

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

RAFAEL TREVISAN

**ANÁLISE MECÂNICA EM ELEVADAS TEMPERATURAS DE BARRAS
POLIMÉRICAS REFORÇADAS COM FIBRA DE VIDRO**

SÃO LEOPOLDO

2023

RAFAEL TREVISAN

**ANÁLISE MECÂNICA EM ELEVADAS TEMPERATURAS DE BARRAS
POLIMÉRICAS REFORÇADAS COM FIBRA DE VIDRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian

Co-orientador: Prof Dr Roberto Christ

São Leopoldo

2023

T814a Trevisan, Rafael.
Análise mecânica em elevadas temperaturas de barras poliméricas reforçadas com fibra de vidro / Rafael Trevisan. – 2023.
122 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

“Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian
Coordenador: Prof. Dr. Roberto Christ.”

1. Barras poliméricas. 2. Elevadas temperaturas. 3. Propriedades mecânicas. I. Título.

CDU 624

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Silvana Dornelles Studzinski – CRB 10/2524)

AGRADECIMENTOS À CAPES

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família que me deu suporte para realização desse trabalho.

À minha esposa Fernanda, por todo auxílio e companhia.

À toda equipe do itt Performance, pelo apoio no programa experimental e para a realização dos ensaios. Ao meu orientador Professor Bernardo, e ao meu co-orientador Professor Roberto pelo apoio nas definições da pesquisa, do programa experimental e da validação desse estudo. Agradeço ao apoio do Professor Hinoel nas discussões técnicas e validação dos resultados obtidos no programa experimental.

À toda equipe da Construtora Maricler pela paciência e compreensão nos momentos de ausência.

Aos Laboratoristas Claiton e Éder e os demais membros da equipe do Laboratório de Mecânica da Unisinos.

À empresa Composite Group pelo fornecimento das barras para estudo na presente pesquisa.

Aos funcionários do itt Fuse pelo apoio na realização dos ensaios.

A todos os professores da minha jornada de graduação e pós-graduação na Unisinos.

RESUMO

Um dos principais danos nas estruturas de concreto armado é a corrosão das armaduras. Como alternativa a este cenário, tem-se a utilização de barras poliméricas reforçadas com fibra de vidro (GFRP – *Glass Fiber reinforced Polymer*), incrementando durabilidade. O material apresenta ainda reduzida massa em relação as barras de aço e, também, elevada resistência à tração. Para emprego dessas barras, tem-se necessidade de estudar seu comportamento diante de sinistros como incêndios e a ação de elevadas temperaturas, objetivo deste estudo. Em específico, o estudo avaliou o módulo de elasticidade e resistência à tração axial das barras durante e após à exposição em elevadas temperaturas. O programa experimental caracterizou a barra em temperatura ambiente. Após, as barras foram ensaiadas durante e após a exposição à temperatura nos patamares de 150, 200, 250, 300 e 350 °C. Após a exposição às elevadas temperaturas, as barras foram avaliadas com microscopia eletrônica de varredura (MEV) e avaliado o consumo de resina através do ensaio de teor de fibras. Os resultados apontam que o teor de fibras estava em conformidade com as premissas da prática recomendada IBRACON/ABECE e normas internacionais. Em relação à exposição em elevadas temperaturas, se percebeu que os danos foram mais severos nos ensaios durante as elevadas temperaturas do que nas barras após essa exposição. A redução na resistência à tração chegou a ser de 37% na temperatura de 350 °C. A maior redução do módulo de elasticidade, no entanto foi de 8,3%, indicando que, a atuação das fibras não foi tão comprometida mesmo diante da exposição ao calor. Para os ensaios após a exposição em elevadas temperaturas, a maior redução na resistência à tração se deu em 150 °C, sendo de menos de 1%. Para o módulo de elasticidade nessa condição a maior redução foi de 7,9%, percebida aos 200 °C. A temperatura de transição vítrea obtida foi de 101,75 °C. Através da MEV foi possível perceber falhas que decorrem da degradação da resina diante da ação do calor, tais como: danos superficiais, falhas, menor espessura de revestimento das fibras, ruptura das fibras, entre outros. O ensaio de teor de fibras após elevadas temperaturas apontou relação direta com a redução das propriedades mecânicas.

Palavras-chave: elevadas temperaturas, barras poliméricas, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

One of the main damages in reinforced concrete structures is the corrosion of the steel reinforcements. As an alternative to this scenario, there is the use of polymer bars reinforced with glass fiber (GFRP – Glass Fiber reinforced Polymer), increasing durability. The material also has reduced mass compared to steel bars and also high tensile strength. In order to use these bars, it is necessary to study their behavior in the face of accidents such as fires and the action of high temperatures, objective of this study. Specifically, the study evaluated the elastic modulus and direct tensile strength of the bars during and after exposure to high temperatures. The experimental program characterized the bar at room temperature. Afterward, the bars were tested during and after exposure to temperatures at levels of 150, 200, 250, 300, and 350 °C. After exposure to high temperatures, the bars were evaluated with scanning electron microscopy (SEM), and the resin consumption was evaluated through the fiber content test. The indicated results indicate that the fiber content was in accordance with the assumptions of the IBRACON/ABECE recommended practices and international standards. Regarding exposure at high temperatures, it was noticed that the damage was more severe in the tests carried out during the high temperatures than in the bars after this exposure. The reduction in direct tensile strength reached 37% at a temperature of 350 °C. The greatest reduction in the modulus of elasticity, however, was 8.3%, indicating that the performance of the fibers was not so compromised even in the face of exposure to heat. For tests after exposure to high temperatures, the greatest reduction in tensile strength occurred at 150 °C, being less than 1%. For the modulus of elasticity in this condition, the greatest reduction was 7.9%, observed at 200 °C. The glass transition temperature obtained was 101.75 °C. Through scanning electron microscopy, it was possible to perceive flaws that result from the consumption of resin due to the action of heat, such as: surface damage, flaws, less thickness of fiber cover, fiber breakage, among others. The fiber content test after high temperatures showed a direct relationship with the reduction of mechanical properties.

Keywords: high temperatures, polymer bars, mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Padrão de comportamento da matriz quando submetida à um esforço de tração	23
Figura 2: Comparativo dos materiais compósitos com materiais corriqueiramente empregados na construção civil	23
Figura 3: Ponte Wotton Bridge	24
Figura 4: Tabuleiro de ponte armado com barras de GFRP	24
Figura 5: Utilização de GFRP em tanques de tratamento de água e esgoto	25
Figura 6: Variáveis no processo de produção	26
Figura 7: Processo produtivo de barras de FRP	27
Figura 8: Formas de tratamento superficial das barras visando a aderência, sendo (a) nervuradas; (b) revestido de areia; e (c) com areia e fibras enroladas na forma helicoidal	29
Figura 9: Tensão x deformação de diferentes matérias-primas de FRP	31
Figura 10: Análise de MEV em barras de GFRP em diferentes condições	34
Figura 11: Relação entre as propriedades mecânicas e a temperatura em barras de FRP	35
Figura 12: Tubo de ancoragem e corpo de prova	36
Figura 13: Demonstração do efeito da exposição em 400 °C das barras	38
Figura 14 - Comportamento das barras em (a) 150 °C e (b) 300 °C	38
Figura 15: Modo de fratura convencional de barras de GFRP em elevadas temperaturas	39
Figura 16: Aparência das barras após exposição	40
Figura 17: Instrumentação adotada para aquecimento e ensaio mecânico	42
Figura 18: Gráfico de tensão deformação de barras de GFRP, com 9,5 mm de diâmetro à 100 °C	43
Figura 19: Variação no módulo de elasticidade conforme a temperatura para barras de FRP e de aço	44
Figura 20: Variação do módulo de elasticidade durante (U) e após elevadas (A) temperaturas para (a) barras de 8 mm e (b) barras de 12 mm	45
Figura 21: Resultados obtidos – Relação entre o módulo de elasticidade obtido experimentalmente e calculado (a) durante (U) e (b) após (A) elevadas temperaturas	46

Figura 22: Resultados de módulo de elasticidade durante exposição em elevadas temperaturas	47
Figura 23: Efeito da temperatura nas barras	48
Figura 24: Comportamento de diferentes fibras submetidas a elevadas temperaturas	49
Figura 25: Comportamento à tração de barras de FRP em diferentes temperaturas a) CFRP b) AFRP c) GFRP e módulo de elasticidade d) CFRP e e) GFRP e ARFP	49
Figura 26: Etapas do programa experimental	52
Figura 27: Gabarito de montagem para amostras de resistência à tração e módulo de elasticidade.	53
Figura 28: Gabarito para confecção das amostras e fornecimento das barras em rolos	53
Figura 29: Acoplamento do forno à máquina universal de ensaios	57
Figura 30: Amostras avaliadas – Etapas de exposição em mufla e amostras no dessecador	58
Figura 31: Instrumentação de ensaio	60
Figura 32: Gráfico obtido no ensaio de análise termogravimétrica.....	64
Figura 33: Gráfico obtido no ensaio de calorimetria diferencial de varredura (DSC) - primeiro ciclo de aquecimento e resfriamento	64
Figura 34: Gráfico obtido no ensaio de calorimetria diferencial de varredura (DSC) - segundo ciclo de aquecimento e resfriamento	65
Figura 35: Efeito da exposição durante e após elevadas temperaturas na resistência à tração em relação a temperatura ambiente.....	68
Figura 36: Forma da barra após ensaio de tração axial - Pós temperatura de 350 °C	73
Figura 37: Efeito da exposição durante e após elevadas temperaturas no módulo de elasticidade em relação a temperatura ambiente.....	78
Figura 38: Resultados de resistência à tração, módulo de elasticidade e aspecto visual das barras em relação à temperatura, considerando ensaios após exposição	83
Figura 39: Resultados de resistência à tração, módulo de elasticidade e aspecto visual das barras em relação à temperatura, considerando ensaios durante exposição	84

Figura 40: Microscopia em amostras não expostas em elevada temperatura (a) ampliação de 150x, aspecto superficial das barras com fibras expostas e (b) ampliação de 3000x, interface entre as fibras e a resina	86
Figura 41: Microscopia em amostras expostas em 150 °C (a) ampliação de 400x, (b) ampliação de 136x- em ambas, descontinuidade das fibras.....	87
Figura 42: Microscopia em amostras expostas em 150 °C (a) amp. de 2600x, microfissura na interface de resinas e fibras (b) amp. de 136x- aspecto superficial .	87
Figura 43: Microscopia em amostras expostas em 200 °C (a) amp. de 2000x, descontinuidade na fibra (b) amp. de 523 x - fibra exposta e irregularidade superficial	88
Figura 44: Microscopia em amostras expostas em 250 °C (a) amp. de 3500x, microfissuras na superfície (b) amp. de 2960x- microfissura e vazios	89
Figura 45: Microscopia em amostra exposta em 300 °C - amp. de 132x, exposição e descontinuidade das fibras.....	90
Figura 46: Microscopia em amostra exposta em 300 °C - amp. de 642x, exposição e descontinuidade das fibras, vazios entre trechos da fibra	90
Figura 47: Microscopia em amostra exposta em 350 °C – (a) amp. de 202x, microfissuras ao longo da resina (b) amp. 122x microfissuras e vazios.....	91
Figura 48: Consumo de resina em relação à condição ambiente.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Normas relacionadas ao uso de FRP	21
Tabela 2: Exigências para emprego dos materiais como fibra e resina/envoltória....	27
Tabela 3: Propriedades de barras de GFRP com diferentes resinas	28
Tabela 4: Propriedades das barras de GFRP	28
Tabela 5: Características mecânicas de barras de GFRP	29
Tabela 6: Valores obtidos de resistência à compressão das barras	30
Tabela 7: Valores obtidos de propriedades mecânicas em diferentes diâmetros e exposição em elevadas temperaturas.....	41
Tabela 8: Detalhamento do programa experimental	42
Tabela 9: Valores obtidos de aderência nas diferentes temperaturas.....	50
Tabela 10: Valores de temperatura de transição vítrea.....	51
Tabela 11: Valores de comprimento e de massa das barras	62
Tabela 12: Valores obtidos de diâmetro efetivo e densidade	62
Tabela 13: Valores obtidos de teor de fibra.....	66
Tabela 14: Efeito da exposição durante e após elevadas temperaturas na resistência à tração em relação a temperatura ambiente.....	68
Tabela 15: Aspecto visual das barras na situação durante e pós o ensaio em exposição em elevadas temperaturas.....	74
Tabela 16: Valores obtidos de módulo de elasticidade	77
Tabela 17: Efeito da exposição durante e após elevadas temperaturas na resistência à tração em relação a temperatura ambiente.....	78
Tabela 18: Teor de resina em amostras após exposição em elevadas temperaturas	92

