu 12,017% da massa total da amostra, o que pode ser relacionado com perda de material orgânico, se referindo predominantemente ao polímero. E, por fim, restaram 86,41% de massa de material inorgânico, que pode ser relacionado com as fibras de vidro.

Por se tratar de uma análise da mesma amostra do ensaio apresentado no Gráfico 1, as mesmas relações são válidas para embasamento dos decréscimos de matéria analisados, sendo na primeira perda o relatado no subcapítulo 2.4.1.1, na explicação da análise do gráfico de TGA por Lisboa (2012), que atribui uma pequena perda de massa inicial à liberação de componentes voláteis. A segunda perda de massa relacionado com Correia et al. (2010), apresentado no subcapítulo 2.7.7, relatando que quando expostas a temperaturas elevadas, na faixa entre 300°C a 500°C, as matrizes poliméricas comumente utilizadas em fabricação de compósitos de FRP se decompõem. E a massa final relacionada com as fibras de vidro pela constituição da amostra.

Na curva de DTG puderam-se notar os dois picos, proporcionais às perdas de massa geradas em cada evento térmico que eles representaram.

A intenção de se realizar este segundo ensaio de TGA/DTG com fragmentos da região central da amostra surgiu da vontade de se buscar uma caracterização mais fidedigna da composição do corpo de prova, pois foi notada, em análise visual, que as barras apresentavam uma fina camada de polímero na parte externa da seção transversal, que é formada após o banho de resina na pultrusão. Esta característica das barras pode ser visualizada na Figura 24, apresentada no capítulo 3, através do brilho que se nota na superfície da barra, e, levando em consideração que a amostra retirada para realização dessa análise térmica é significativamente pequena, como pode ser visto tanto na Figura 25, quanto na Figura 26(a), as áreas de extração, uma pequena alteração, como essa camada, pode ser significativa nos resultados.

Através de uma análise comparativa entre os Gráfico 1, Gráfico 2 e Gráfico 3, pode-se notar que essa consideração da atribuição à fina camada externa de polímero como disparidade de informações do fabricante em relação aos resultados encontrados foi válida, uma vez que o segundo ensaio apresentou 86,41% de massa

da amostra constituída de fibras de vidro, ficando de acordo com as informações recebidas, além de poder se ver que houve uma diminuição no percentual de compostos voláteis na composição destas barras de GRFP, o que pode ser relacionado ao aumento da proporção de fibra, e consecutiva diminuição da porcentagem de polímero, onde esses se encontrariam inseridos, sendo que, em ambos os casos, foram porções significativamente baixas. E, por fim, que a perda de massa detectada no primeiro ensaio entre 600°C e 900°C, relacionada com perda de massa de material que se degrada sob atmosfera oxidativa, não foi identificada no segundo ensaio devido ao fato que, nesse segundo ensaio, a Atm utilizada foi de N<sub>2</sub> ao longo de todo o experimento.

#### 4.2. COMPORTAMENTO ELÁSTICO NA TRAÇÃO – TEMPERATURA AMBIENTE

Com a realização dos ensaios mecânicos, foi possível trabalhar os resultados obtidos para confecção dos gráficos tensão/deformação, a partir dos quais foram calculados os módulos de elasticidade à tração, que compõem a propriedade pesquisada, as fórmulas utilizadas ponto a ponto para geração dos gráficos tensão/deformação e posterior cálculo dos módulos de elasticidade, estão relacionadas no subcapítulo 3.2.

Para melhor apresentação dos resultados obtidos, serão relacionadas, entre as páginas 78 e 87, todas as barras ensaiadas nessa etapa do estudo, apresentado, como padrão, os gráficos com as curvas tensão/deformação em azul, e os intervalos considerados para os cálculos dos módulos de elasticidade marcados com pontos em vermelho, juntamente com as linhas de tendência extrapoladas desses trechos, marcadas com a mesma cor.

Adicionalmente, junto a cada gráfico, estão resumidos, em quadros, os dados referentes ao diâmetro, área da seção transversal, tensão máxima resistida, módulo de elasticidade, e modo de falha respectivos a cada ensaio, seguidos de imagens com apresentação do modo de falha de cada amostra.

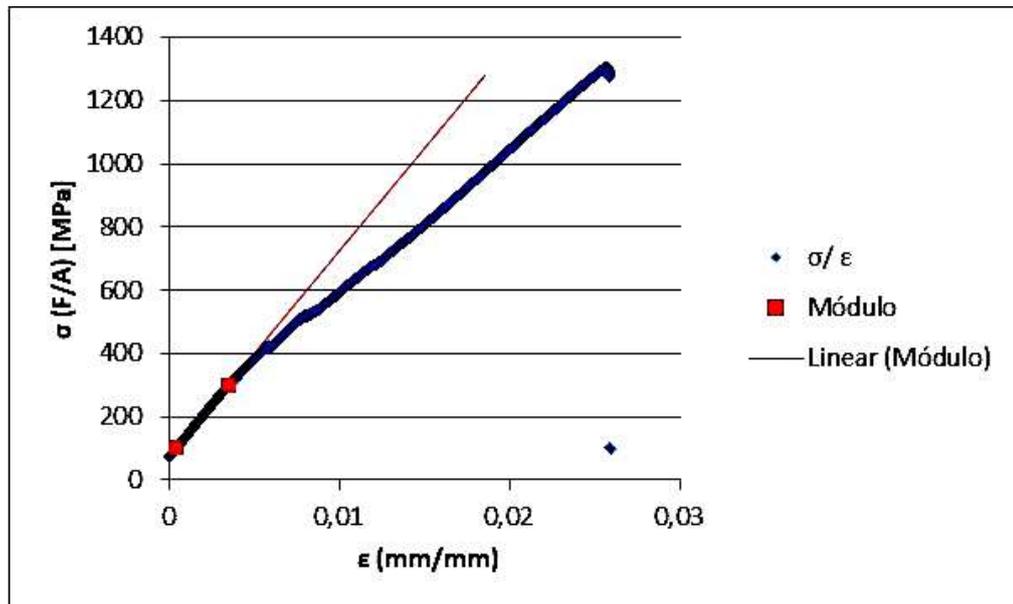
Posteriormente, são apresentadas as análises e discussões dos resultados, sendo que a nomenclatura para referenciar cada amostra será utilizada conforme apresentado no Quadro 3 do item 3.2, na qual o padrão seguido foi de “*diâmetro + ponto + número da amostra*”, como, por exemplo, “*Amostra 4.3*” (referente à terceira amostra de diâmetro igual a 4,00mm).

Quadro 4 – Amostra 4.3 – Dados do ensaio

Diâmetro = <b>4,00</b> mm	Tensão máxima registrada = <b>1304,92</b> MPa
Área seção = <b>12,57</b> mm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidade = <b>65,23</b> GPa
Modo de falha: <b>Ruptura da barra no comprimento livre.</b>	

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Gráfico 4 – Amostra 4.3 – Gráfico tensão/deformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 31 – Amostra 4.3 – Modo de falha



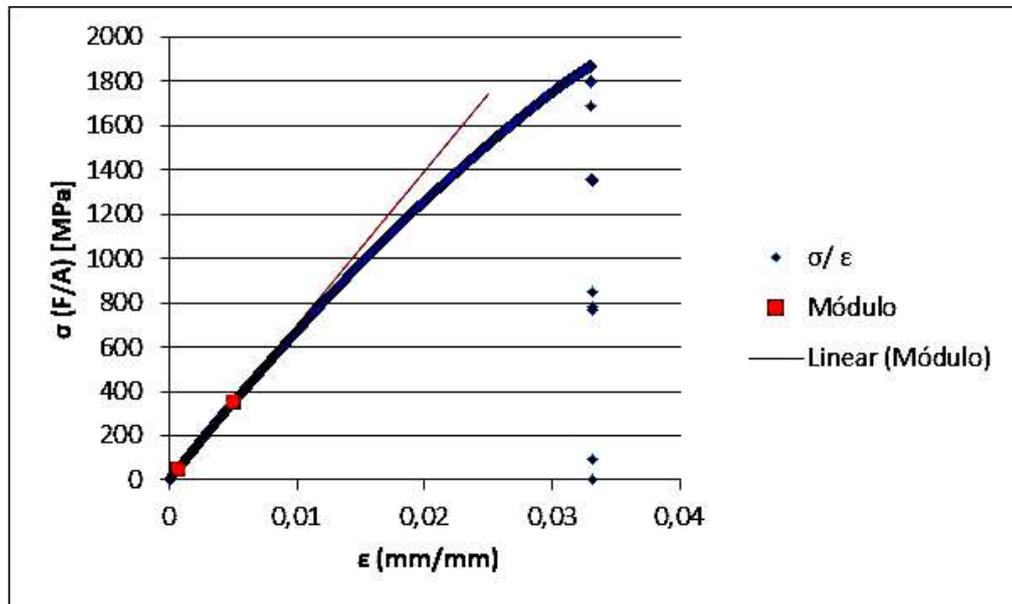
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Quadro 5 – Amostra 4.4 – Dados do ensaio

Diâmetro = <b>4,00</b> mm	Tensão máxima registrada = <b>1870,41</b> MPa
Área seção = <b>12,57</b> mm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidade = <b>69,52</b> GPa
Modo de falha: <b>Ruptura da barra no comprimento livre.</b>	

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Gráfico 5 – Amostra 4.4 – Gráfico tensão/deformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 32 – Amostra 4.4 – Modo de falha



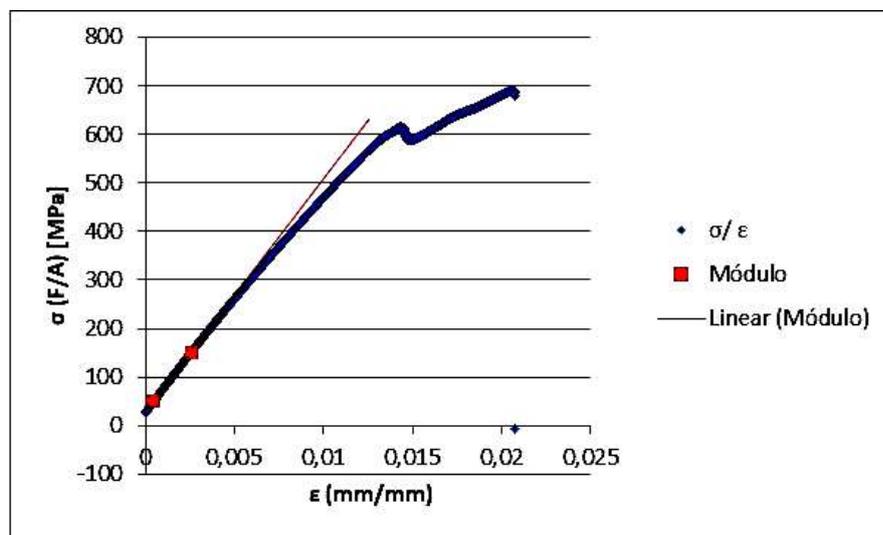
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Quadro 6 – Amostra 6.3 – Dados do ensaio

Diâmetro = <b>6,00</b> mm	Tensão máxima registrada = <b>689,56</b> MPa
Área seção = <b>28,27</b> mm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidade = <b>47,98</b> GPa
Modo de falha: <b>Corte de cisalhamento na seção transversal, com deslizamento de fibras internas nas duas ancoragens.</b>	

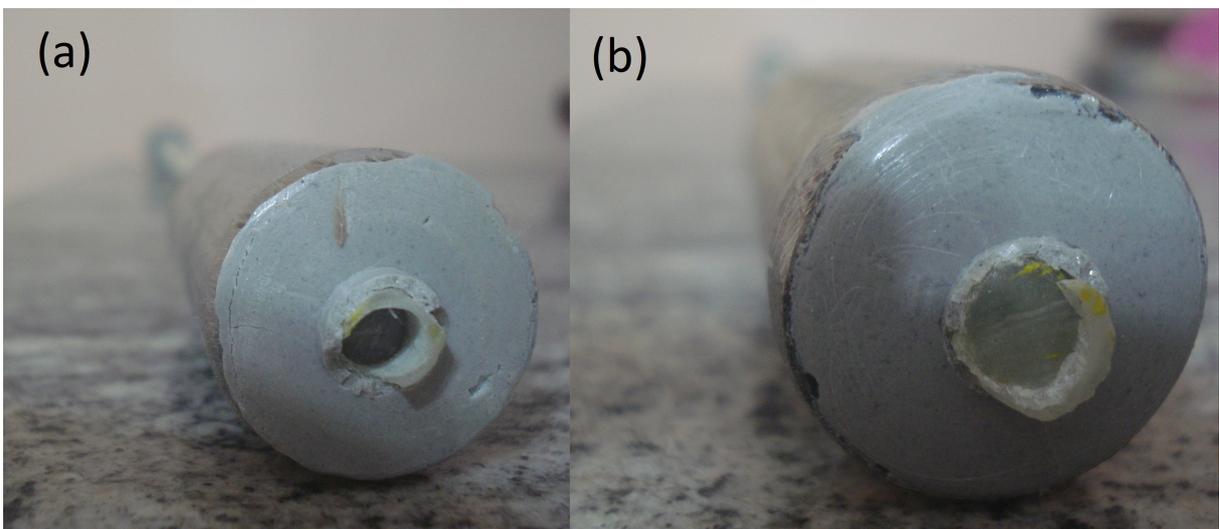
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Gráfico 6 – Amostra 6.3 – Gráfico tensão/deformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 33 – Amostra 6.3 – Modo de falha (nas duas ancoragens)