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	<i>The American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABECE	Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AFRP	<i>Aramid reinforced Polymer</i>
ASTM	<i>American Society for testing materials</i>
BFRP	<i>Basalt reinforced Polymer</i>
CAN	<i>Canadian Standard</i>
CFRP	<i>Carbon Reinforced Polymer</i>
CSA	<i>Canadian Standard Association</i>
CT	Comitê Técnico
DSC	<i>Differential scanning calorimetry</i>
FIB	<i>Federation Internationale du Béton</i>
FRP	<i>Fiber Reinforced Polymer</i>
FTIR	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>
GOST	<i>Gosudarstvennyy Standart</i>
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
ISIS	<i>Intelligent Sensing for Innovative Structures</i>
ISO	<i>International Standard Organization</i>
Itt FUSE	Instituto tecnológico em ensaios de segurança funcional
Itt Performance	Instituto tecnológico em desempenho e construção civil
JSCE	<i>Japan Society of Civil Engineers</i>
LAPOL	Laboratório de Polímeros
LASE	Laboratório de Segurança estrutural
LMC	Laboratório de materiais de construção
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MTQ	Ministry of Transportation of Québec
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NSERC	<i>National Science and Engineering Research Council of Canada</i>

TGA	Análise termogravimétrica
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 TEMA	16
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	17
1.3 PROBLEMA	17
1.4 OBJETIVOS	18
1.4.1 Objetivo geral	18
1.4.2 Objetivos específicos.....	18
1.5 JUSTIFICATIVA	18
2 BARRAS POLIMÉRICAS REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO	20
2.1 HISTÓRICO E ABRANGÊNCIA DO TEMA EM NORMAS.....	20
2.3 PROCESSO PRODUTIVO E CARACTERÍSTICAS.....	25
2.4 PROPRIEDADES E ENSAIOS EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS	28
2.5 EFEITO DA TEMPERATURA EM BARRAS DE GFRP.....	34
2.5.1 Estudos em barras isoladas	36
2.5.1.1 Estudos em barras após a exposição em elevadas temperaturas	36
2.5.1.2 Estudos em barras durante a exposição em elevadas temperaturas.....	41
2.5.2 Ensaios de barras inseridas em elementos de concreto.....	48
3 METODOLOGIA	52
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	52
3.2 MATERIAIS	52
3.2.1 Barras de FRP.....	53
3.2.2 Resina e tubos de aço.....	54
3.3 MÉTODOS DE ENSAIO.....	54
3.3.1 Diâmetro efetivo e densidade.....	54
3.3.2 Determinação da temperatura de transição vítrea	55
3.3.3 Determinação do teor de fibras pelo método da combustão	57
3.3.4 Resistência à tração e módulo de elasticidade	59
3.3.5 Microscopia eletrônica de varredura	61
4 RESULTADOS	62
4.1 CARACTERIZAÇÃO EM TEMPERATURA AMBIENTE.....	62
4.1.1 Diâmetro efetivo e densidade.....	62
4.1.2 Temperatura de transição vítrea	63

4.1.3 Teor de fibras	66
4.2 ENSAIOS MECÂNICOS - EXPOSIÇÃO EM ELEVADAS TEMPERATURAS	67
4.2.1 Síntese e análise comparativa	67
4.2.1.1 Tração axial	67
4.2.1.2 Módulo de elasticidade	76
4.2.2 Comparação entre variáveis	83
4.3 ENSAIOS COMPLEMENTARES: MEV E CONSUMO DE RESINA	86
4.3.1 Microscopia eletrônica de varredura	86
4.3.1.1 Amostra em condição ambiente	86
4.3.1.2 Amostra após 150 °C	87
4.3.1.3 Amostra após 200 °C	88
4.3.1.4 Amostra após 250 °C	89
4.3.1.5 Amostra após 300 °C	89
4.3.1.6 Amostra após 350 °C	91
4.3.2 Consumo da resina	92
5. CONCLUSÃO	95
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
5.2 SUGESTÃO PARA ESTUDOS FUTUROS	96
REFERÊNCIAS	98
APÊNDICE A – GRÁFICOS RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE REFERÊNCIA.....	106
APÊNDICE B – GRÁFICOS RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DURANTE E PÓS EXPOSIÇÃO	108
APÊNDICE C – GRÁFICOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DURANTE E PÓS EXPOSIÇÃO	113

1 INTRODUÇÃO

Estruturas de concreto armado apresentam uso expressivo mundialmente (BOLINA; TUTIKIAN; HELENE, 2019). A utilização de elementos de reforço no concreto visa proporcionar ao material comportamento dúctil e maior resistência à tração, de modo a se somar a características como moldabilidade, disponibilidade de insumos e elevada resistência à compressão (GOURI *et al.*, 2009).

O reforço com uso predominante nas estruturas é feito com barras de aço, garantindo resistência à tração e ao cisalhamento (BOLINA; TUTIKIAN; HELENE, 2019). No entanto, essas barras sofrem corrosão, dano que se caracteriza como de ocorrência majoritária em elementos de concreto armado (RIBEIRO *et al.*, 2018). A corrosão das barras de aço é causada por ataques que o próprio ambiente oferece ao concreto, através da ação de cloretos, de dióxido de carbono ou de outros químicos na atmosfera (EKOLU, 2020).

Devido ao custo de reabilitação e manutenção de estruturas degradadas, novas opções estão sendo usadas como elementos de reforços em estruturas de concreto, como por exemplo o uso de materiais não metálicos, tais como fibras, malhas e barras poliméricas (ARCZEWSKA; POLAK; PENLIDIS, 2021; MUHAMMAD; AHMED, 2023).

Schneider (2016) aponta que a utilização de microfibras é uma das maneiras de compensar as falhas no comportamento mecânico do concreto, possibilitando melhoramento nas características mecânicas dos compósitos. Ravikumar, Ramasamy e Thandavamoorthy (2015) indicam que há melhorias na tração, flexão, módulo de elasticidade, tenacidade, entre outros e que isso faz com que seu uso esteja consolidado em estudos para vigas, lajes e pilares

Outros materiais têm ganhado destaque, tais como o concreto têxtil (ORTOLAN, 2021) e os compósitos cimentícios engenheirados (EHRENBRING, 2020). Tais materiais são reforçados com malhas têxtil e com microfibras dispersas na matriz, respectivamente, mas nenhum destes possui a aplicação semelhante às barras de aço, de modo a impactar em menor grau a produção dos elementos estruturais e as características da matriz de modo a ser compatível.

Em contraponto, ganham destaque na atualidade as barras poliméricas de reforço de elementos estruturais. As barras poliméricas reforçadas com fibras de vidro, chamadas de barras de GFRP- *glass fiber reinforced polymer*, são um material

com grande potencial de aplicação como reforço de elementos de concreto, uma vez que possuem elevado potencial de durabilidade, não susceptíveis ao dano de corrosão (JABBAR; FARID, 2018; SALEH; ASHOUR; SHEEHAN, 2019).

As barras de GFRP apesar de serem de recente presença no mercado brasileiro já são um tipo de material amplamente difundido em diversos outros países. No Canadá, Estados Unidos, Japão, Alemanha existem diversas utilizações datadas dos anos 1990 até aplicações recentes, sendo utilizados em tabuleiros de pontes, pavimentação de rodovias, tanques de armazenamento de água (ACI 440, 2015).

Diversos estudos já foram conduzidos avaliando o uso de barras de GFRP. Há possibilidades do seu emprego em um sistema de grande relevância na construção nacional, de paredes portantes de concreto armado. Mohamed *et al.*, (2013) inclusive destacam em seu estudo a capacidade de uso em paredes e ao comparar-se com o aço, as paredes reforçadas com as barras poliméricas apresentam maior capacidade de carga sem sofrer deformação residual.

Para viabilizar esse uso com segurança, no entanto, além de conhecer-se bem seu desempenho mecânico, é de fundamental importância entender o comportamento de tais barras em uma situação de incêndio.

Carvelli, Pisani e Poggi (2013) avaliaram elementos em concreto armado reforçados com barras de GFRP frente elevadas temperaturas. Segundo os autores, no patamar de aquecimento de 550 °C houve cerca de 40% de redução na resistência última devido a falha na aderência das barras com o concreto.

Spagnuolo *et al.*, (2018) afirmam, no entanto, que na faixa de temperatura compreendida entre 100 e 300 °C não há dados na tensão residual das barras, quando expostas isoladamente em elevadas temperaturas.

Isto posto, o objetivo da presente pesquisa foi contribuir com a análise de barras de GFRP, experimentalmente, avaliando as características do material em temperatura ambiente, durante e após a exposição à elevadas temperaturas, avaliando-se as barras isoladamente.

1.1 TEMA

Estudo do comportamento de barras de GFRP em temperatura ambiente, durante e após a exposição à elevadas temperaturas.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O comportamento de elementos de concreto com armadura de aço em temperatura ambiente e em elevadas temperaturas já foi estudado por diversos pesquisadores, inclusas simulações computacionais e até mesmo em escala real, conforme preconizado em norma (GIL *et al.*, 2017; MANICA *et al.*, 2020; BOLINA *et al.*, 2020).

Percebeu-se, nestes estudos, tais como o de Gil *et al.*, (2017), que não apenas as características do concreto influenciam no seu comportamento, mas também, que o reforço utilizado impacta no comportamento geral das estruturas, uma vez que influenciam na estabilidade dos elementos, na sua resistência às cargas e no efeito gerado pelo calor.

Em específico em relação ao comportamento de barras GFRP em situação de incêndio, Gooranorimi *et al.* (2018) indicaram, através de um programa experimental em lajes de concreto reforçadas com GFRP, que após 2h de exposição ao incêndio preconizado pela norma ASTM E119, a barra não apresentou danos em termos do seu comportamento estrutural. Além disso, os autores afirmaram que enquanto a temperatura do forno atingiu 1000 °C, a barra atingiu 115 °C, devido ao isolamento térmico proporcionado pelo concreto, que neste caso foi de 19 mm.

Duan *et al.* (2022) analisaram elementos contendo reforço em GFRP através de métodos computacionais e delinearam como lacuna a análise da aderência das barras durante e após a exposição ao incêndio, o que segundo os autores necessita de campanhas experimentais para seu maior atendimento.