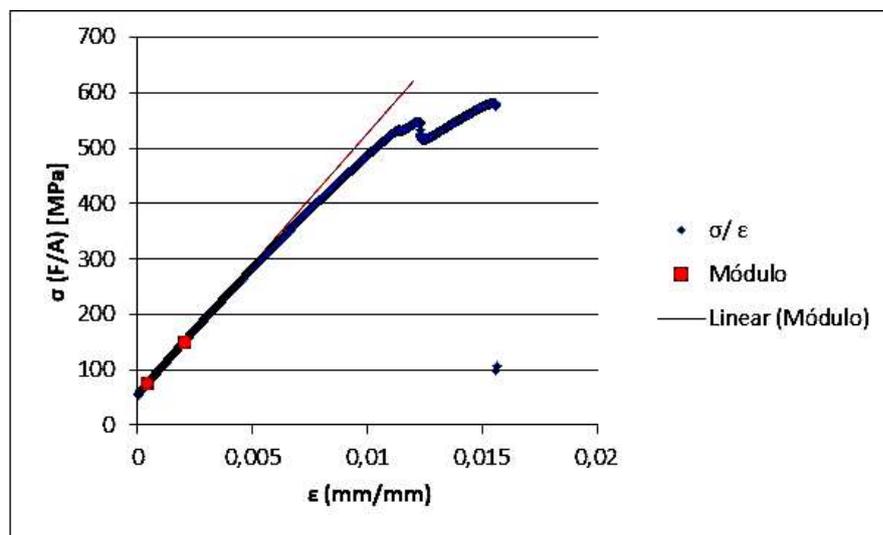
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Quadro 7 – Amostra 6.4 – Dados do ensaio

Diâmetro = <b>6,00</b> mm	Tensão máxima registrada = <b>581,08</b> MPa
Área seção = <b>28,27</b> mm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidade = <b>47,08</b> GPa
Modo de falha: <b>Corte de cisalhamento na seção transversal, com deslizamento de fibras internas nas duas ancoragens.</b>	

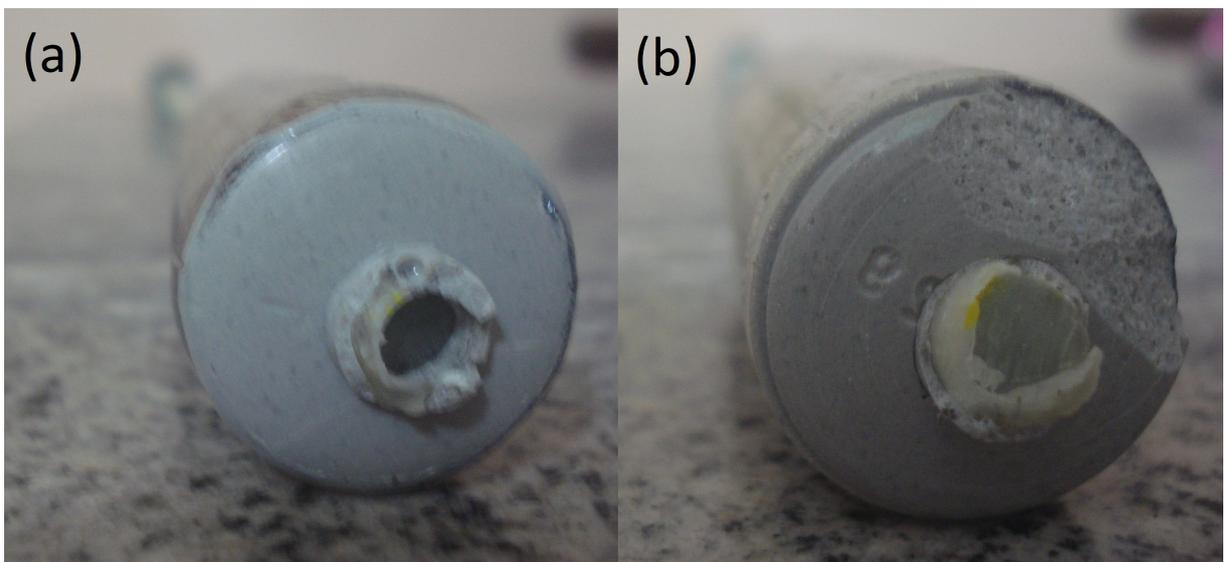
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Gráfico 7 – Amostra 6.4 – Gráfico tensão/deformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 34 – Amostra 6.4 – Modo de falha (nas duas ancoragens)



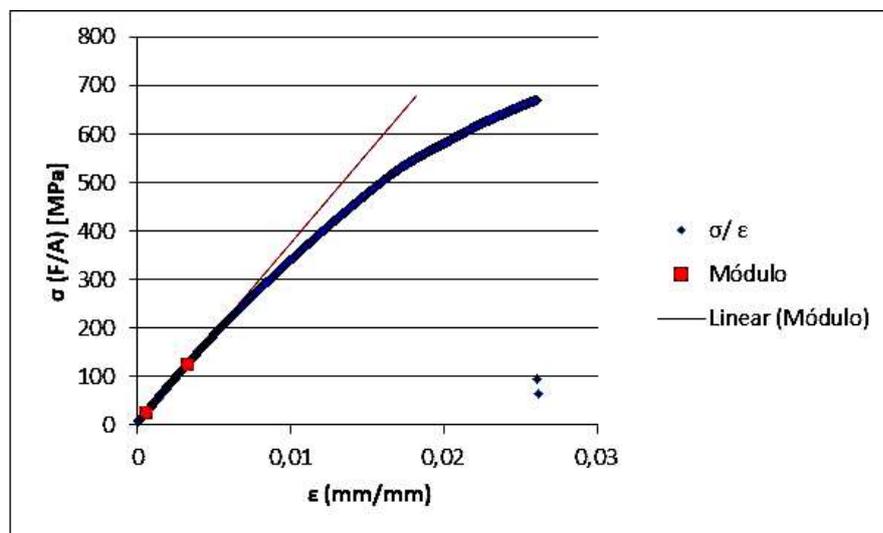
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Quadro 8 – Amostra 8.3 – Dados do ensaio

Diâmetro = <b>8,00</b> mm	Tensão máxima registrada = <b>670,87</b> MPa
Área seção = <b>50,27</b> mm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidade = <b>36,92</b> GPa
Modo de falha: <b>Corte de cisalhamento na seção transversal, com deslizamento de fibras internas em apenas uma das ancoragens.</b>	

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Gráfico 8 – Amostra 8.3 – Gráfico tensão/deformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 35 – Amostra 8.3 – Modo de falha



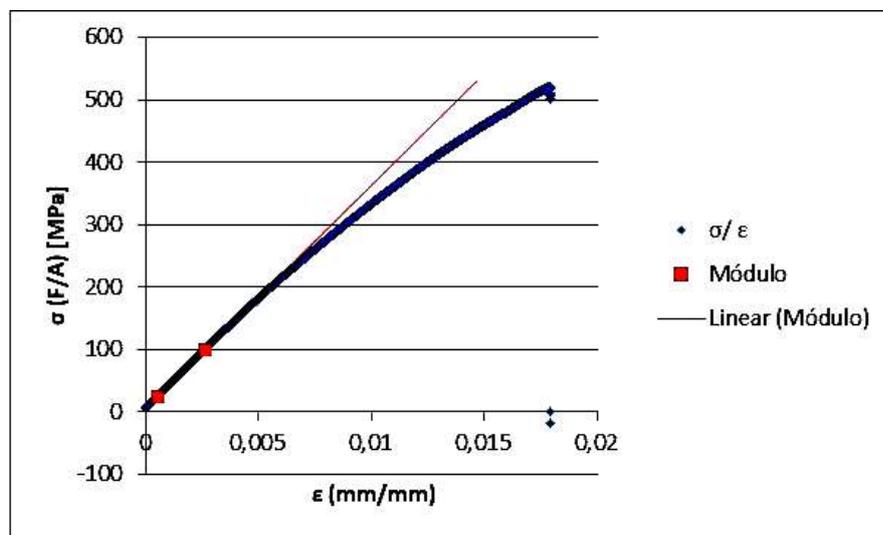
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Quadro 9 – Amostra 8.4\_Dados do ensaio

Diâmetro = <b>8,00</b> mm	Tensão máxima registrada = <b>520,42</b> MPa
Área seção = <b>50,27</b> mm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidade = <b>35,83</b> GPa
Modo de falha: <b>Ruptura das fibras ligeiramente acima da ancoragem, ficando conectada apenas pelo envoltório helicoidal do tratamento superficial.</b>	

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Gráfico 9 – Amostra 8.4\_Gráfico tensão/deformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 36 – Amostra 8.4\_ Modo de falha



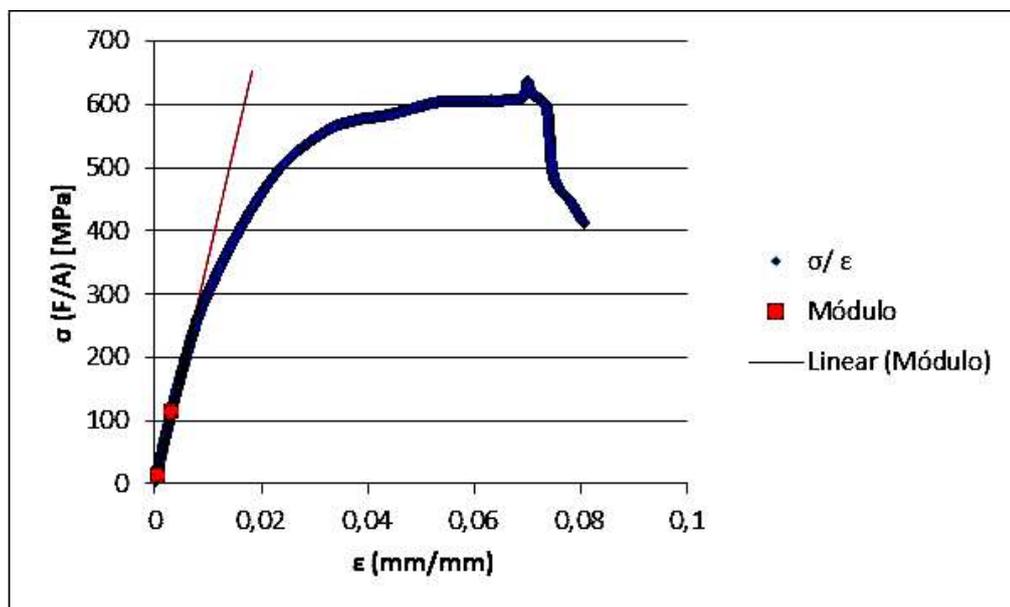
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Quadro 10 – Amostra 12,5.3 – Dados do ensaio

Diâmetro = <b>12,50 mm</b>	Tensão máxima registrada = <b>637,68 MPa</b>
Área seção = <b>122,72 mm<sup>2</sup></b>	Módulo de Elasticidade = <b>35,81 GPa</b>
Modo de falha: <b>Deformação do tubo de aço, ruptura da resina de enchimento da ancoragem e posterior danificação e deslizamento da barra.</b>	

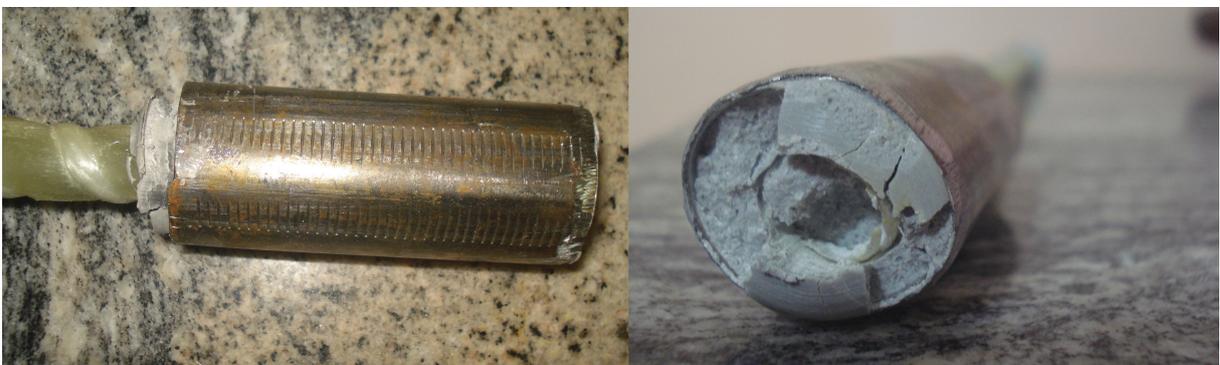
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Gráfico 10 – Amostra 12,5.3 – Gráfico tensão/deformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 37 – Amostra 12,5.3 – Modo de falha



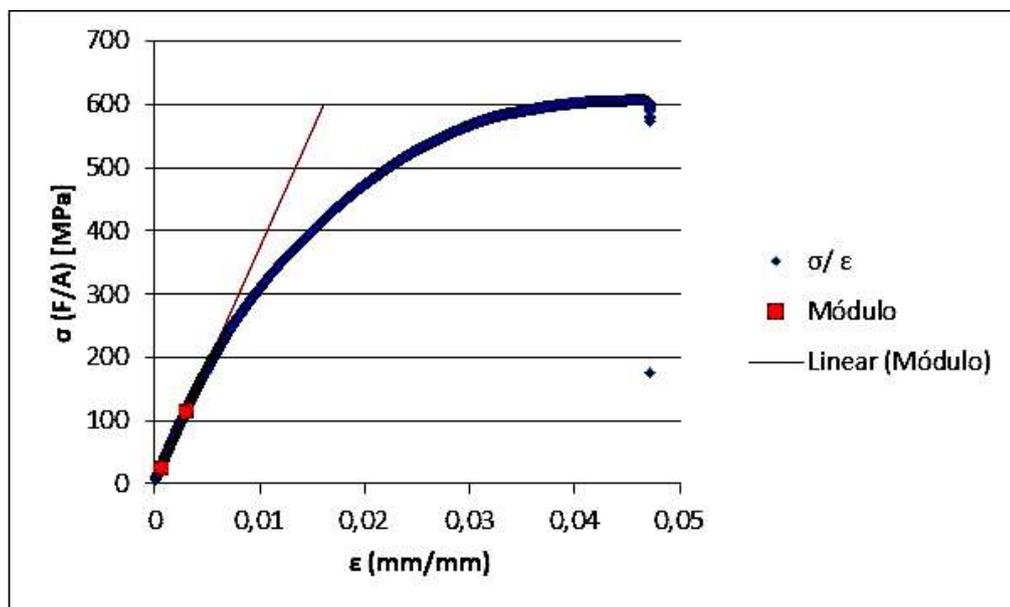
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Quadro 11 – Amostra 12,5.4 – Dados do ensaio

Diâmetro = <b>12,50</b> mm	Tensão máxima registrada = <b>607,00</b> MPa
Área seção = <b>122,72</b> mm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidade = <b>37,02</b> GPa
Modo de falha: <b>Deformação do tubo de aço, ruptura da resina de enchimento da ancoragem e posterior danificação e deslizamento da barra.</b>	

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Gráfico 11 – Amostra 12,5.4 – Gráfico tensão/deformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 38 – Amostra 12,5.4 – Modo de falha



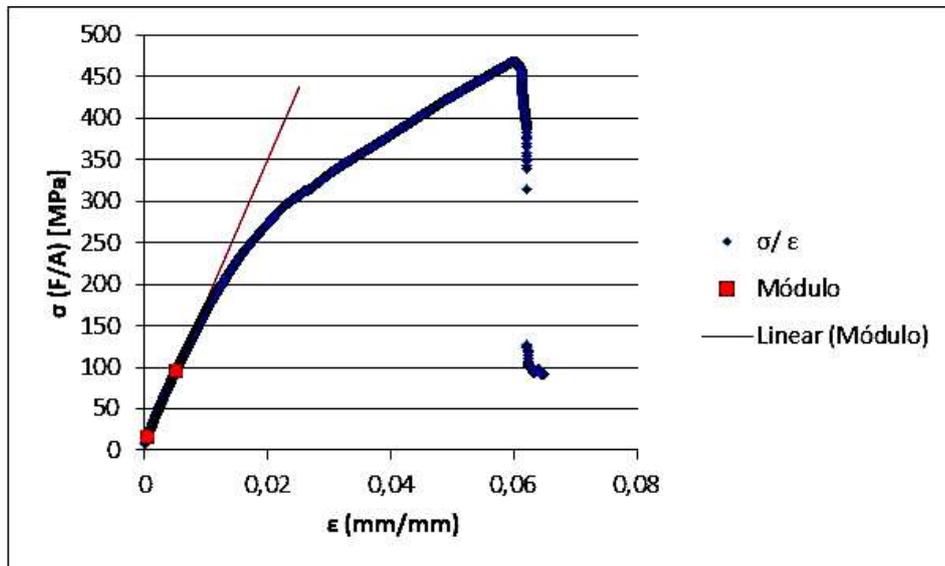
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Quadro 12 – Amostra 14.2 – Dados do ensaio

Diâmetro = <b>14,00</b> mm	Tensão máxima registrada = <b>467,88</b> MPa
Área seção = <b>153,94</b> mm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidade = <b>17,17</b> GPa
Modo de falha: <b>Ruptura da barra no comprimento livre.</b>	

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Gráfico 12 – Amostra 14.2 – Gráfico tensão/deformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 39 – Amostra 14.2 – Modo de falha



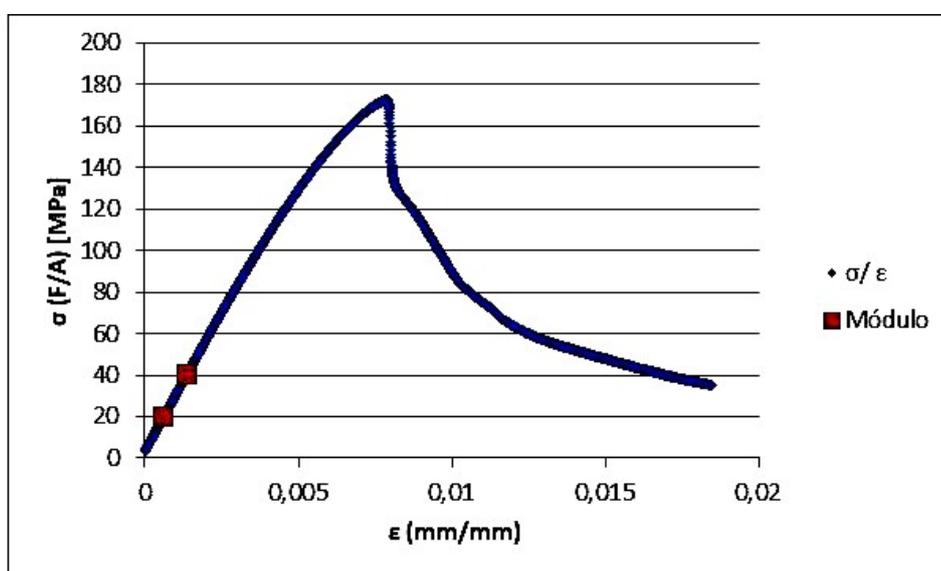
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Quadro 13 – Amostra 14.3\_Dados do ensaio

Diâmetro = <b>14,00</b> mm	Tensão máxima registrada = <b>172,79</b> MPa
Área seção = <b>153,94</b> mm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidade = <b>-x-x-</b> GPa
Modo de falha: <b>Barra apresentou rápida ruptura frágil por compressão na região da barra dentro da ancoragem, resultado não considerado como válido.</b>	

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Gráfico 13 – Amostra 14.3\_Gráfico tensão/deformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 40 – Amostra 14.3\_ Modo de falha



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Inicialmente analisando as rupturas, duas foram as que mais se destacaram nos ensaios, sendo a primeira citada por Chen et al. (2007) como falha típica de barras de GFRP, relatada no subcapítulo 2.7.3, a qual se deu através do rompimento inicial das fibras externas da seção transversal, seguido da ruptura do invólucro helicoidal de fibras presente na superfície, e foi apresentada pelas amostras: 4.3, 4.4, e 14.2. A segunda se deu através do corte de cisalhamento na seção transversal, com deslizamento de fibras internas da barra, sendo apresentada pelas amostras: 6.3, 6.4, e 8.3, e, esse corte foi relatado também no subcapítulo 2.7.3, por Faza (1991) *apud* ACI 440R (2002).

Adicionalmente, a amostra 8.4 apresentou uma falha brusca na seção transversal bem próxima da ancoragem, ficando ligada à outra parte apenas pelo pacote helicoidal de fibras, e as duas amostras de 12,5mm, a saber, a 12,5.3 e a 12,5.4, apresentaram comportamento semelhante à um material elástico no trecho final dos gráficos, mas que se formou através do deslizamento da amostra juntamente com a resina de enchimento que se utilizou nas ancoragens, após deformação do tubo de aço e desprendimento dessa resina de enchimento, essa deformação foi causada devido ao aumento de pressão das garras que se realizou durante esses ensaios, pois tais barras apresentaram deslizamento das garras no decorrer dos testes com a pressão que se estava utilizando. Esse comportamento não desejado pode ser relacionado com o fato das amostras recebidas apresentarem uma dimensão menor que a dimensão prevista pela norma para o ensaio, principalmente nesses diâmetros maiores, o que possivelmente necessitaria também de ancoragens maiores para melhor distribuição das forças da garra, esse fato impossibilitou a medição da resistência de tração final nesses corpos de prova, entretanto, cabe ressaltar que, como a propriedade requerida foi o módulo de elasticidade, o qual está relacionado com o trecho linear do gráfico, tanto as amostras que romperam por tração quanto as amostras que romperam na resina podem ser consideradas, mesmo que a real tensão máxima de resistência à tração não tenha sido alcançada.

Na amostra 14.3, a ruptura apresentada foi diferente de todas as outras amostras, e o tempo decorrido do ensaio antes dessa falha foi significativamente pequeno. Assim, essa amostra não foi contabilizada nos resultados, e sua falha pode ser relacionada a vários fatores como falta de alinhamento ou presença de vazios nas ancoragens ou até por falhas de produção da barra.

Uma análise importante notada nesse ponto da pesquisa foi que há grande intervenção necessária por parte do operador nesses ensaios, desde a confecção das ancoragens até os parâmetros utilizados na máquina, para que se considere um resultado como válido. O que demonstra a atenção necessária na execução e análise dos resultados, e reforça um fato descrito por Uomoto et al. (2002), apresentado no subcapítulo 2.7, onde relata que, devido à diversidade de fatores que influenciam as características das barras de FRP, torna-se difícil chegar a qualquer conclusão generalizada para propriedades dessas barras.

Resumidamente, estão apresentados no Quadro 14 os resultados dos módulos de elasticidade de cada amostra, para melhor elucidar e referenciar o comportamento visualizado nessa propriedade no programa experimental realizado.

Quadro 14 – Resumo dos módulos de elasticidade

<b>Diâmetro</b>	<b>4,00mm</b>	<b>6,00mm</b>	<b>8,00mm</b>	<b>12,50mm</b>	<b>14,00mm</b>
<b>Amostra</b>	4.3	6.3	8.3	12,5.3	14.2
<b>E (GPa)</b>	<b>65,23</b>	<b>47,98</b>	<b>36,92</b>	<b>35,81</b>	<b>17,17</b>
<b>Amostra</b>	4.4	6.4	8.4	12,5.4	14.4
<b>E (GPa)</b>	<b>69,52</b>	<b>47,08</b>	<b>35,83</b>	<b>37,02</b>	<b>-x-x-</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Com base nos dados apresentados no Quadro 14, é possível identificar uma clara tendência de minoração do módulo de elasticidade, à medida que aumenta o diâmetro da barra de GFRP, tendo apresentado uma semelhança apenas entre os diâmetros de 8,00mm e 12,50mm.

Como comentado sobre o corte da seção transversal, e também relatado no subcapítulo 2.7.3, Faza (1991) *apud* ACI 440R (2002) relaciona essa variação no comportamento do módulo de elasticidade das barras de GFRP exatamente com esse corte, pois isso faz com que as fibras localizadas na região central da barra recebam menor tensão que as fibras localizadas na superfície externa dela. (ACI 440R, 2002).