1.3 PROBLEMA

Há impacto no comportamento mecânico das barras de GFRP, anteriormente, após e durante a exposição a elevadas temperaturas?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Avaliar o comportamento mecânico das barras de GFRP em elevadas temperaturas.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar barras poliméricas de GFRP em relação ao seu comportamento mecânico na temperatura ambiente;
- b) Avaliar o impacto no módulo de elasticidade e na resistência à tração axial em diferentes patamares de temperatura em forno durante a temperatura elevada;
- c) Avaliar o impacto no módulo de elasticidade e na resistência à tração axial em diferentes patamares de temperatura em forno após a temperatura elevada e ciclo de resfriamento;
- d) Mensurar o consumo de resina através do ensaio de teor de fibras em amostras em temperatura ambiente e após elevadas temperaturas;
- e) Avaliar microscopicamente as barras pelo ensaio de microscopia eletrônica de varredura, considerando as condições de avaliação do presente estudo.

1.5 JUSTIFICATIVA

Conhecer o comportamento mecânico frente ao incêndio em elementos estruturais e de vedação tem relação direta com a garantia dos ocupantes das edificações e do patrimônio. Considerando-se que o uso de barras de GFRP está sendo ampliado em escala global, dados seus inúmeros benefícios, um dos pontos que emerge para pesquisa é o comportamento do material frente ao fogo.

De acordo com Nigro *et al.* (2011), um dos pontos que fomenta tal análise, é o fato de que experimentalmente há indícios de que tais barras quando expostas ao incêndio reduzem suas propriedades mecânicas.

Mouritz e Gibson (2006) indicam que a maior parte dos danos à resistência e à rigidez das barras ocorre quando se excede a temperatura de transição vítrea, que usualmente encontra-se nos valores entre 65 °C e 150 °C, temperaturas consideravelmente inferiores aos valores praticados em ensaios que simulam a exposição real. Nesta temperatura (T_g), o polímero passa de um estado rígido para um estado mais elástico e viscoso, fazendo com se tenha um decréscimo na capacidade de transferência de carga entre a resina polimérica e as fibras longitudinais que compõem a barra (ZHANG; LI; WU, 2023).

Rosa *et al.* (2020) obtiveram em seu estudo uma ruptura quando a faixa de temperatura na barra estava em aproximadamente 570 °C, tendo ocorrido por tração, considerando que houve resistência entre 80 min e 150 min para as lajes reforçadas com GFRP, tendo sido avaliadas com cobertura de 25 e 35 mm. Os autores indicam que o ponto crucial é que a zona de ancoragem das barras no elemento de concreto seja protegida da ação do calor. Indicam ainda, que mesmo com o alcance da temperatura nas barras superior a T_g , ainda restou um tempo de resistência verificado no elemento como um todo.

Considerado esse cenário, tem-se o objetivo de contribuir com o estudo de barras de GFRP em fornos de menor dimensão, indicando especialmente seu impacto no módulo de elasticidade do material.

2 BARRAS POLIMÉRICAS REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO

Há diversas possibilidades de composição de barras poliméricas, variando-se tanto o tipo de reforço como o tipo de resina empregada. O presente estudo focou no uso de GFRP, ou seja, polímeros reforçados especificamente com fibras de vidro, delimitando-se a analisar tais barras com resina epóxi.

2.1 HISTÓRICO E ABRANGÊNCIA DO TEMA EM NORMAS

Estudos trazem relatos de uso de fibras em estrutura de concreto há quase 50 anos, seja para reforços ou novas construções, mesmo não havendo normas regulamentadoras para tais materiais na referida época (BANK, 2006).

Já a ACI 440 (2015) menciona que o início da utilização em grande escala de fibras ocorreu após a Segunda Guerra Mundial quando materiais, com boa relação de massa e resistência entraram em foco em função de sua utilização em aeronaves. Este mesmo viés só foi considerado no uso de estruturas de concreto na década de 1960 e tornou-se um item comercialmente disponível no fim da década de 1970. A ACI estabeleceu o comitê de estudo desses materiais em 1991. Sobre essa disponibilidade comercial das barras de FRP, Reichenbach *et al.* (2021) citam a década de 1980, afirmando ser resultado de inúmeras pesquisas conduzidas nos Estados Unidos, Europa e Japão. Em 2009, Kobraei e Jumaat (2009) citaram que o acréscimo de uso do material entre 1999-2009 se deu pela não corrosão desse tipo de reforço e pelas suas propriedades mecânicas.

Nesse contexto, Nepomuceno *et al.* (2021) destacam um acréscimo na utilização de barras de FRP nas últimas duas décadas, destacando principalmente cenário severos de exposição ambiental.

Ainda em relação ao histórico e a aplicação, vale destacar iniciativas como as do NSERC - *National Sciences and Engineering Research Council of Canada* e do MTQ, *Ministry of transportation of Québec*, que participaram de um esforço conjunto para viabilizar o uso de barras de FRP em estruturas de concreto armado. Inicialmente o estudo contou com validações em laboratório, evoluindo para aplicações em campo, de modo a validar os modelos e garantir maior confiabilidade ao produto. Tais ações foram realizadas entre os anos 2001-2003 (EL-SALAKAWY *et al.*, 2005).

No cenário nacional não existe ainda norma técnica publicada referente ao uso de barras poliméricas, mas há um documento em fase de desenvolvimento. Já no cenário internacional, percebe-se um grande avanço em relação aos documentos de referência, conforme apresenta-se na Tabela 1.

Tabela 1: Normas relacionadas ao uso de FRP

Norma	Título
ACI 440.1R15	<i>Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars</i>
ACI 440R, 1996	<i>State-of-the-art report on fiber reinforced plastic (FRP) reinforcement for concrete structures</i>
ACI 440.3R-04	<i>Guide test methods for fiber-reinforced Polymer (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures</i>
AASHTO, AASHTO.	<i>LRFD Bridge Design Guide Specifications for GFRP-Reinforced Concrete</i>
ASTM D7957M-17	<i>Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement</i>
CAN/CSA S806-12	<i>Design and construction of Building componentes with fibre-reinforced polymers</i>
CNR-DT 203/2006	<i>Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars</i>
FIB 9.3TG	<i>FRP as reinforcement in concrete</i>
GOST 31938	<i>Fiber-reinforced polymer bar for concrete reinforcement- general specifications</i>
ISIS M03-01 CANADA	<i>Intelligent Sensing for Innovative Structures</i>
ISO 10406-1:2015	<i>Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete — Test methods — Part 1: FRP bars and grids</i>
JSCE	<i>Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing material</i>

Fonte: Autor (2023)

Mohamedien, Hosny, Abdelrahman (2013) citam que diversas normas se destinam apenas aos requisitos de uso das barras de GFRP, destacando-se entre estas apenas a norma canadense e a norma indiana como as que apontam critérios de dimensionamento. Os autores ainda citam que a norma indiana conta com os seguintes capítulos: (1) escopo e fundamentos de dimensionamento (2) propriedades das barras, (3) materiais constituintes e sistemas, (4) durabilidade de sistemas com FRP, (5) uso de FRP para reforço e reparo de estruturas de concreto

armado e (6) dimensionamento de armadura de concreto com barras de FRP. O documento inclui ainda um apêndice incluindo os ensaios necessários.

A ACI 440.1-R15 (2015) apresenta além de características e premissas de dimensionamento, exemplos de cálculo e de aplicação, tal como coeficientes considerando ambientes de exposição.

Ainda no que tange a presença desses materiais em documentos oficiais, pode-se citar que o guia de dimensionamento de pontes e pavimentos do Canadá (CAN/CSAS6) inclui a possibilidade de reforço dos materiais considerando as barras de FRP, conforme citado por (EL-SALAKAWY *et al.*, 2005).

Nacionalmente, apesar de ainda não haver norma técnica, duas iniciativas devem ser citadas:

- Atuação do comitê de pesquisa CT303 - Comitê Técnico IBRACON/ABECE de materiais não convencionais para reforço de estruturas de concreto, fibras e concreto reforçado com fibras.
- Publicação de uma prática recomendada pelo IBRACON/ABECE específica para estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras (FRP), citada nesse estudo como Cardoso *et al.* (2021).

Na ABNT, conta-se com duas comissões de estudo para o desenvolvimento de normas técnicas referente à barras de FRP, sendo uma sobre dimensionamento de elementos de concreto armado com este tipo de reforço e uma para caracterização do material.

2.2 DEFINIÇÕES E APLICAÇÕES DAS BARRAS DE GFRP

Segundo Couto (2007), as barras de GFRP “*são formadas por um núcleo de fibras (minerais ou sintéticas) estiradas de elevada resistência e impregnadas por uma matriz polimérica (resina), possuindo propriedades anisotrópicas, por ter maior resistência longitudinal do que transversal*”.

As barras poliméricas de GFRP são definidas como um compósito reforçado com fibras contínuas, o que de acordo com Callister (2002) indica o padrão de comportamento do material quando submetido à tração, sendo a matriz polimérica responsável pela distribuição entre as fibras de cargas aplicadas ao material, o que pode ser visto na Figura 1.

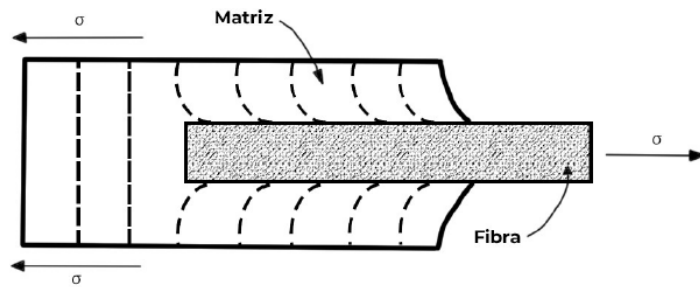


Figura 1: Padrão de comportamento da matriz quando submetida à um esforço de tração

Fonte: Callister (2002, p. 363).

De acordo com a Figura 1, tem-se uma tendência de comportamento da resina no sentido em que se solicita a fibra, nesse caso contínua, tendo possibilidade de contribuir estruturalmente com o comportamento do conjunto. A orientação da fibra, sua natureza, dimensão, geometria, assim como as características da resina irão exercer influência direta no comportamento do compósito (ACI 440.1-R15).

Para fins de comparação com outros materiais convencionalmente aplicados em estruturas, apresenta-se a Figura 2.

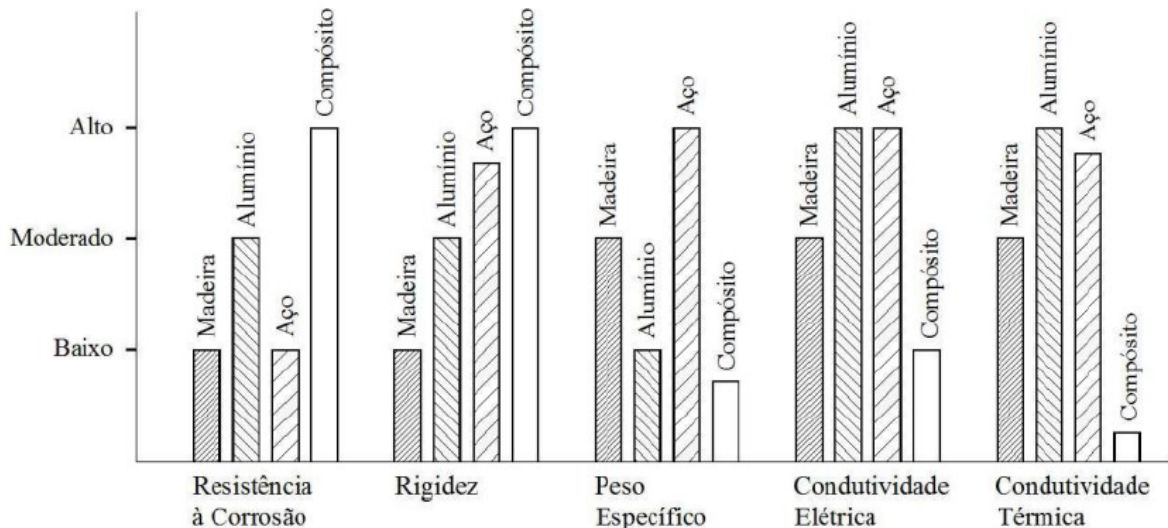


Figura 2: Comparativo dos materiais compósitos com materiais corriqueiramente empregados na construção civil

Fonte: Deutsch (1978), adaptado por Seruti (2013, p. 32).