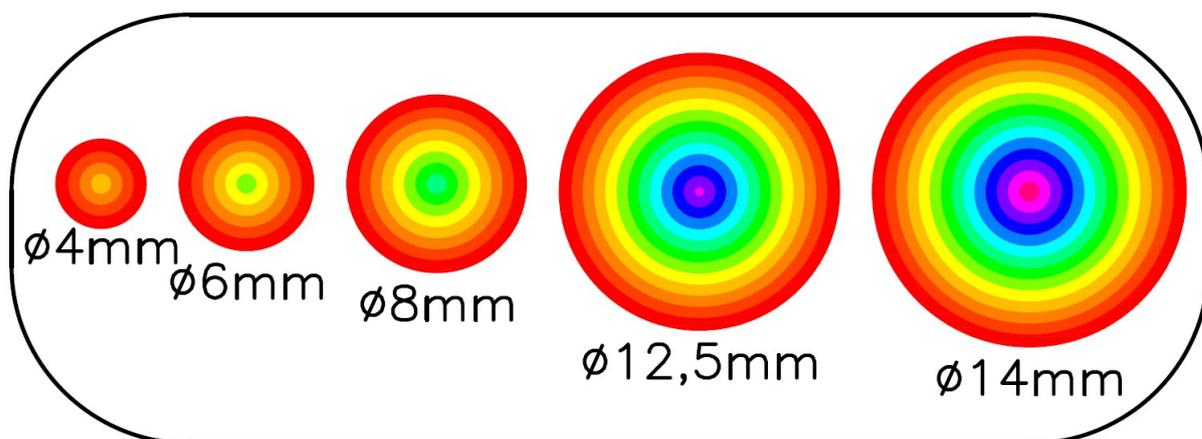
Desta forma, é como se fosse cada vez menor a parte da seção transversal que participa efetivamente da resistência no carregamento, e isso pôde ser claramente notado durante os ensaios, pois, independente do modo de falha apresentado pelas barras, todas apresentaram um comportamento inicial de

rompimento das fibras da superfície, que foi possível de notar com o som das fibras de vidro se rompendo e posterior aparecimento de fibras retorcidas na superfície da seção transversal da barra, esses filamentos de fibras que rompiam quebravam a matriz polimérica que os envolvia e exprimiam grande retração, devido à liberação das tensões que estavam resistindo.

Conforme visualizado nos ensaios, esse corte pode ser relacionado também com a boa aderência que as barras apresentam com o concreto, sendo no caso dos testes com a resina polimérica utilizada, de maneira que as fibras externas foram “forçadas” a apresentarem a deformação na velocidade que estava se aplicando, inicialmente rompendo os filamentos da superfície de maneira individual que não conseguiam deformar na proporção requerida, enquanto que as fibras internas conseguiram se desprender da resina polimérica interna do compósito que as envolvia, resistindo contra a tensão aplicada para geração da deformação da peça. Ao passo que, se a aderência não se apresentasse consideravelmente boa, haveria um desprendimento da barra de compósito em relação à resina polimérica da ancoragem, sem falha na amostra.

Para representação dos resultados relatados, está apresentada na Figura 41 uma ilustração esquemática elaborada com base nas explanações de Faza (1991) *apud* ACI 440R (2002), e nas observações realizadas nos ensaios, para melhor elucidar as conclusões.

Figura 41 – Representação esquemática do comportamento das tensões na seção transversal das barras de GFRP



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Com base na Figura 40, considerando as áreas representadas em vermelho como as regiões de superfície, que em uma estrutura seria a parte de contato com o concreto, a qual adere à matriz cimentícia e recebe a maior carga de tração, é possível notar que, no caso das barras de pequeno diâmetro, as quais foram representadas nos ensaios principalmente pelas barras de 4,00mm, é como se praticamente toda seção recebesse a mesma tensão, e, por conseguinte, contribui quase que inteiramente para a resistência, fato que é minorado com o aumento do diâmetro, pois a resina polimérica da barra não consegue sustentar os níveis de tensões suportadas pelas fibras, e transferir essas tensões até o centro da barra, assim, elas se rompem e formam o corte visualizado em algumas amostras e relatado por Faza (1991) *apud* ACI 440R (2002).

Deste modo, quanto ao comportamento não constante do módulo de elasticidade em relação à variação do diâmetro relatado pelo ACI 440R (2007) e pelo ACI 440.1R (2015), pode-se concluir que foi identificado para as barras ensaiadas, sendo, inclusive, significativamente expressivo, variando cerca de 30,00GPa entre os diâmetros de 4,00mm e 8,00mm.

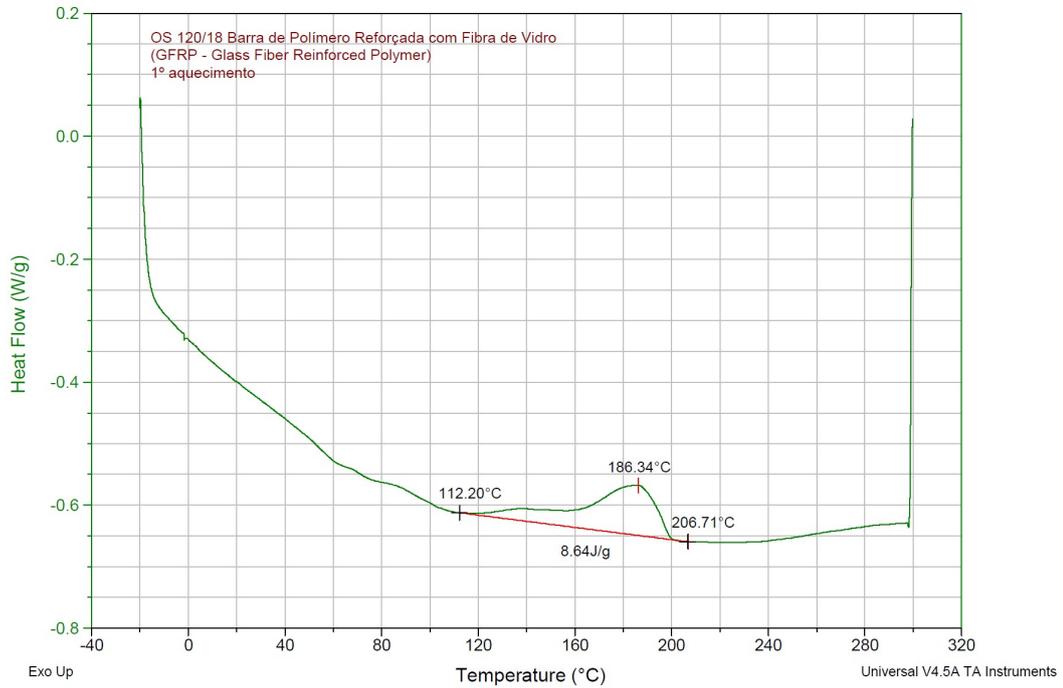
#### 4.3. COMPORTAMENTO ELÁSTICO NA TRAÇÃO – TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA

Primeiramente, foram analisados os ensaios de DSC, para que se conseguisse extrair a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) e posteriormente partir para a realização dos ensaios de tração com temperatura.

No Gráfico 14 e no Gráfico 15, estão apresentadas as curvas de DSC, obtidas no ensaio realizado no Centro Tecnológico de Polímeros SENAI (São Leopoldo/RS), sendo que o Gráfico 14 se refere ao primeiro aquecimento da amostra ensaiada, e o Gráfico 15 apresenta a curva de resfriamento e segundo aquecimento da amostra de barras de polímero reforçado com fibras de vidro.

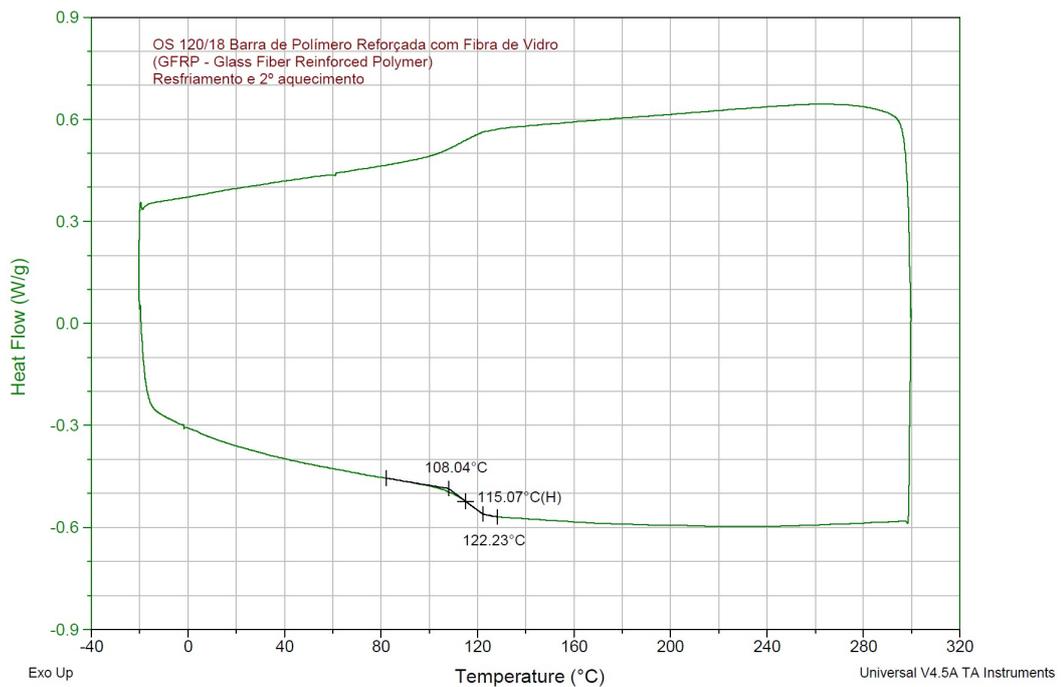
Desse ensaio, pode-se relacionar o evento térmico observado no segundo aquecimento (Gráfico 15), que apresenta temperatura média em 115°C, como característico de transição vítrea, pois, de acordo com o explanado sobre a interpretação de curvas de DSC no subcapítulo 2.4.1.2, conforme Machado e Matos (2003), as reações de segunda ordem, como a temperatura de transição vítrea, apresentam uma translação da linha base, análogo à que se observa nesse ponto.

Gráfico 14 – Curva de DSC do primeiro aquecimento da Barra de Polímero reforçado com Fibra de Vidro (GFRP)



Fonte: Centro Tecnológico de Polímeros SENAI – São Leopoldo/RS (2018).

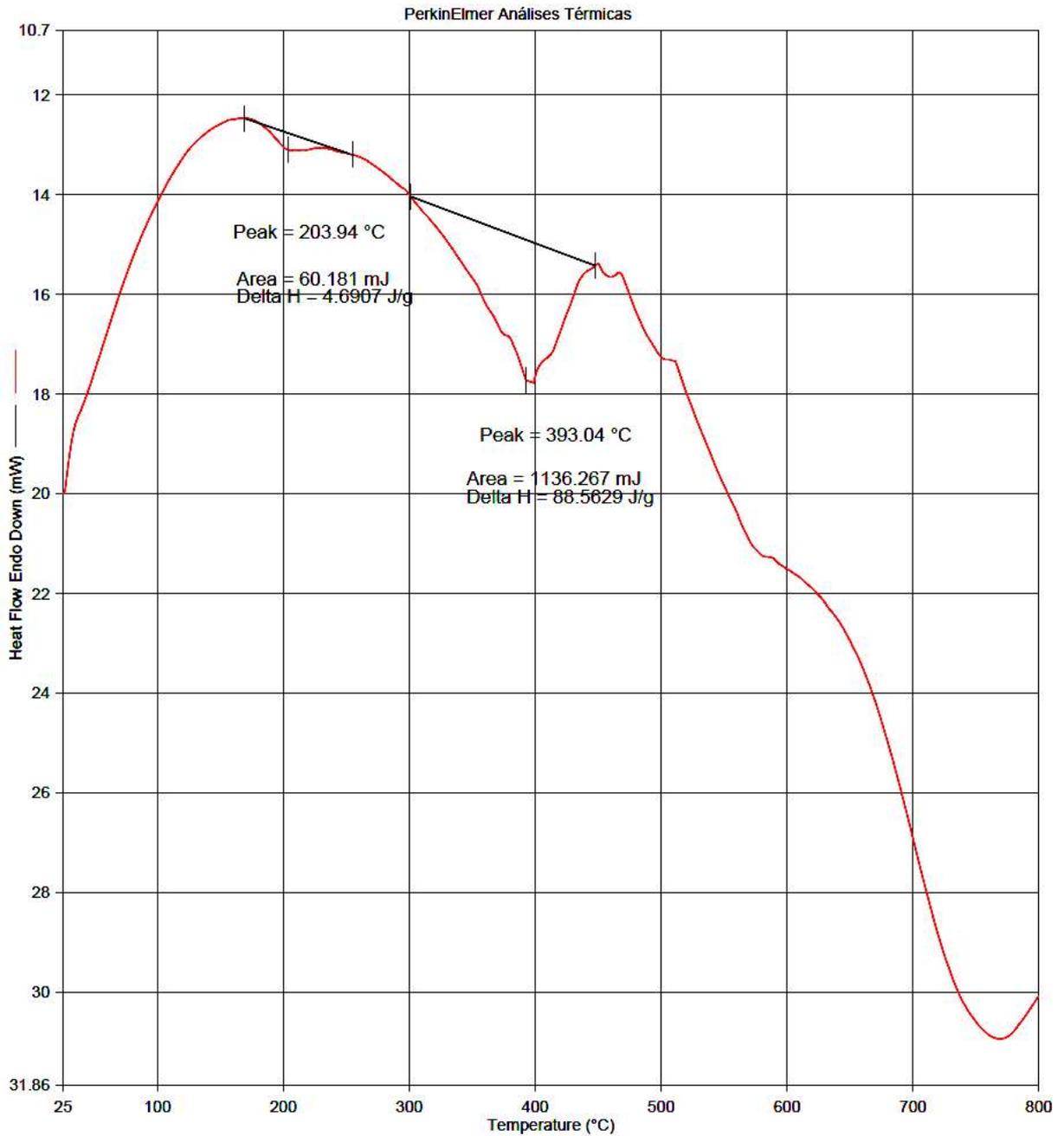
Gráfico 15 – Curva de DSC do resfriamento e segundo aquecimento da Barra de Polímero reforçado com Fibra de Vidro (GFRP)



Fonte: Centro Tecnológico de Polímeros SENAI – São Leopoldo/RS (2018).

Posteriormente, principalmente por incoerências apresentadas pelo ensaio de TGA, foram realizadas nova bateria de testes, na qual também se realizou novo ensaio de DSC, gerando a curva apresentada no Gráfico 16.

Gráfico 16 – Curva DSC da amostra de Barra de Polímero reforçado com Fibras de Vidro (GFRP)



3/8/2018 2:29:35 PM

1) Heat from 25.00°C to 850.00°C at 10.00°C/min

Fonte: Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) – São Leopoldo/RS (2018).

Apesar de não ter sido inicialmente programado um segundo ensaio de DSC, considerações importantes puderam ser visualizadas nos resultados desse segundo experimento, pois, com análise do Gráfico 16, pode-se observar que a translação visualizada no Gráfico 15 em 115°C, nesse experimento foi constatada em, aproximadamente, 204°C, o que difere significativamente da Tg encontrada para o ensaio de DSC realizado com fragmentos de amostras da superfície da seção transversal da barra.

Akcelrud (2007), apresentado no subcapítulo 2.4, elucida que a principal característica estrutural que define a Tg em um polímero é a flexibilidade da cadeia polimérica, assim, é possível relacionar esse aumento na Tg com a restrição de mobilidade da cadeia, devido ao aumento da quantidade de fibras notado na região central da seção transversal da barra.

Diante disso, com o intuito de garantir que toda a matriz polimérica das barras ensaiadas estivesse em um estado acima da temperatura de transição vítrea, as amostras ensaiadas em temperaturas elevadas foram expostas a 205°C.

Analogamente ao subcapítulo 4.2, com a realização dos ensaios mecânicos, foi possível trabalhar os resultados obtidos para confecção dos gráficos tensão/deformação, a partir dos quais foram calculados os módulos de elasticidade à tração, que compõem a propriedade pesquisada, as fórmulas utilizadas ponto a ponto para geração dos gráficos tensão/deformação e posterior cálculo dos módulos de elasticidade, estão relacionadas no subcapítulo 3.2.

Para melhor apresentação dos resultados obtidos, serão relacionadas, entre as páginas 95 e 99, todas as barras ensaiadas nessa etapa do estudo, apresentado, como padrão, os gráficos com as curvas tensão/deformação em azul, e os intervalos considerados para os cálculos dos módulos de elasticidade marcados com pontos em vermelho, juntamente com as linhas de tendência extrapoladas desses trechos, marcadas com a mesma cor.

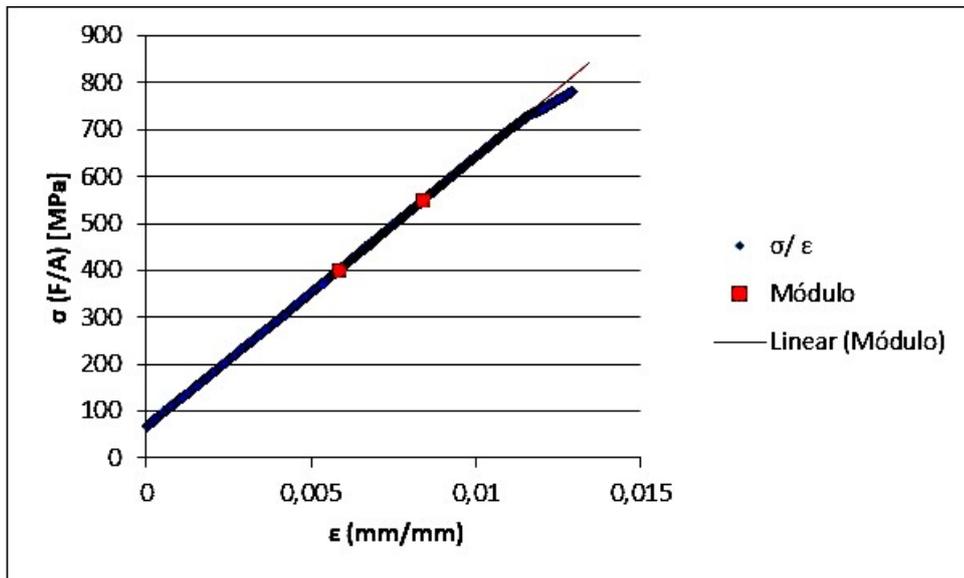
Adicionalmente, junto a cada gráfico, estão resumidos, em quadros, os dados referentes ao diâmetro, área da seção transversal, tensão máxima resistida, módulo de elasticidade, e modo de falha respectivos a cada ensaio, seguidos de imagens com apresentação do modo de falha de cada amostra. E, posteriormente, são apresentadas as análises e discussões dos resultados, sendo que a nomenclatura para referenciar cada amostra também é análoga à utilizada no subcapítulo 4.2, formada por “*diâmetro + ponto + número da amostra*”.

Quadro 15 – Amostra 4.2 – Dados do ensaio

Diâmetro = <b>4,00</b> mm	Tensão máxima registrada = <b>780,42</b> MPa
Área seção = <b>12,57</b> mm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidade = <b>58,19</b> GPa
Modo de falha: <b>Ruptura do invólucro helicoidal de fibras.</b>	

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Gráfico 17 – Amostra 4.2 – Gráfico tensão/deformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 42 – Amostra 4.2 – Modo de falha



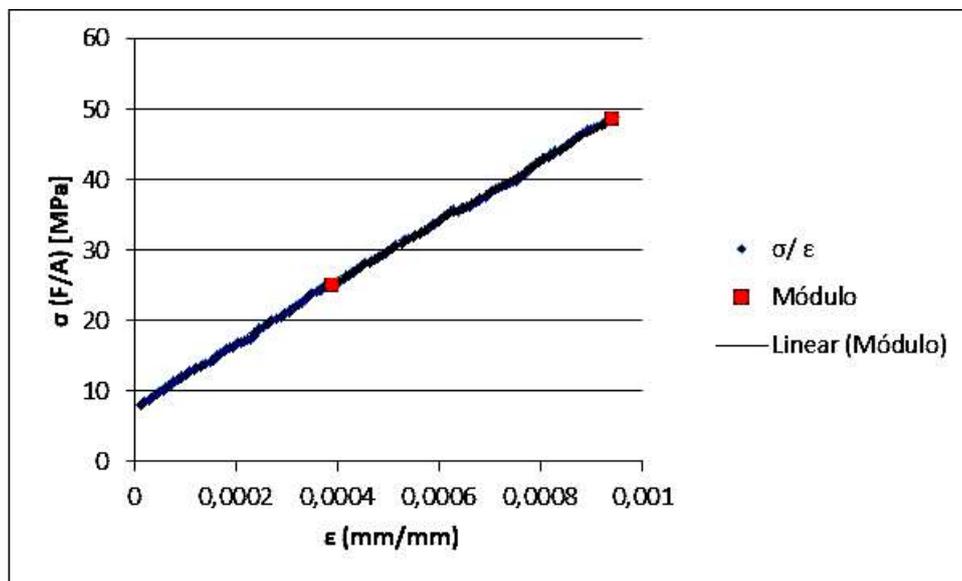
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Quadro 16 – Amostra 6.2 – Dados do ensaio

Diâmetro = <b>6,00</b> mm	Tensão máxima registrada = <b>48,89</b> MPa
Área seção = <b>28,27</b> mm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidade = <b>42,36</b> GPa
Modo de falha: <b>Corte de cisalhamento na seção transversal, com deslizamento de fibras internas em apenas uma das ancoragens.</b>	

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Gráfico 18 – Amostra 6.2 – Gráfico tensão/deformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 43 – Amostra 6.2 – Modo de falha



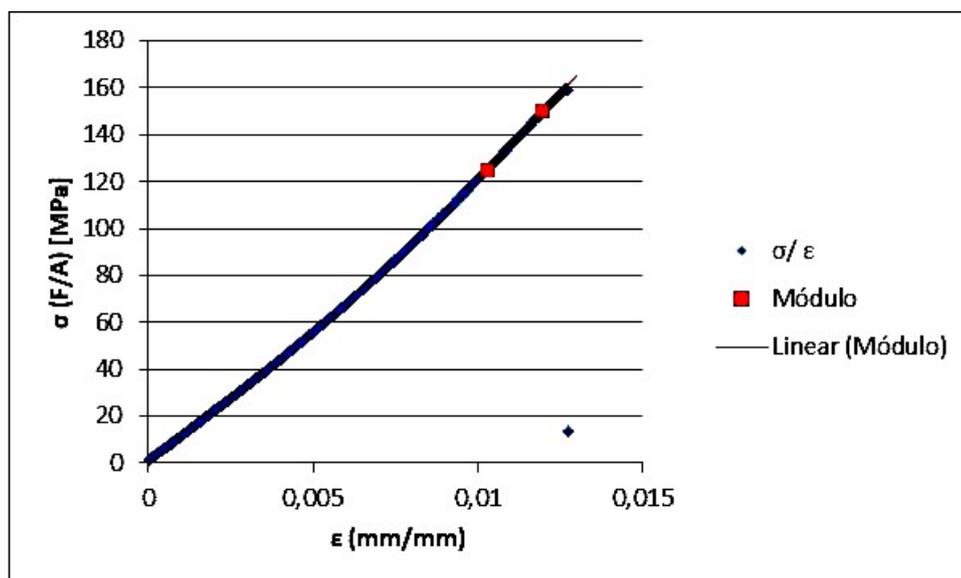
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Quadro 17 – Amostra 8.2 – Dados do ensaio

Diâmetro = <b>8,00</b> mm	Tensão máxima registrada = <b>159,31</b> MPa
Área seção = <b>50,27</b> mm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidade = <b>14,87</b> GPa
Modo de falha: <b>Ruptura do invólucro helicoidal de fibras.</b>	

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Gráfico 19 – Amostra 8.2 – Gráfico tensão/deformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 44 – Amostra 8.2 – Modo de falha



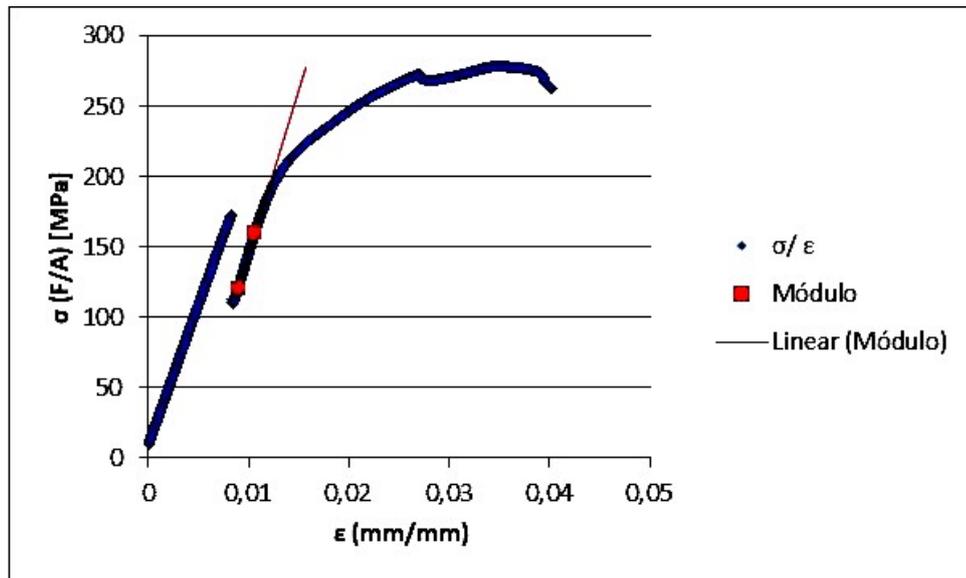
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Quadro 18 – Amostra 12,5.2 – Dados do ensaio