Como é possível perceber, em termos de resistência à corrosão e rigidez o material apresenta-se superior aos demais materiais. Além disso, possui redução no peso específico e nas condutividades elétrica e térmica.

Diversos exemplos mundialmente podem ser citados sobre a aplicação de barras de GFRP. Worner (2015) apresentou a utilização do reforço em barras em uma ponte no Canadá, nominada Wotton Bridge, conforme apresenta-se na Figura 3. Essa estrutura é mista, pois conta também com reforço de aço.



Figura 3: Ponte Wotton Bridge

Fonte: Worner (2015, p. 26).

Benmokrane, Mohamed e Ahmed (2016) citam estruturas também no Canadá, conforme se apresenta na Figura 4.



Figura 4: Tabuleiro de ponte armado com barras de GFRP

Fonte: Benmokrane, Mohamed e Ahmed (2016, p. 4).

Segundo os autores diversas obras contaram com esse tipo de reforço no Canadá e são dimensionadas conforme a AASHTO LRFD. Destaca-se que seu uso se dá como reforço nos tabuleiros das pontes e estruturas de contenção. Apontam

ainda que o uso de GFRP notabiliza-se pelo atrativo financeiro ao comparar-se com outros reforços, tais como carbono e aramida.

Conforme Figura 5, além do uso das estruturas em pontes, Benmokrane, Mohamed e Ahmed (2016) mencionam que tanques de concreto para tratamento de água e esgoto também são feitos com este reforço, estruturas comumente utilizadas para armazenagem de produtos e substâncias químicas que podem favorecer a corrosão em reforços metálicos.



(a) reforço na parede



(b) visão geral do tanque

Figura 5: Utilização de GFRP em tanques de tratamento de água e esgoto

Fonte: Benmokrane, Mohamed e Ahmed (2016, p. 5).

São escopo ainda na construção de túneis, pavimentos de garagem e pavimentação de rodovias. Outros exemplos são percebidos mundialmente e no Brasil, percebe-se a utilização em armaduras de lajes, pisos industriais, entre outros.

2.3 PROCESSO PRODUTIVO E CARACTERÍSTICAS

Segundo Liu *et al.* (2021), para as barras poliméricas convencionais, o processo produtivo após a pultrusão consiste na envoltória das nervuras com direção circunferencial. Na produção, os filamentos da fibra, contínuos, são submetidos a um banho de resina, contendo ainda catalisadores e outros aditivos. (COUTO, 2007). A ACI 440R.15 (2015) cita que esse método é um dos tratamentos permitidos na superfície das barras, sendo uma estratégia para sua aderência ao concreto. A norma cita ainda a velocidade com que a pultrusão deve ocorrer, de 0,9m/min.

Reichenbach *et al.* (2021) avaliaram o mercado de produção de barras poliméricas, tendo tido um alcance inicial de 40 companhias. Dessas 40, os dados foram compilados considerando 20 fabricantes de barras poliméricas. O escopo de estudo incluiu além da Europa a Rússia e a Ucrânia, que normalmente não são consideradas nesse mercado, porém, possuem destaque na produção das barras de FRP.

Dessas, os autores puderam perceber que dentre as fibras havia fibras de carbono, vidro e basalto. Em relação à resina/matriz, tem-se a presença de acrilato, borracha de estireno butadieno, resina epóxi e resina de éster vinil. Os autores destacaram que entre os tipos de barras, destaca-se a presença de barras planas (1D) e barras em matrizes, (2D e 3D). Através da Figura 6 observam-se os resultados obtidos pelos autores.

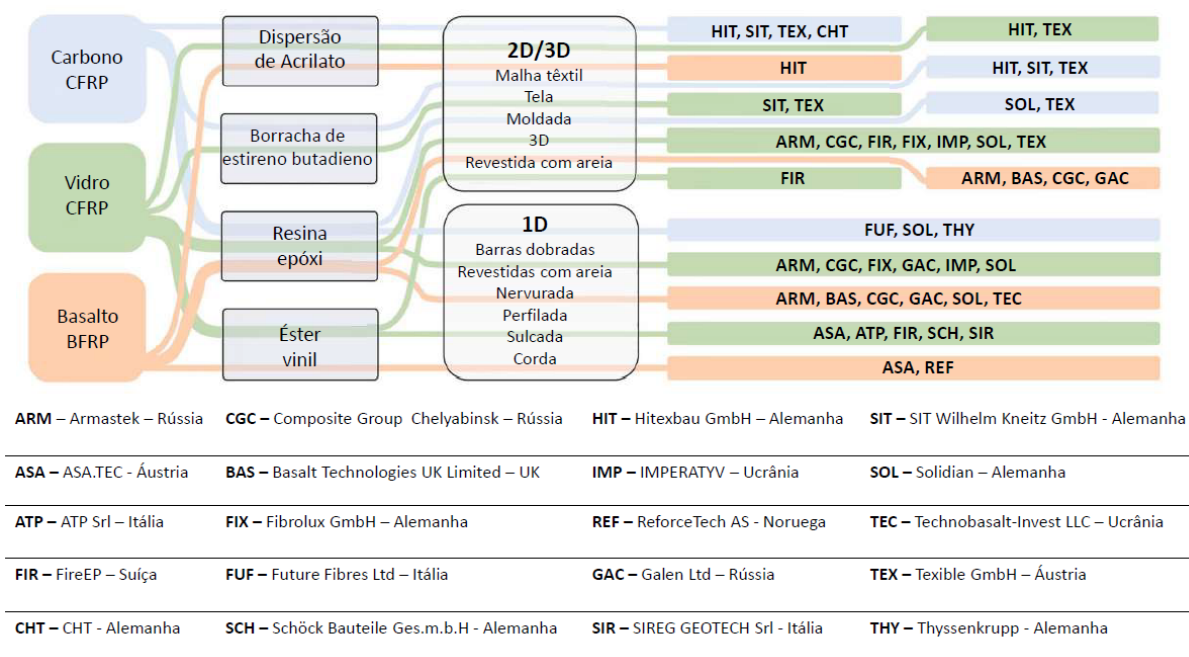


Figura 6: Variáveis no processo de produção

Fonte: Adaptado de Reichenbach *et al.* (2021, p. 3)

Os autores (REICHENBACH *et al.*, 2021) atribuem a elevada variabilidade de produtos e mescla entre processos de fabricação à ausência de uma norma que seja prescritiva em termos de tais exigências. Baseando-se em outras pesquisas, os autores contribuem ainda ao apresentar os requerimentos para que um produto possa ser escolhido como fibra e/ou matriz, conforme Tabela 2.

Tabela 2: Exigências para emprego dos materiais como fibra e resina/envoltória

Requisitos para utilização dos materiais	
FIBRA	RESINA/ENVOLTÓRIA
- Elevada resistência à corrosão ao ambiente alcalino do concreto;	- Elevada capacidade de penetração (baixa viscosidade) para garantir impregnação satisfatória.
- Elevada rigidez no estado limite de utilização;	• Alta resistência coesiva para garantir a transmissão das forças de adesão.
- Alta tensão de ruptura para garantir um anúncio de falha.	• Alta rigidez no estado curado.
- Alta resistência à fadiga.	• Alta durabilidade e suficiente resistência à temperatura.
- Competitividade financeira.	

Fonte: Adaptada de Reichenbach *et al.* (2021)

Por fim, os autores (REICHENBACH *et al.*, 2021) afirmam que o processo de produção é variado ainda em relação ao tratamento superficial aplicado nas barras, que envolvem: envoltória, lixação e criação de ranhuras nas barras. No caso de reforço têxtil, normalmente há impregnação com resina epóxi para melhor aderência.

As etapas que envolvem o processo produtivo são apresentadas na Figura 7: banho de resina, conformação da barra, aplicação das fibras helicoidais, aquecimento, cura e corte.

Em relação aos tipos de resina empregadas nas barras de GFRP, Moura, Lima e Ribeiro (2022) apresentaram as propriedades consideradas em seu estudo, sendo P referente ao uso de poliéster isoftálico, V de éster vinílico e E epóxi, descritas na Tabela 3.

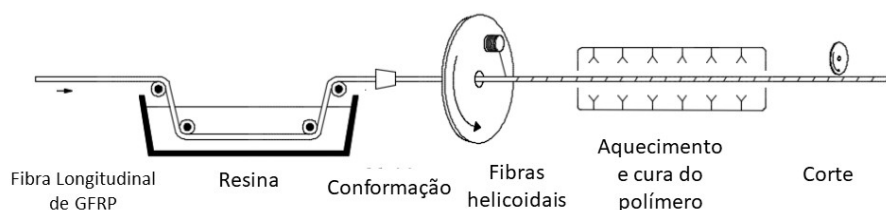


Figura 7: Processo produtivo de barras de FRP

Fonte: Adaptada de Moura, Lima e Ribeiro (2019, p.2)

Tabela 3: Propriedades de barras de GFRP com diferentes resinas

Propriedade	Método	GFRP-P	GFRP-V	GFRP-E
Densidade relativa (g/cm ³)	ASTM D792: 2020	2,1 ± 0,1	2,0 ± 0,1	1,9 ± 0,1
Teor de fibra em massa (%)	ASTM D3171:2015	82,2 ± 0,1	80,8 ± 0,1	81,2 ± 0,1
Área de seção transversal (mm ²)		134,2 ± 0,2	128,2 ± 0,3	112,7 ± 0,1
Resistência à tração (MPa)	ASTM D7205:2016	818,2 ± 10,1	844,8 ± 1,6	971,3 ± 8,6
Diâmetro da barra - db (mm)		13,1 ± 0,2	12,8 ± 0,3	12,0 ± 0,1
Largura da nervura (mm)		5,1 ± 0,1	5,3 ± 0,2	3,0 ± 0,1
Altura da nervura (mm)		1,0 ± 0,1	1,2 ± 0,2	0,8 ± 0,1
Espaçamento da nervura (mm)		18,6 ± 0,7	18,8 ± 0,7	11,7 ± 0,4

Fonte: Moura, Lima e Ribeiro (2022, p.3), traduzido pelo autor

Nesse estudo há delimitação no uso de barras com resina do tipo epóxi, que segundo o estudo dos autores apresenta a maior resistência mecânica à tração, importante para sua característica de uso como reforço. Além disso, em seu programa experimental também demonstraram que essa foi a resina que proporcionou melhor comportamento frente às elevadas temperaturas.

2.4 PROPRIEDADES E ENSAIOS EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Os próximos tópicos apresentarão as características e ensaios feitos nos elementos estruturais para validação do comportamento das barras de GFRP.

Um compilado das características físicas das barras de GFRP é apresentado na Tabela 4, baseando-se em Cardoso *et al.* (2021).