Diâmetro = <b>12,50</b> mm	Tensão máxima registrada = <b>278,43</b> MPa
Área seção = <b>122,72</b> mm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidade = <b>23,57</b> GPa
Modo de falha: <b>Ruptura do invólucro helicoidal de fibras.</b>	

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Gráfico 20 – Amostra 12,5.2 – Gráfico tensão/deformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 45 – Amostra 12,5.2 – Modo de falha



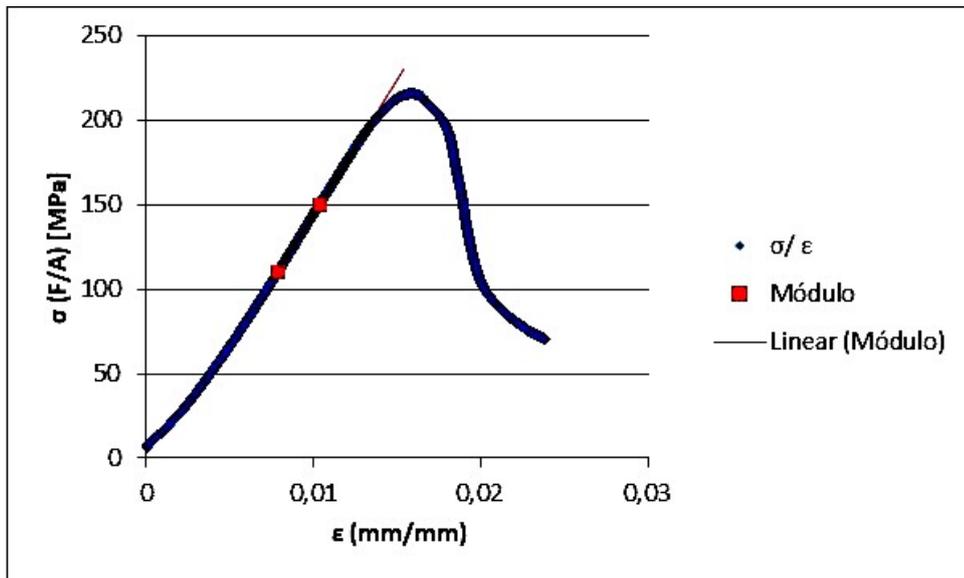
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Quadro 19 – Amostra 14.4\_Dados do ensaio

Diâmetro = <b>14,00</b> mm	Tensão máxima registrada = <b>215,82</b> MPa
Área seção = <b>153,94</b> mm <sup>2</sup>	Módulo de Elasticidade = <b>16,10</b> GPa
Modo de falha: <b>Falha de operação.</b>	

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Gráfico 21 – Amostra 14.4\_Gráfico tensão/deformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 46 – Amostra 14.4\_ Modo de falha



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

De forma geral, todas as amostras ensaiadas em temperatura elevada apresentaram uma coloração mais escurecida após os ensaios, devido a degradação térmica do polímero, e foi observado grande amolecimento das barras, o qual persistia ainda ligeiramente após a retirada das amostras da máquina de tração, quando ainda se apresentavam aquecidas. Como exemplo, visto que todas as amostras foram ensaiadas de maneira similar, na Figura 47 está apresentada a barra de 8,00mm após o ensaio, ainda antes de ser retirada da máquina. Na parte superior, pode-se notar a manta de fibra de vidro, a qual era posicionada após o fechamento do forno para isolamento térmico.

Figura 47 – Amostra 8,00mm após ensaio, com vista interna do forno utilizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

O modo de falha mais presente nessa etapa de ensaio foi por ruptura do invólucro helicoidal de fibras. Através de observações durante os ensaios, foi possível analisar que esse fato estava relacionado com a degradação que o

polímero sofria com a temperatura elevada, assim, as fibras se apresentavam desprotegidas, e rompiam com facilidade na região mais externa que ficava diretamente exposta ao calor, a qual era o invólucro helicoidal.

Pontualmente, a amostra 6.2 apresentou falha por corte de cisalhamento na seção transversal, com deslizamento de fibras internas em apenas uma das ancoragens, que se trata de uma falha já discutida anteriormente, e, quanto a esse ensaio, houve um problema na exportação da tabela dos resultados, e só foi possível exportar a parte inicial do gráfico, portanto, a tensão máxima real que a barra resistiu no ensaio não pôde ser aferida, mas foi o suficiente para cálculo do módulo de elasticidade.

Outras duas observações pontuais relevantes se fazem necessárias, sendo a primeira em relação ao gráfico da amostra 12,5.2, o qual apresentou falta de continuidade pois, devido ao grande amolecimento que as barras apresentaram nesses ensaios, a máquina chegou a considerar nesse determinado momento que o corpo de prova havia se rompido, o que acarretou na necessidade de reiniciar o ensaio do ponto onde a máquina estagnou. E a segunda observação pertinente é em relação à amostra 14.4, que devido a um erro operacional, se colocou a garra da máquina demasiadamente na ponta da ancoragem, o que acarretou em uma deformação por concentração de tensões, mas possibilitou mensurar o módulo de elasticidade na região inicial do gráfico.

Resumidamente, estão apresentados no Quadro 20 os resultados dos módulos de elasticidade de cada amostra dessa etapa. De forma a possibilitar uma análise comparativa, foram retomadas, também, a média dos valores obtidos em temperatura ambiente.

Quadro 20 – Resumo dos módulos de elasticidade

<b>Diâmetro</b>	<b>4,00mm</b>	<b>6,00mm</b>	<b>8,00mm</b>	<b>12,50mm</b>	<b>14,00mm</b>
<b>E (GPa) a Tamb</b>	<b>67,38</b>	<b>47,53</b>	<b>36,38</b>	<b>36,42</b>	<b>17,17</b>
<b>E (GPa) a 205°C</b>	<b>58,19</b>	<b>42,36</b>	<b>14,87</b>	<b>23,57</b>	<b>16,10</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Apesar de não poder se considerar um ensaio de comportamento em situações de incêndio, muitas observações puderam ser realizadas, tanto em função de comportamento, através das análises de modos de falha, quanto em função de propriedades, pois é possível notar, com análise do Quadro 20, que as amostras ensaiadas continuaram a apresentar uma tendência de minoração do módulo de elasticidade com o aumento do diâmetro, apesar de novamente ter apresentado uma divergência desse aspecto no diâmetro de 8,00mm.

E, adicionalmente, pôde-se constatar que houve uma tendência de diminuição do módulo de elasticidade em relação aos módulos apresentados nos ensaios das amostras ensaiadas em temperatura ambiente, mesmo se mantendo as ancoragens fora da região de aquecimento. Apesar da referência do ACI 440.1R (2015) citado no subcapítulo 2.7.7, relatar que, apesar da diminuição das propriedades de aderência devido à degradação da matriz polimérica, pode não ser tão relevante se um comprimento de barra significativo estiver promovendo uma ancoragem em uma região fora da área exposta às temperaturas elevadas, essa constatação não foi totalmente oposta ao referido, pois, apesar da diminuição, ainda apresentou módulo de elasticidade semelhante.

Para fechamento e melhor elucidar o contraponto observado nas barras de GFRP com o comportamento de barras de aço, pode-se visualizar, no “Apêndice B”, uma análise geral das barras ensaiadas, comparadas com um gráfico típico de materiais metálicos.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os procedimentos e pesquisas realizadas para composição desse trabalho, pôde-se concluir que as análises térmicas se apresentaram satisfatórias para caracterização das barras de polímero reforçado com fibras de vidro, as quais apresentaram composição conforme descrição do fabricante, com predominância das fibras de vidro, aproximadamente 86% do volume, e baixa quantidade de compostos orgânicos voláteis na composição, cerca de 2%, sendo o restante composto por matriz polimérica.

O ensaio de tração uniaxial se mostrou significativamente complexo de ser realizado, devido à alta resistência à tração longitudinal e à baixa resistência à compressão transversal apresentada pelas barras de GFRP, entretanto, com base nas pesquisas bibliográficas, foi possível adaptar uma ancoragem composta por tubos de aço de comprimento 7,00cm e diâmetro de 1", preenchidos com resina de base epóxi para transferência das forças aplicadas pela garra da máquina de tração, que se mostrou adequada para realização dos ensaios.

Foi observado, nos ensaios de tração à temperatura ambiente, que há uma tendência de diminuição do valor do módulo de elasticidade, conforme aumenta o diâmetro da barra de GFRP, conforme relatado pelos materiais do ACI, pois o comportamento de corte apresentado pela seção transversal das barras dos compósitos intensifica com o aumento do diâmetro, fato que só não foi observado entre as amostras de 8,00 e 12,50mm. Adicionalmente, foi verificado que, para medição de tensão máxima de resistência à tração, necessita-se de corpos de prova maiores que 0,50m, para diâmetros acima de 8,00mm, para possibilitar o aumento do comprimento livre e das ancoragens para transferência das forças da máquina.

No ensaio de tração uniaxial com exposição das barras à temperatura de transição vítrea, foi possível concluir que houve uma tendência de diminuição do módulo de elasticidade, quando comparado com os módulos apresentados pelas barras ensaiadas à temperatura ambiente, mantendo-se a diminuição do módulo com o aumento do diâmetro, novamente com uma exceção entre as amostras de 8,00 e 12,50mm. Nas amostras, foi verificado também que a temperatura de transição vítrea altera dependendo da região da seção transversal, sendo menor na superfície, e maior no centro da seção transversal, devido à restrição de mobilidade das cadeias poliméricas promovida pelo aumento da densidade de fibras.

Quanto a pesquisas futuras, considerando o estado da arte atual de barras de polímero reforçado com fibras de vidro no Brasil, ainda há um vasto campo a ser explorado, com diversas possibilidades de pesquisas, como comportamento em situações de incêndio e adaptações de cálculos estruturais utilizados para estruturas de concreto armadas com barras metálicas, considerando comportamento dos compósitos de GFRP, entre outros assuntos, os quais podem ser explorados em procedimentos realizados internacionalmente e revistos, ou criados a partir de algum comportamento analisado do material.

Cabe ressaltar que as conclusões encontradas para esse material não podem ser generalizadas para qualquer barra de polímero reforçado com fibras de vidro, pois devem ser levadas em consideração todas as possíveis interferências que afetam as propriedades dos FRP, desde a sua composição e fabricação, até posteriormente à construção da estrutura.

## REFERÊNCIAS

- ABBASI, A.; HOGG, P. J. **Temperature and environmental effects on glass fibre rebar**: modulus, strength and interfacial bond strength with concrete. *Composites: Part B*. v. 36, p. 394-404, 2005. Disponível em: < [https://ac.els-cdn.com/S1359836805000223/1-s2.0-S1359836805000223-main.pdf?\\_tid=577110c7-244b-4038-8334-724a5883c016&acdnat=1524442281\\_a7fcfe56e81282493e03c5f4f3d98680](https://ac.els-cdn.com/S1359836805000223/1-s2.0-S1359836805000223-main.pdf?_tid=577110c7-244b-4038-8334-724a5883c016&acdnat=1524442281_a7fcfe56e81282493e03c5f4f3d98680)>. Acesso em: 03 out 2017.
- AKCELRUD, L. **Fundamentos da ciência dos polímeros**. 1. ed. Barueri, SP: Manole, 2007.
- AMERICAN COMPOSITES MANUFACTURERS ASSOCIATION (ACMA). **A Movable marvel**. 2016. Disponível em: <<http://compositeslab.com/a-lifting-bridge-is-made-from-lightweight-composites-to-save-energy/>>. Acesso em: 15 mar. 2018.
- AMERICAN COMPOSITES MANUFACTURERS ASSOCIATION (ACMA). **Architecture Applications**. 2016. Disponível em: <<http://compositeslab.com/where-are-composites-used/architecture-applications/>>. Acesso em: 03 mar. 2018.
- AMERICAN COMPOSITES MANUFACTURERS ASSOCIATION (ACMA). **History of composites**. 2016. Disponível em: <<http://compositeslab.com/composites-101/history-of-composites/>>. Acesso em: 13 mar. 2018.
- AMERICAN COMPOSITES MANUFACTURERS ASSOCIATION (ACMA). **Infrastructure applications**. 2016. Disponível em: <<http://compositeslab.com/where-are-composites-used/infrastructure-applications/>>. Acesso em: 17 mar. 2018.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 440.1R-15**: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. Farmington Hills, Michigan, 2015.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 440.3R-04**: Guide test methods for fiber-reinforced polymers (frps) for reinforcing or strengthening concrete structures. Farmington Hills, Michigan, 2004.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 440.3R-12**: Guide test methods for fiber-reinforced polymer (frp) composites for reinforcing or strengthening concrete and masonry structures. Farmington Hills, Michigan, 2012.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 440R-02**: State-of-the-art report on fiber reinforced plastic (frp) reinforcement for concrete structures. Farmington Hills, Michigan, 2002.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 440R-07**: Report on fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcement for concrete structures. Farmington Hills, Michigan, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D3418-15:** Standard test method for transition temperatures and enthalpies of fusion and crystallization of polymers by differential scanning calorimetry. Jun 2015. Disponível em: <<https://compass-astm.ez101.periodicos.capes.gov.br/download/D3418.33700.pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D3916-16:** Standard test method for tensile properties of pultruded glass-fiber-reinforced plastic rod. Abril 2016. Disponível em: <<https://compass-astm.ez101.periodicos.capes.gov.br/download/D3916.32759.pdf>>. Acesso em: 05 out. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D4475-16:** Standard test method for apparent horizontal shear strength of pultruded reinforced plastic rods by the short-beam method. Abril 2016. Disponível em: <<https://compass-astm.ez101.periodicos.capes.gov.br/download/D4475.8451.pdf>>. Acesso em: 30 set. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D4476/D4476M-14:** Standard test method for flexural properties of fiber reinforced pultruded plastic rods. Maio 2014. Disponível em: <<https://compass-astm.ez101.periodicos.capes.gov.br/download/D4476D4476M.16190.pdf>>. Acesso em: 05 out. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D7205/D7205M-16:** Standard test method for tensile properties of fiber reinforced polymer matrix composite bars. nov. 2016. Disponível em: <<https://compass-astm.ez101.periodicos.capes.gov.br/download/D7205D7205M.1168.pdf>>. Acesso em: 05 out. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D7617/D7617M-17:** Standard test method for transverse shear strength of fiber-reinforced polymer matrix composite bars. Set 2017. Disponível em: <<https://compass-astm.ez101.periodicos.capes.gov.br/download/D7617D7617M.21567.pdf>>. Acesso em: 11 mar. 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E1131-14:** Standard test method for compositional analysis by thermogravimetry. Abril 2014. Disponível em: <<https://compass-astm.ez101.periodicos.capes.gov.br/download/E1131.37397.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2018.

ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais.** Tradução de Solange Aparecida Visconti; revisão técnica Daniel Rodrigo Leiva. 3° edição norte-americana. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISSO 6892-1:** Materiais metálicos – Ensaio de Tração – Parte 1: método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em:

<<https://www.abntcolegao.com.br/unisinos/pdfview/viewer.aspx?Q=A7D2D42301088FE2ECAEDFB797885FBAA4133E918299ED7715FE5D2B69B57C5F>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

BAENA, M. et al. **Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test**. Composites: Part B. v. 40, p. 784-797, 2009. Disponível em: <[https://ac.els-cdn.com/S1359836809001498/1-s2.0-S1359836809001498-main.pdf?\\_tid=903cb404-3e68-487c-a9bc-2d949d00b2cf&acdnat=1522509263\\_9fba4da3ba75f7e0fe6cb223af794bc4](https://ac.els-cdn.com/S1359836809001498/1-s2.0-S1359836809001498-main.pdf?_tid=903cb404-3e68-487c-a9bc-2d949d00b2cf&acdnat=1522509263_9fba4da3ba75f7e0fe6cb223af794bc4)>. Acesso em: 01 abril 2018.

BAKIS, C. E. et al. **Fiber-reinforced polymer composites for construction - state-of-the-art review**. Journal of Composites for Construction. v. 6, n. 2, p. 73-87, maio 2002. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%291090-0268%282002%296%3A2%2873%29>>. Acesso em: 21 fev 2018.

BEER, F. P.; JOHNSTON JR., E. R. Resistência dos materiais. 3 ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 2011.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. Tradução de Sergio Murilo Stamile Soares; revisão técnica José Roberto Moraes d'Almeida. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos polímeros**. 3 ed. São Carlos: Artliber Editora, 2013.

CHEN, Y. et al. **Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures**. Composite Structures. v. 78, p. 101-111, 2007. Disponível em: <[https://ac.els-cdn.com/S0263822305002254/1-s2.0-S0263822305002254-main.pdf?\\_tid=14cc00b9-f059-4095-bcca-80d22da115fd&acdnat=1524441920\\_7f7854f26d29d46b513e2bf6d8553285](https://ac.els-cdn.com/S0263822305002254/1-s2.0-S0263822305002254-main.pdf?_tid=14cc00b9-f059-4095-bcca-80d22da115fd&acdnat=1524441920_7f7854f26d29d46b513e2bf6d8553285)>. Acesso em: 02 abril 2018.

CORREIA, J. R. et al. **Fire protection systems for building floors made of pultruded GFRP profiles**. Part 1: Experimental investigations. Composites: Part B. v. 41, p. 617-629, setembro 2010. Disponível em: <[https://ac.els-cdn.com/S1359836810001599/1-s2.0-S1359836810001599-main.pdf?\\_tid=5643ca8f-532b-4ec1-97b6-a52bdacdc38d&acdnat=1527301021\\_1b0ac1c5ad74f47e3af2f883393f40f6](https://ac.els-cdn.com/S1359836810001599/1-s2.0-S1359836810001599-main.pdf?_tid=5643ca8f-532b-4ec1-97b6-a52bdacdc38d&acdnat=1527301021_1b0ac1c5ad74f47e3af2f883393f40f6)>. Acesso em: 04 abril 2018.

COSTA, M. L. **[Termogravimetria] 5 dicas avançadas para aumentar instantaneamente sua interpretação em qualquer**. Mountain View: Google, 15 jul. 2017. (16 min 38 s). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=9VD49mWaz9o>>. Acesso em: 13 mar. 2018.

ELTZ, M. V. **Análise da resistência mecânica de materiais fabricados via metalurgia do pó influenciados pelo aumento de temperatura**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2017.

FREITAS, D. G. et al. **Ensaio de tração - Aço vs PRF**. Mountain View: Google, 17 nov. 2017. (1 min 49 s). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=IjNl1pP7OoY>>. Acesso em: 13 dez. 2017. Vídeo produzido para a disciplina Tecnologia da Construção Civil II, ministrada pela professora Grace Abrahao Souza de Frias, da Universidade Cruzeiro do Sul.

GALVÃO, C. **Incêndio em prédio de SP foi causado por curto-circuito em tomada no 5º andar, diz secretário**. G1, São Paulo, 03 maio 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/incendio-em-predio-de-sp-foi-causado-por-curto-circuito-em-tomada-no-5-andar-diz-testemunha.ghtml>>. Acesso em: 03 jun. 2018.

KATZ, A.; BERMAN, N.; **Modeling the effect of high temperature on the bond of FRP reinforcing bars to concrete**. Cement & Concrete Composites. v. 22, p. 433-443, junho 2000. Disponível em: <[https://ac.els-cdn.com/S0958946500000433/1-s2.0-S0958946500000433-main.pdf?\\_tid=40879275-87cb-49a2-a5ec-c67c48e818e8&acdnat=1527294700\\_8705103428f438c10d4b0cea893c6d40](https://ac.els-cdn.com/S0958946500000433/1-s2.0-S0958946500000433-main.pdf?_tid=40879275-87cb-49a2-a5ec-c67c48e818e8&acdnat=1527294700_8705103428f438c10d4b0cea893c6d40)>. Acesso em: 25 maio 2018.

LISBÃO, A. S. **Estrutura e propriedades dos polímeros**. São Carlos: EDUFSCar, 2012.

MACHADO, L. D. B.; MATOS, J. R. Análise térmica diferencial e calorimetria exploratória diferencial. In: CANEVAROLO JR., S. V.(Coord.). **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Carlos: Artliber Editora, 2003. p. 229-262.

MATOS, J. R.; MACHADO, L. D. B. Análise térmica – Termogravimetria. In: CANEVAROLO JR., S. V.(Coord.). **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Carlos: Artliber Editora, 2003. p. 209-228.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO P. J. M. **Concreto**: Microestrutura, Propriedades e Materiais. Tradução de Cristina Borba; revisores e coordenadores Nicole Pagan Hasparyk; Paulo Helene; Vladimir Antonio Paulon. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MINISTÉRIO DAS CIDADES - Secretaria Nacional de Habitação. **Programa brasileiro de qualidade e produtividade do habitat – PBQP-H**. Sistema nacional de avaliação técnica de produtos inovadores e sistemas convencionais – SINAT. Brasília/DF, novembro 2016. Disponível em: <[http://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos\\_sinat.php](http://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos_sinat.php)>. Acesso em: 01 março 2018.

NANNI, A. **North American design guidelines for concrete reinforcement and strengthening using FRP**: principles, applications and unresolved issues. Construction and Building Materials. v. 17, p. 439-446, 2003. Disponível em: <[https://ac.els-cdn.com/S0950061803000424/1-s2.0-S0950061803000424-main.pdf?\\_tid=090c7c67-9aa4-4a80-bf03-f6d0ca2f357d&acdnat=1521939972\\_169b1b72986\\_279661394cfd6cae75437](https://ac.els-cdn.com/S0950061803000424/1-s2.0-S0950061803000424-main.pdf?_tid=090c7c67-9aa4-4a80-bf03-f6d0ca2f357d&acdnat=1521939972_169b1b72986_279661394cfd6cae75437)>. Acesso em: 13 mar. 2018.

PILAKOUTAS, K.; NEOCLEOUS, K.; GUADAGNINI, M. **Design philosophy issues of fiber reinforced polymer reinforced concrete structures**. Journal of Composites

for Construction. v. 6, n. 3, p. 154-161, agosto 2002. Disponível em:  
<<https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%291090-0268%282002%296%3A3%28154%29>>. Acesso em: 03 out 2017.

SCHUQUEL, T. **Boate Kiss: cinco anos depois da tragédia, o que mudou?**. Metrôpoles, 26 janeiro 2018. Disponível em:  
<<https://www.metropoles.com/brasil/boate-kiss-cinco-anos-depois-o-que-mudou>>. Acesso em: 03 jun. 2018.

TAVARES, D. H. **Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de GFRP**. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2006. Disponível em:  
<[http://www.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2006ME\\_DanusaHaickTavares.pdf](http://www.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2006ME_DanusaHaickTavares.pdf)>. Acesso em: 07 fev. 2018.

TUTUM, C. C.; BARAN, I.; DEB, K. **Optimum design of pultrusion process via evolutionary multi-objective optimization**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. v. 72, p. 1205-1217, junho 2014. Disponível em:  
<<https://link-springer-com.ez101.periodicos.capes.gov.br/content/pdf/10.1007%2Fs00170-014-5726-6.pdf>>. Acesso em: 23 ago 2018.

UOMOTO, T. et al. **Use of fiber reinforced polymer composites as reinforcing material for concrete**. Journal of Materials in Civil Engineering. v. 14, n. 3, p. 191-209, maio / junho 2002. Disponível em:  
<<https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282002%2914%3A3%28191%29>>. Acesso em: 02 set. 2017.

## APÊNDICE A – ANCORAGEM PARA ENSAIO DE TRAÇÃO

Conforme relatado no subcapítulo 3.2, foram realizados, primeiramente, testes sem ancoragens, nos quais foram visualizados rompimentos por compressão na garra da máquina, sendo caracterizado pelo esmagamento exercido pelas garras na amostra, que posteriormente gerou uma fissura e evoluiu até um desprendimento do material, causando um escorregamento da amostra nas garras. Na Figura 48 é possível analisar uma dessas amostras após um teste de tração, onde se apresenta a falha comentada.

Figura 48 – Amostra Ø10,00mm ensaiada sem ancoragem



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Posteriormente, foi identificado que a ancoragem que melhor se adaptou ao teste foi a ancoragem sugerida pelo ASTM D7205/D7205M (2016), apresentada em ilustração no subcapítulo 2.2.1. Constituída por um tubo de aço onde a barra é centralizada, e envolta por material de preenchimento resistente, de forma a distribuir melhor as forças aplicadas pela garra.

Tal ancoragem, além de ser a mais atual dentre as recomendações dos padrões da ASTM, também foi visualizada em utilização em testes, no mesmo tipo de ensaio que se realizou nessa pesquisa, onde foi confeccionada com comprimento de 7,00cm, em um ensaio realizado no laboratório de engenharia civil da Universidade Cruzeiro do Sul (São Paulo/SP), para apresentação no seminário de estruturas de materiais compósitos poliméricos de uma atividade acadêmica do curso de engenharia civil da instituição. (FREITAS et al., 2017).

Nos ensaios piloto, foram testadas ancoragens com 6,00cm, 7,00cm, e 8,00cm, visto o bom precedente de utilização com 7,00cm nesse outro ensaio, e foi constatado que esse comprimento atenderia a necessidade, pois com 6,00cm notou-se pouca área de ancoragem, causando ruptura das barras por compressão nas garras, e com 8,00cm, apesar de também atender, gerava uma perda de 2,00cm do comprimento livre da amostra, que já estava levemente abaixo do requerido.