Tabela 4: Propriedades das barras de GFRP

Propriedade	Valor
Massa específica	2200 kg/m ³
Coeficiente de dilatação térmica (L)	$\alpha_f (x 10^{-6}/^{\circ}\text{C}) = 8,0$
Coeficiente de dilatação térmica (T)	$\alpha_f (x 10^{-6}/^{\circ}\text{C}) = 22$

Fonte: Adaptado de Cardoso *et al.* (2021, p. 22)

Ainda, Cardoso *et al.* (2021) apresentam as características mecânicas mínimas para barras de GFRP, conforme a Tabela 5.

Tabela 5: Características mecânicas de barras de GFRP

Propriedade	Valores mínimos
Resistência à tração (MPa)	800
Resistência à compressão (MPa)	300
Resistência ao cisalhamento (MPa)	150
Módulo de elasticidade (GPa)	50

Fonte: Adaptado de Cardoso *et al.* (2021, p. 41)

Além destas características citadas, um dos pontos importantes em relação as barras de GFRP é trazido pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE, referenciado neste estudo como Cardoso *et al* (2021). No referido documento, pontua-se a baixa adesão entre o concreto e as barras e indica-se que deve haver um revestimento superficial capaz de prover aderência mecânica, tais como entalhes, fios enrolados helicoidalmente ou impregnação externa, como por exemplo areia.

Essas possibilidades de tratamento superficial são trazidas pela ACI 440, em sua versão anterior, e apresentadas na Figura 8.

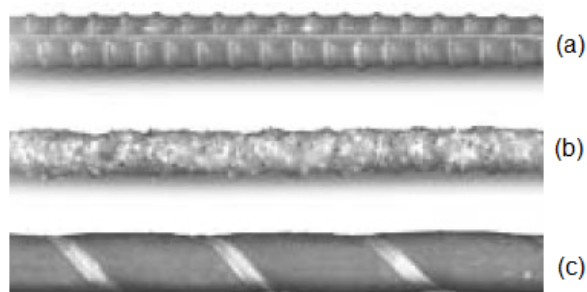


Figura 8: Formas de tratamento superficial das barras visando a aderência, sendo (a) nervuradas; (b) revestido de areia; e (c) com areia e fibras enroladas na forma helicoidal

Fonte: ACI 440- R.15 (2015, p. 15), traduzido pelo autor

Abed *et al.* (2020) analisaram diferentes diâmetros de barras de GFRP e com diferentes taxas de aplicação de carga, tendo obtido os resultados de resistência à compressão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Valores obtidos de resistência à compressão das barras

Tipo de barra	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Massa (g)	Velocidade de carga	Nº de amostras	Res à compr. (MPa)	Desvio padrão (MPa)
G0-D21	43,4	21,7	33,5	0,1	4	589	27,1
				1,0	5	553	29,0
				10,0	3	506	57,0
G0-D27	54,4	27,2	68	0,1	5	611	23,4
				1,0	5	556	47,4
				10,0	4	580	37,8
G1-D17	33,5	17,5	15	0,1	5	479	35,0
				1,0	4	511	27,4
				10,0	3	606	37,6
G1-D21	42,4	21,2	28	0,1	3	510	23,8
				1,0	5	544	23,9
				10,0	5	609	56,6
B1-D17	34,3	17,6	15	0,1	4	368	10,7
				1,0	4	388	28,1
				10,0	5	426	26,5
B1-D21	42,4	21,8	28,5	0,1	3	422	11,1
				1,0	5	452	31,5
				10,0	4	470	23,4

G0, G1 e B1 representam diferentes fabricantes, sendo 0 empregado para um deles e 1 para o seguinte. G é utilizado como abreviação para glass fiber, ou fibra de vidro, e B para basalt, ou fibras de basalto. D é utilizado como abreviação para os diâmetros empregados

Fonte: Adaptado de Abed *et al.* (2020, p. 2)

Com exceção de uma barra do grupo G1-D17, todas as barras deste grupo apresentaram resistência à compressão superior à 500MPa. Os autores pontuam que não foi percebida flambagem em nenhuma das barras. O menor valor entre as barras foi percebido dentre as amostras do fabricante B1, com fibras de basalto, tendo apresentado 368 MPa de resistência à compressão.

Nacionalmente, Cardoso *et al.* (2021) indicam a consideração em projeto de que as barras apresentam resistência característica à compressão de 300MPa, devendo, para utilização de valores superiores serem realizados testes comprobatórios.

Na Figura 9 o comportamento em relação às tensões e deformações de diferentes materiais de reforço é apresentado por Dalfré, Mazzú e Ferreira (2020), baseando-se no apresentado pelo FIB Bulletin 90.

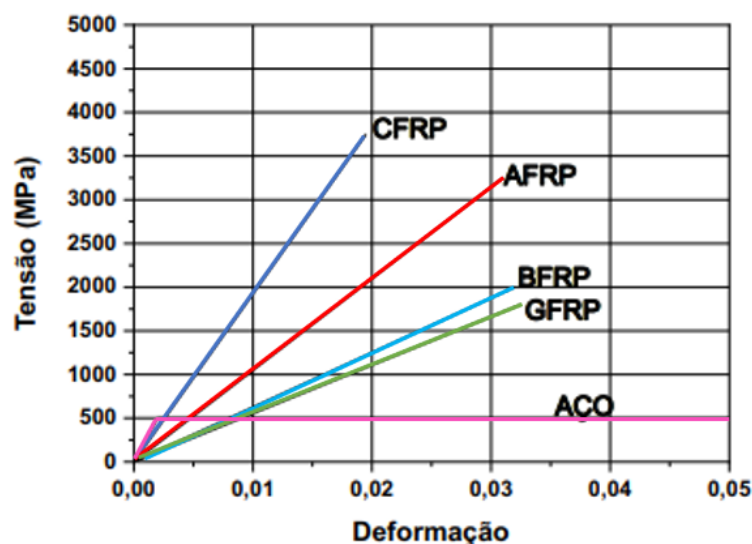


Figura 9: Tensão x deformação de diferentes matérias-primas de FRP
 Fonte: Dalfré, Ferreira e Mazzú (2020, p. 73), adaptado de FIB Bulletin 90

As autoras pontuam que o comportamento das barras é considerado elástico linear e frágil ao atingir toda sua capacidade resistente. Indicam ainda duas formas de ruptura que podem ocorrer no material, baseando-se no que é apresentado pela ACI 440.R1, de 2015, sendo:

- Ruptura da barra: devido ao não escoamento da barra, rompe bruscamente;
- Esmagamento do concreto: mais recomendada, uma vez que pode-se contar com o comportamento plástico do concreto anteriormente a sua ruptura.

Conforme Cardoso *et al.* (2021), os mecanismos que podem comprometer a durabilidade de barras de FRP são:

- Ação da água: através da absorção da água pode haver plastificação ou hidrólise da matriz, sendo pontuado que tais danos são passíveis de ocorrência em temperaturas superiores a 60 °C;
- Cloretos: A imersão salina pode conduzir a absorção de água e causar os danos já citados;

- Álcalis: Há deterioração em ambientes com pH entre 11,5 e 13, sendo que medidas podem ser tomadas de modo a reduzir a possibilidade de dano no interior do concreto, como concretos com menor teor de hidróxido de cálcio e uso de fibras álcali-resistentes, por exemplo;
- Exposição a raios ultravioletas: se houver exposição ao sol de modo intenso, pode haver degradação do polímero;
- Efeitos de temperatura: em relação à temperatura, objetivo de análise do presente estudo, os autores pontuam:

“As características das barras de FRP dependentes da matriz são influenciadas significativamente pela temperatura, sobretudo quando estas atingem valores superiores à temperatura de transição vítrea (T_g) da matriz polimérica, quando a matriz sofre transformações físicas e químicas importantes. Temperaturas elevadas também favorecem a degradação da interface e a absorção de umidade. Desse modo, o uso de barras de FRP não é recomendado para estruturas sem proteção cuja integridade dependa da resistência a altas temperaturas”. Cardoso et al. (2021, pg. 20)

Cunha (2019) propôs-se a avaliar a aderência das barras e analisar comparativamente com premissas de norma. Os resultados obtidos pela autora comprovaram que quanto maior o comprimento de ancoragem, maior a força de arrancamento. Ainda, que a força de aderência cresce com o aumento do diâmetro.

Tal comportamento é conflitante com que foi obtido por Lu *et al.* (2021), Saleh, Ashour e Sheehan (2019) e Lee *et al.* (2017) que citam que a resistência de aderência aumenta quanto menor for o diâmetro da barra. Isso se dá ao fato de haver a presença de água na zona de transição entre a matriz e o reforço, diminuindo a seção de contato da barra com o concreto e conseqüente redução das forças de atrito.

Teixeira (2018), ao analisar comparativamente vigas de concreto armadas com aço e FRP, observou que o comportamento desse segundo tipo é afetado pelo valor reduzido de módulo de elasticidade. Além disso, o comportamento estrutural varia em decorrência do aspecto superficial das barras. A autora ainda informa que

maiores taxas de armadura foram capazes de melhorar o comportamento dos elementos em relação à flexão e ao cisalhamento.

Cabe salientar, no cenário de caracterização dos materiais e seu comportamento que diferentes ensaios microestruturais podem ser realizados para análise das barras, da sua interface com o concreto, ou ainda, sua deterioração através da exposição à agentes de danos, ensaios mecânicos, térmicos, entre outros, destacam-se as técnicas de MEV (microscopia eletrônica de varredura) (GOORANORIMI *et al.*, 2018) e FTIR (Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier) (MOURA; RIBEIRO; LIMA, 2019) com intuito verificar possíveis danos causados pelo agentes agressivos na morfologia do material quanto na composição química da resina avaliada.

El-Hassan e El Maaddawy (2019) realizaram estudo teórico com compilado das propriedades microestruturais de barras poliméricas, destacando entre as técnicas de análise TGA (análise termogravimétrica), FTIR, calorimetria, MEV, análise da tração e absorção de umidade. Os autores pontuam a necessidade de investigar-se, em diversos cenários, o efeito na microestrutura das barras, considerando sua relevância no comportamento geral.

Gooranorimi *et al.* (2018) avaliaram microestruturalmente diferentes configurações de barras poliméricas, sendo: superfície com nervuras, superfície revestida de areia fina e fibras helicoidais, fibra dupla torcida e revestida com areia grossa. Os autores perceberam que cada tipo de barra demonstrou um comportamento exclusivo, único de defeitos e vazios desconectados ao longo da seção transversal, o que atribuíram a diferentes características do processo produtivo, tais como, velocidade de tração, temperatura dos insumos, tempo de cura e composição.

Moura, Ribeiro e Lima (2019), de modo semelhante, avaliaram diferentes materiais, sendo fibras de vidro impregnadas com resina de éster vinil (VE) e resina isoftálica (ISO). Ambas as composições tinham teor de fibra de vidro de 75% em peso e foram fabricados pelo processo de pultrusão. Os autores empregaram as técnicas de MEV e FTIR após a exposição das barras em ambiente alcalino (ALK) e ambiente natural (NAT). Na Figura 10 é apresentada a degradação sofrida pelas barras após a exposição aos agentes de dano, denotando para falhas superficiais e descontinuidade da resina. Os autores perceberam degradação também da fibra de vidro.

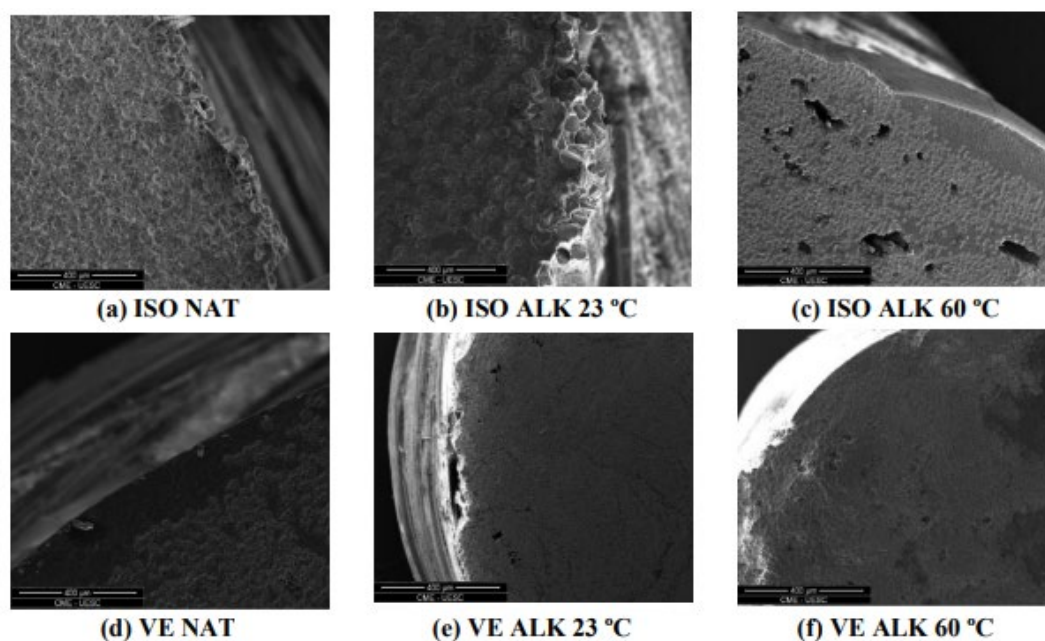


Figura 10: Análise de MEV em barras de GFRP em diferentes condições

Fonte: Moura, Ribeiro e Lima (2019, p. 6)

Em relação à técnica de FTIR, os autores destacaram que com um aumento da temperatura de cura das amostras pode ter aumentado a reação de hidrólise na matriz polimérica. Para essa análise, os autores se atentaram à relação entre íons OH/CH, sendo os OH formados na ocorrência da hidrólise.

2.5 EFEITO DA TEMPERATURA EM BARRAS DE GFRP

De acordo com Carvelli, Pisani e Poggi (2013), o ponto chave quando se trata da resistência ao fogo não é a reação das barras ao fogo, em si, mas a capacidade estrutural mesmo diante de uma grande variação de temperatura.

Chowdhury *et al.* (2011) apresentaram (Figura 11) a relação entre a temperatura e as propriedades mecânicas de reforços compostos de FRP, apresentando o conceito de temperatura crítica.

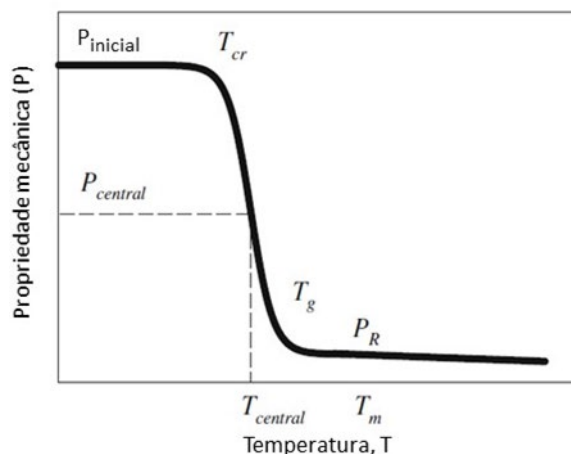


Figura 11: Relação entre as propriedades mecânicas e a temperatura em barras de FRP

Chowdhury *et al.* (2011, p. 1069), traduzido pelo autor

Segundo os autores, nenhuma alteração é percebida até que se alcance a temperatura crítica (T_{cr}). Após esse ponto, percebe-se um decaimento proporcional ao incremento de temperatura, até o alcance da T_g , temperatura de transição vítrea, com impactos na resina. Após, tem-se a temperatura de derretimento da resina (T_m), com a resistência residual da barra (P_r).

A temperatura crítica, de acordo com Wang e Kodur (2005) é determinada como aquela na qual as barras têm metade de sua resistência mecânica inicial, conforme orientado pela CSA-S806. No seu estudo, os autores indicaram para as barras de GFRP uma temperatura crítica de 325 °C.

Segundo Hajiloo, Green e Gales (2018), a temperatura crítica deveria considerar, no entanto, a retenção de 25% da capacidade mecânica, o que é, segundo os autores, o parâmetro considerado para dimensionamento. Considerando esse percentual de resistência residual em relação à temperatura ambiente, os autores citam a temperatura crítica de 400 °C.

Segundo Wang e Kodur (2005), até a temperatura de 350 °C, as barras tendem a reter até 90% da sua capacidade mecânica.

Os próximos capítulos apresentarão estudos realizados em barras isoladamente, e estudos realizados com as barras imersas em matriz de concreto, indicando seu comportamento frente às elevadas temperaturas.

2.5.1 Estudos em barras isoladas

Inicialmente, é pertinente destacar o preparo para o ensaio em barras isoladas, que pode envolver a fixação das barras em tubos de ancoragem, como citam Wang e Kodur (2005) e apresenta a Figura 12. Essa preparação garante que diante de ensaios de tração, por exemplo, as barras não sofram esmagamento com as garras das prensas hidráulicas, protegidas pelo tubo de aço usado para ancoragem.

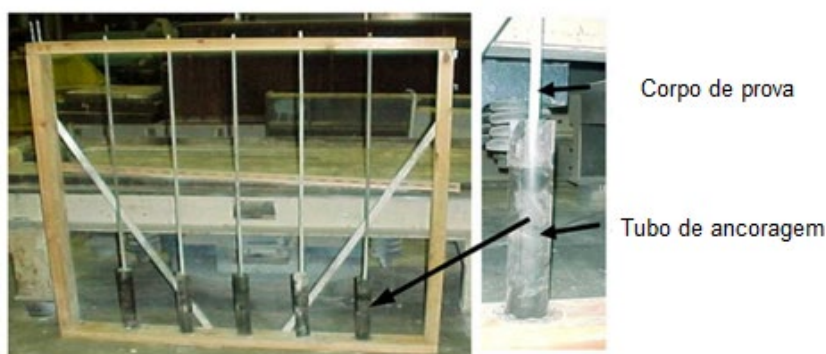


Figura 12: Tubo de ancoragem e corpo de prova

Fonte: Wang e Kodur (2005, p. 3), traduzido pelo autor

Hajiloo, Green e Gales (2018) indicam que o comportamento mecânico das barras de FRP tem relação direta com características da sua composição, tais como tipo de resina, tipo de fibras e proporções entre os materiais, o que indica que testes devem ser realizados sempre que possível a fim de obter um comportamento assertivo.

Nos próximos itens são apresentados estudos que avaliaram as barras após exposição em elevadas temperaturas e durante a exposição em elevadas temperaturas.

2.5.1.1 Estudos em barras após a exposição em elevadas temperaturas

Teixeira (2018) avaliou o teor de fibras de barras em forno de pequenas dimensões do tipo mufla, com temperatura de análise de até 600 °C, considerando as premissas da norma ASTM D297-13. Segundo a autora, essa temperatura é empregada para que, após tal ponto, permaneçam apenas as fibras, havendo

derretimento completo da resina, e assim, validar-se os percentuais de cada componente. Na ocasião, a autora constatou pequenos desvios entre os teores informados pelos fabricantes e o validado em ensaio. Esse ensaio é realizado apenas para fins de caracterização das barras, e para obter-se indícios sobre seu comportamento, mas não é possível com seu emprego aferir sobre a resistência ao calor e as elevadas temperaturas.

A faixa de temperatura empregada por Kashwani e Al-Tamimi (2014) foi de até 350 °C, sendo essa considerada a temperatura crítica pelos autores. Foram aplicados testes de tração com três diferentes taxas de aplicação de carga. Os autores perceberam que o efeito da temperatura nas barras provocou uma redução de até 32% na tensão, notando ainda um incremento na ductilidade do material.

Feng *et al.* (2022), baseando-se em outros estudos, apresentam que a resistência à tração decai rapidamente para temperaturas de exposição superiores à 300 °C, citando aqui que acima de 500 °C há perda considerável da capacidade portante, complementando os resultados apresentados anteriormente.

Enquanto os estudos anteriores de Kashwani e Al-Tamimi (2014) indicaram a 350 °C uma retenção de 68% da resistência à tração. O estudo de Bisby, Green e Kodur (2005) aponta para esta faixa, uma resistência residual à tração de aproximadamente 40% para barras de CFRP e 30% para GFRP e AFRP.

Ainda em relação as barras de GFRP submetidas isoladamente em elevadas temperaturas, Spagnuolo *et al.* (2018) apresentam graficamente a expansão verificada pelo elevado coeficiente de dilatação térmica das barras, Figura 13.

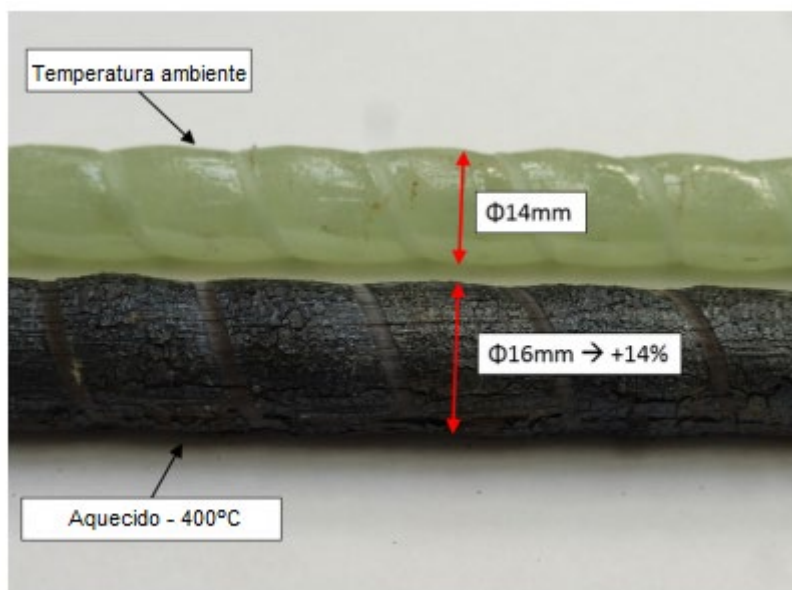


Figura 13: Demonstração do efeito da exposição em 400 °C das barras
Spagnuolo *et al.* (2018, p. 16)

Também em relação ao apresentado na Figura 13, tem-se uma contribuição de Moura, Lima e Ribeiro (2022) que indicam o comportamento das barras nos patamares de 150 °C e 300 °C, respectivamente, na Figura 14.

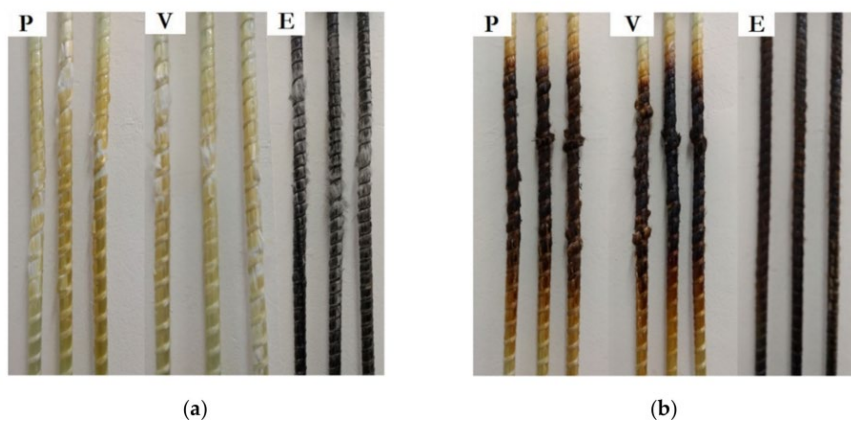


Figura 14 - Comportamento das barras em (a) 150 °C e (b) 300 °C
Moura, Lima e Ribeiro (2022, p. 11)

Segundo os autores, no patamar de 150 °C, percebe-se uma alteração de cor inicial nas barras, devido ao alcance da temperatura de transição vítrea. Mudanças mais severas na coloração são vistas na exposição aos 300 °C.