Assim, a primeira etapa da confecção das ancoragens consistiu em medição e corte dos tubos de aço carbono em várias partes com comprimento igual a 7,00cm, posteriormente foram higienizados para retirada do óleo que é aplicado para evitar oxidação, e lixados internamente para criação de uma superfície rugosa para promover melhor travamento mecânico com a resina utilizada. Como diâmetro, foram padronizados tubos de 1", por ser o diâmetro máximo que a máquina aceita, sendo a máquina utilizada nos ensaios da marca *MTS modelo MTS Landmark® Testing Solutions 370.25*. Na Figura 49 é possível identificar alguns desses tubos já preparados.

Figura 49 – Tubos de aço Ø1" e comprimento 7,00cm



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Para garantir o alinhamento das barras, foram utilizados caps de PVC, os quais foram instalados sob pressão nos tubos de aço, e perfurados no centro com um diâmetro igual à barra que se utilizaria em cada ancoragem. Na Figura 50 estão apresentadas algumas das ancoragens utilizadas na pesquisa, já preparadas e prontas para serem instaladas nas barras e receberem a resina.

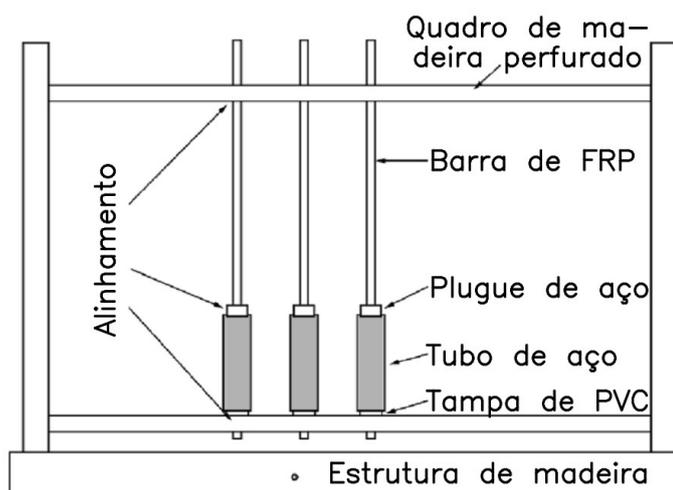
Figura 50 – Ancoragens prontas para instalação



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Para correto alinhamento, ainda existe no ASTM D7205/D7205M (2016) a sugestão de confecção de uma estrutura de madeira, apresentada na Figura 51, para garantia de que não terá o surgimento de solicitações de momentos, que seriam indesejadas pois afetariam os resultados.

Figura 51 – Estrutura de madeira para alinhamento da ancoragem



Fonte: Adaptado de ASTM D7205/D7205M (2016, p. 12).

Para a pesquisa foi elaborada pelo autor uma estrutura de madeira que possibilitou a confecção de diversas amostras juntas, pois, após o preenchimento das ancoragens, foram esperados sete dias para cura completa da resina, assim, com essa adaptação, foi possível otimizar o tempo de espera. Outro fato que

fomentou a necessidade de uma estrutura em forma de 3D foi que, com um pórtico tal como apresentado na Figura 51, teria que se deixa-lo escorado, o que poderia vir a causar algum acidente e gerar a necessidade de descarte das amostras, o que não aconteceria em uma estrutura “autossustentada”, como a que foi utilizada e pode ser visualizada na Figura 52.

Figura 52 – Estrutura de madeira para alinhamento da ancoragem



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

As etapas que se seguiram foram de espera da cura da resina por sete dias, nesse meio tempo foi confeccionado todo um novo jogo para o outro extremo das amostras, de forma análoga ao que já fora apresentado nesse apêndice.

Vale ressaltar que a resina utilizada foi a *Compound® Adesivo* da marca *Vedacit*, a qual é um adesivo estrutural de base epóxi, recomendado para reparos em concreto, colagem de diversos materiais, e, entre outras coisas, ancoragens. Essa resina foi a mesma utilizada por Freitas et al. (2017), no laboratório de engenharia civil da Universidade Cruzeiro do Sul (São Paulo/SP), mencionado nesse mesmo apêndice. Na Figura 53 está apresentada a referida resina, sendo que, a divulgação da marca da mesma só foi realizada pois essa se mostrou satisfatória

nos dois ensaios, logo, pode ser utilizada em uma futura reincidência do ensaio realizado.

Figura 53 – Resina *Compound® Adesivo*



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Posteriormente, após cura da resina, todo o processo foi repetido para a outra ancoragem das amostras, quando novamente foi utilizada a estrutura 3D para possibilitar a acomodação das barras linearmente, para cura da nova resina. Na Figura 54, são apresentadas as barras em etapa de cura final.

Figura 54 – Cura final da resina de base epóxi



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Note que a parte superior da estrutura, a qual encontra-se ligeiramente acima da metade do comprimento da barra, foi responsável por promover o alinhamento do conjunto “ancoragem/barra/ancoragem”, tendo furos com diâmetros sob medida para cada amostra, enquanto que a parte inferior foi responsável por acomodar as ancoragens, promovendo também o travamento dessas, para que permanecessem imóveis com a inserção da resina que foi despejada dentro dos tubos de aço vazio, sendo efetuada após a inserção das barras, quando, cuidadosamente, foram realizados movimentos dentro da ancoragem preenchida com resina, para eliminar qualquer bolha ou imperfeição no preenchimento, antes de serem posicionadas as barras no devido lugar, utilizando como guia os furos efetuados nos caps de PVC.

Por fim, devido configuração apresentada na Figura 53, após a completa cura da resina se realizou a desmontagem da estrutura de madeira, para se retirar as barras que ainda passavam pela ultima etapa da confecção das ancoragens, a qual tratava-se da retirada dos caps, pois sua localização iria impedir a realização dos ensaios de tração, visto que o diâmetro externo do tubo de aço utilizado era o máximo aceito pela maquina de tração. Na Figura 55 estão apresentados exemplos de ancoragens finalizadas após realização de todo esse processo relatado.

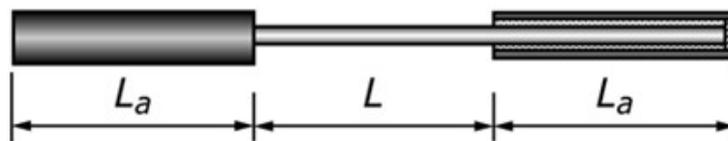
Figura 55 – Ancoragem finalizada



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Assim, nessa configuração utilizada para o teste, o comprimento total da barra é dado pela soma de duas vezes o comprimento de ancoragem, mais o comprimento livre entre ancoragens, como apresentado na Figura 56.

Figura 56 – Representação de amostra de teste com tubos de aço



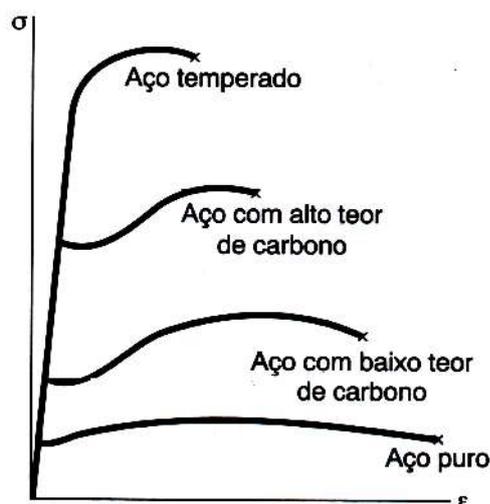
Fonte: ASTM D7205/D7205M (2016, p. 9).

## APÊNDICE B – ANÁLISE COMPARATIVA COM MATERIAL METÁLICO

Conforme mencionado no subcapítulo 4.3, se realizou, por fim, uma análise geral das barras ensaiadas, comparando-as com um gráfico típico de materiais metálicos.

Na Figura 57, é possível verificar quatro curvas típicas de tensão/deformação específica, as quais representam o ferro e mais três tipos de aço, e pode-se notar que tais materiais apresentam diferentes valores de tensão máxima resistida, tensão de escoamento e deformação específica, entretanto, permanecem com o mesmo módulo de elasticidade. (BEER; JOHNSTON JR., 2011).

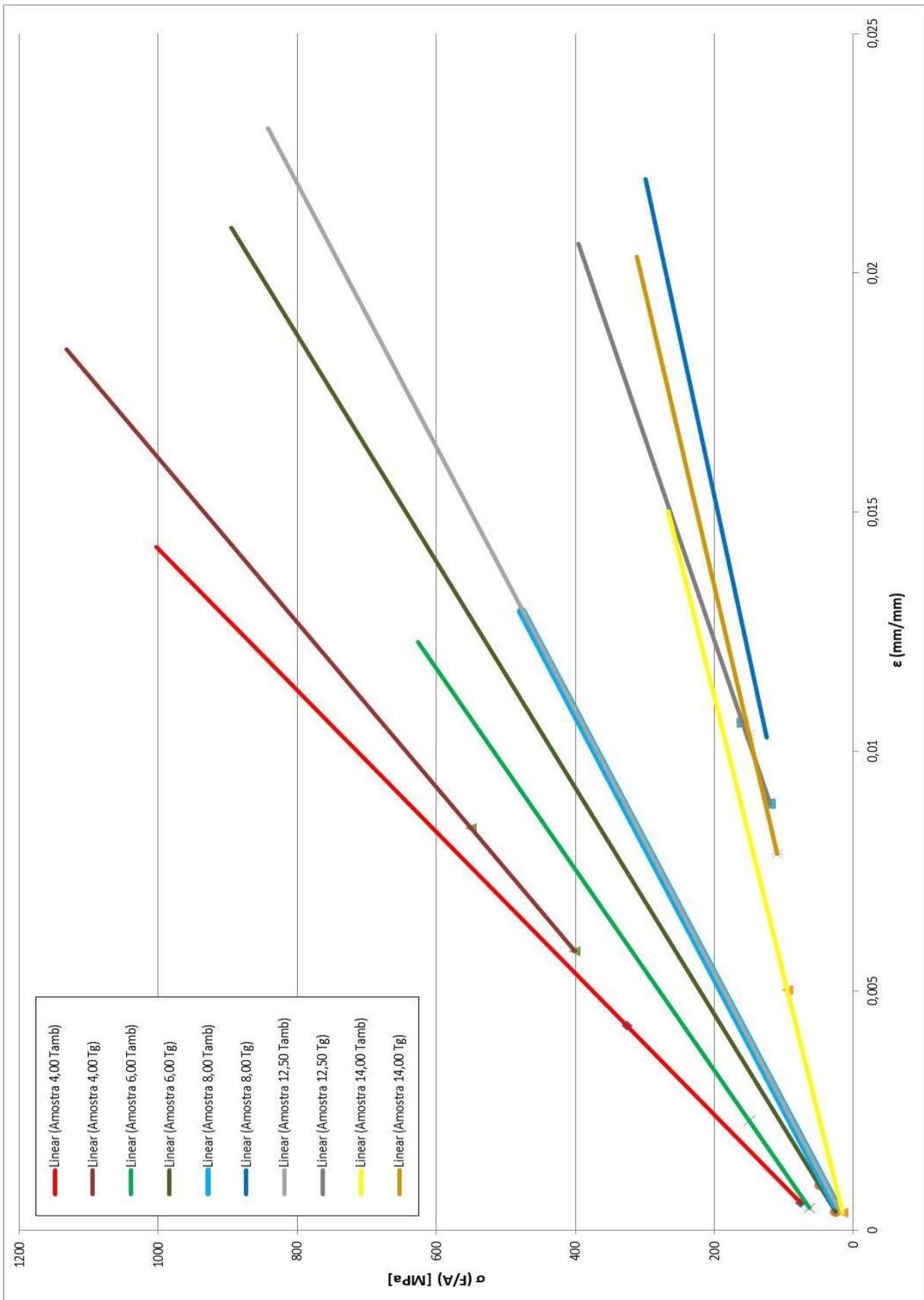
Figura 57 – Curvas tensão/deformação típica para diferentes materiais metálicos



Fonte: BEER; JOHNSTON JR. (2011, p. 77).

No Gráfico 22, estão expostas as linhas de tendência extrapoladas, referentes aos módulos de elasticidade que foram encontrados nessa pesquisa. Sendo que as curvas mencionadas como “*Tamb*” referem-se às médias das amostras ensaiadas na condição de temperatura ambiente, enquanto que, analogamente, as curvas marcadas como “*Tg*”, são respectivas às amostras ensaiadas na temperatura de transição vítrea. É possível notar que houve uma tendência de minoração da inclinação da curva, ou, do módulo de elasticidade, com o aumento do diâmetro, e, também nota-se uma minoração do módulo com a exposição à temperatura de transição vítrea. Com exceção das amostras de 8,00mm e 12,50mm, que apresentaram praticamente o mesmo valor à “*Tamb*”, e valores crescentes em “*Tg*”.

Gráfico 22 – Linhas de tendência dos respectivos módulos de elasticidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).