Cabe destacar que Moura, Lima e Ribeiro (2022) também pontuaram que mesmo na exposição em temperaturas de 150 °C, 300 °C e 350 °C, as barras continuaram apresentando regime elástico, mesmo que tenham perdido sua capacidade portante.

Bazli e Abolfazli (2020) citam que o mecanismo de perda de resistência mecânica das barras de FRP consiste no derretimento das resinas, que deixam de atuar como uma ponte conectando diferentes fibras (longas, mas não contínuas, como citado por Wang e Kodur (2005)), o que faz com que as fibras falhem individualmente, levando à perda de resistência e à ruptura.

Os autores apontam o comportamento das barras, indicando a diferenciação em termos do comportamento das fibras. Os autores destacam que a temperatura moderada foi próxima da temperatura de transição vítrea, enquanto a temperatura extrema foi situada próxima a temperatura de derretimento da resina. A forma de ruptura verificada no estudo pode ser observada na Figura 15.

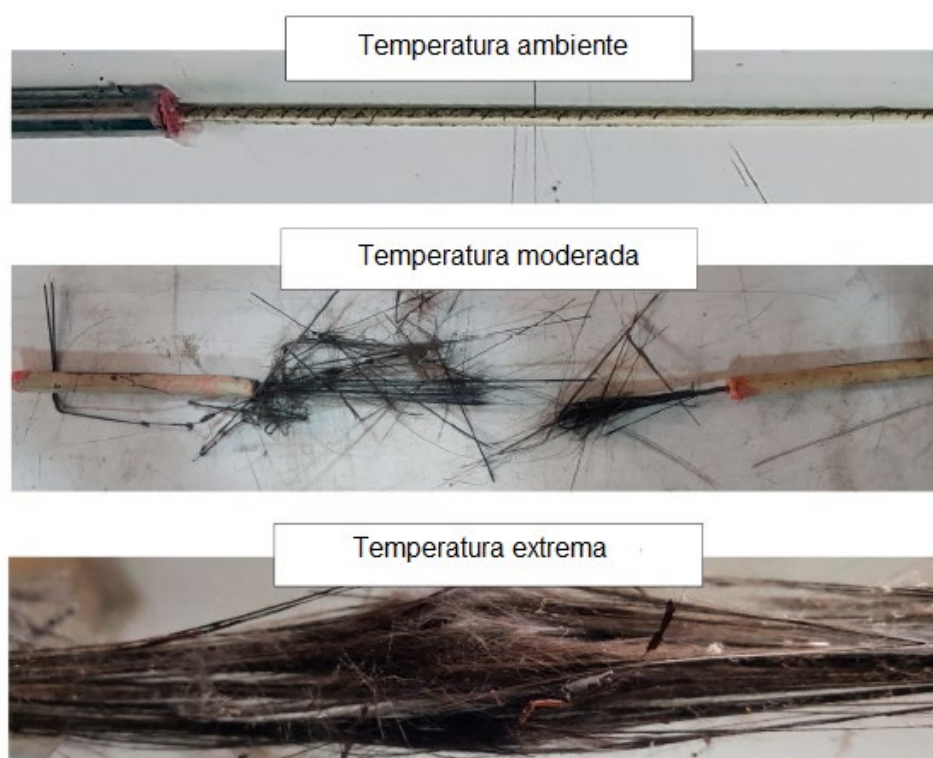


Figura 15: Modo de fratura convencional de barras de GFRP em elevadas temperaturas

Fonte: Bazli e Abolfazli (2020, p.4), traduzido pelo autor

Hamad, Johari e Haddad (2017) baseando-se na temperatura crítica de 325 °C, indicaram que há, nessa temperatura de exposição um decaimento de 30% no módulo de elasticidade.

Fu, Zhao e Li (2011) apresentaram o efeito visual das barras após exposição às elevadas temperaturas (Figura 16), mensurando ainda o impacto em suas propriedades mecânicas. Valores obtidos de comportamento mecânico em diferentes diâmetros e exposição em elevadas temperaturas (Tabela 7).

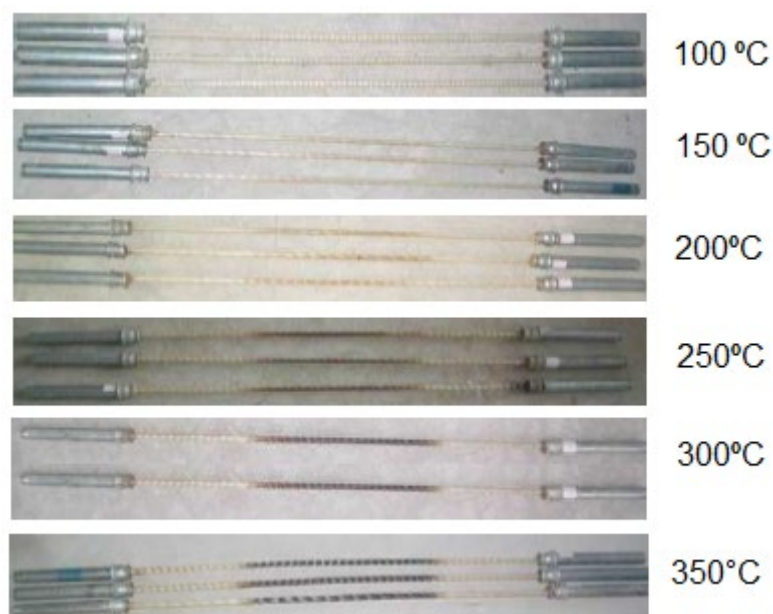


Figura 16: Aparência das barras após exposição
Fonte: Adaptada de Fu, Zhao e Li (2011, p. 351)

Tabela 7: Valores obtidos de propriedades mecânicas em diferentes diâmetros e exposição em elevadas temperaturas

Diâmetro	Temperatura	Carga máxima média (kN)	Tensão limite média (MPa)	Média do Módulo de Elasticidade (GPa)
10	20	26,86	342,1	22,33
	100	26,86	342,1	27,51
	150	27,18	346,29	27,12
	200	33,02	420,68	28,5
	250	27,96	356,18	24,32
	300	26,65	339,47	21,08
	350	25,46	324,33	17,8
12	20	63,1	558,18	24,11
	100	67,54	597,53	23,76
	150	54	477,75	21,97
	200	41,72	369,03	25,68
	250	55,74	493,06	25,9
	300	68,44	605,46	25,12
	350	45,69	412,14	18,7

Fonte: Fu, Zhao e Li (2011, p. 352)

Conforme o estudo dos autores, o maior prejuízo em termos de comportamento mecânico nas barras de 10 mm de diâmetro ocorreu aos 350 °C, sendo de 5,2% para a tensão limite e de 20,2% para o módulo de elasticidade. Em algumas temperaturas, percebeu-se melhoria nas propriedades mecânicas, sendo mais acentuada a melhoria aos 200 °C, de aproximadamente 23% para a tensão limite e de 28% para o módulo de elasticidade.

As barras de 12 mm por sua vez apresentaram um comportamento diferente. Em relação à tensão média, os ganhos se deram nas temperaturas de 100 e 300 °C. Para o módulo, houve efeito positivo nas temperaturas de 200, 250 e 300 °C.

2.5.1.2 Estudos em barras durante a exposição em elevadas temperaturas

Wang, Wong e Kodur (2003) realizaram um programa experimental envolvendo barras de diferentes diâmetros e submetidas a temperaturas variadas, no intervalo entre 20 e 700 °C, conforme sintetiza a Tabela 8.

Os autores indicaram que as barras foram aquecidas até a temperatura desejada, foi mantida a estabilização por aproximadamente 30 min e aplicado o esforço mecânico. A instrumentação dos autores é apresentada na Figura 17.

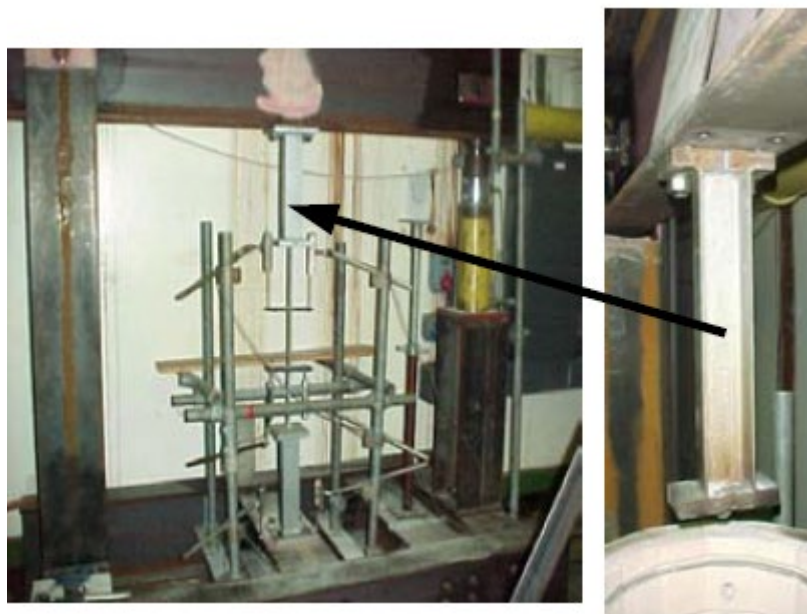


Figura 17: Instrumentação adotada para aquecimento e ensaio mecânico

Fonte: Wang, Wong e Kodur (2003, p. 134)

Tabela 8: Detalhamento do programa experimental

Tipo de amostra	Número de testes (x) temperatura (°C)
9,5 mm, GFRP	3x20, 2x100, 2x250, 3x350, 2x500
12,7 mm, GFRP	2x20, 2x100, 2x200, 2x300, 2x400, 2x500
9,5 mm, CFRP	2x20, 2x100, 2x200, 4x400, 2x600
10 mm aço	2x20, 2x100, 2x200, 2x400, 3x600
15 mm aço	2x20, 2x100, 2x300, 2x500, 2x700

Fonte: Adaptado de Wang, Wong, Kodur (2003, p.134)

Dentre os resultados obtidos pelos autores, pode-se destacar:

- As amostras tiveram ruptura ao longo da barra e não na ancoragem, demonstrando a validação da fixação da amostra;
- Os autores reportaram que houve derretimento da resina em temperatura próxima de 500 °C;
- Os valores obtidos nos testes duplicados indicaram uma diferença menor do que 10%. A diferença se torna maior em decorrência de maiores temperaturas, provavelmente causada pela resina;
- Quando há decomposição da resina, o comportamento mecânico da fibra depende da ligação entre as mesmas e da sua continuidade;

- e. Há indícios de que a aplicação das barras possa ser limitada à temperatura de 350 °C;
- f. Até 400 °C, há pouca redução no módulo de elasticidade, mantendo aproximadamente 90% do seu valor original. Após esse valor, o patamar de redução é mais acentuado, mantendo apenas 30% da resistência inicial à tração.
- g. Os autores informam que há uma redução da resistência à tração em barras de CFRP à zero em cerca de 500 °C e nas barras de GFRP isso ocorre aproximadamente em 550 °C.

O estudo de Wang, Wong, Kodur (2003) apontou acima de 400 °C, uma manutenção de 30% do módulo de elasticidade.

No estudo experimental de Wang e Kodur (2005), os autores apresentaram as curvas de tensão e deformação das barras poliméricas durante exposição em elevadas temperaturas, conforme ilustrado na Figura 18.

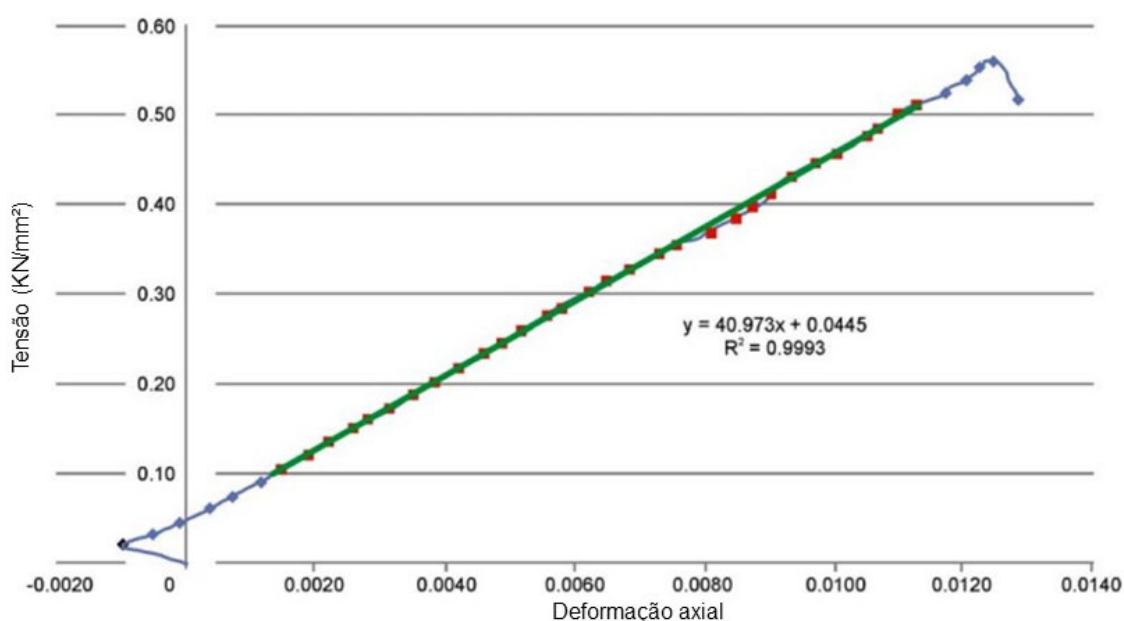


Figura 18: Gráfico de tensão deformação de barras de GFRP, com 9,5 mm de diâmetro à 100 °C

Fonte: Wang e Kodur (2007, p. 6), traduzido pelo autor

É possível perceber uma distorção inicial no gráfico obtido. De acordo com os autores, essa distorção inicial para o quadrante negativo da aplicação de carga é decorrente de uma falha na instrumentação da barra no dispositivo de ensaio.

Todavia, tal erro pode ser desconsiderado uma vez que o módulo é obtido como a tangente da inclinação da reta obtida, cujo coeficiente de correlação foi elevado.

Os autores apontam, de acordo com valores médios obtidos em 5 exemplares por temperatura de exposição, a variação do módulo de elasticidade (considerando sua retenção em relação à temperatura ambiente), Figura 19.

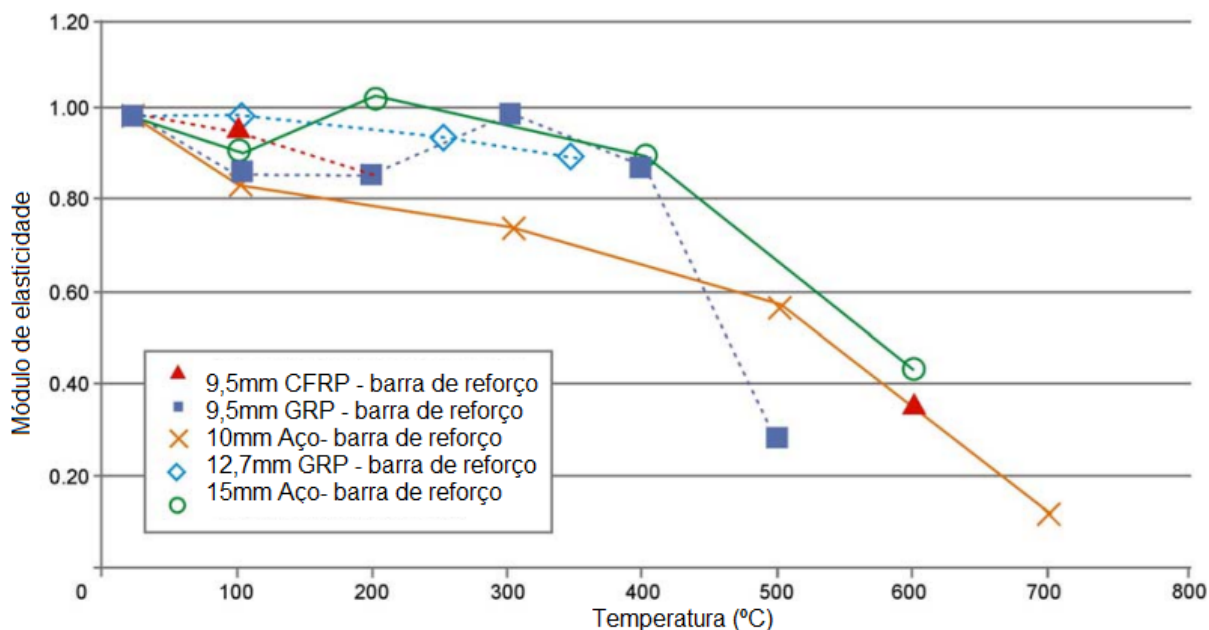


Figura 19: Variação no módulo de elasticidade conforme a temperatura para barras de FRP e de aço

Fonte: Wang e Kodur (2005, p. 8), traduzido pelo autor

Como é possível perceber, até a temperatura de 350 °C, percebe-se que há uma menor variação nas propriedades mecânicas. Após 400 °C, percebe-se um decaimento significativo, chegando, na temperatura de 500 °C a menos de 30% de retenção do valor inicial.

Wang e Kodur (2007) apontam que tal deterioração decorre do fato da resina apresentar perdas mecânicas e por consequência, considerando que as fibras podem sofrer pela falha da resina, pode haver perda de aderência entre segmentos das fibras e prejuízo no seu comportamento mecânico.

É importante destacar que a temperatura de 300 °C chegou a proporcionar um incremento no módulo de elasticidade em relação ao percebido nas faixas de 100 °C e 200 °C.

Pode-se perceber, também, que houve menor impacto na barra de 9 mm do que na barra de 12,5 mm. Segundo os autores, barras de maior diâmetro tendem a apresentar maior queda nas propriedades mecânicas, pois pode-se atribuir uma maior presença de resina em maiores diâmetros.

Até a temperatura de 350 °C, as amostras curadas sob mesma temperatura apresentaram menor variação dos resultados, de até 10%. Após essa temperatura a variação se deu de forma mais significativa entre as amostras.

Zhou *et al.* (2022) avaliaram as barras durante e após a exposição em elevadas temperaturas. Os autores aplicaram patamares de temperatura variando da temperatura ambiente e de 100 °C à 400 °C, considerando barras com diâmetro de 8 e de 12 mm.

Os autores apresentam a variação no módulo de elasticidade das barras durante e após a exposição em elevadas temperaturas, Figura 20, e ainda, apresentam a comparação desse valor obtido numericamente, Figura 21.

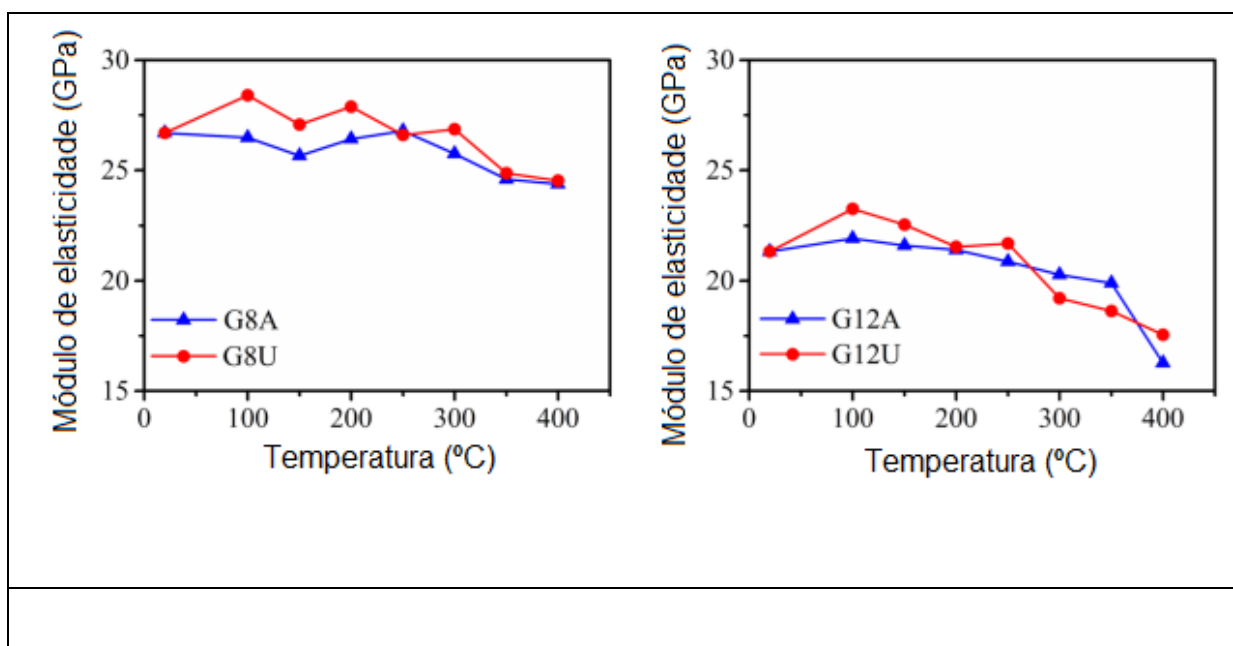


Figura 20: Variação do módulo de elasticidade durante (U) e após elevadas (A) temperaturas para (a) barras de 8 mm e (b) barras de 12 mm

Fonte: Zhou et al. (2022, p. 9), traduzido pelo autor

Como é possível perceber, as barras de 8 mm apresentaram um comportamento variável, com picos de elevação do módulo, porém, com decaimento em geral ao elevar-se a temperatura de exposição. Entre as temperaturas de 300 e

400 °C nota-se uma maior queda, considerando a situação durante e após a exposição.

As barras de 12 mm apresentaram comportamento com pequena variação em relação ao módulo após as elevadas temperaturas. Para ao mesmo diâmetro de barra ocorreu uma maior variação durante a exposição às elevadas temperaturas.

De modo geral, as barras de 8 mm apresentaram comportamento superior tanto inicialmente, quanto em relação à exposição nas elevadas temperaturas e após tal exposição.

Os autores concluíram que o módulo de elasticidade das barras foi menos impactado pela exposição à temperatura do que a resistência à tração, atribuindo ao módulo uma maior contribuição das fibras.

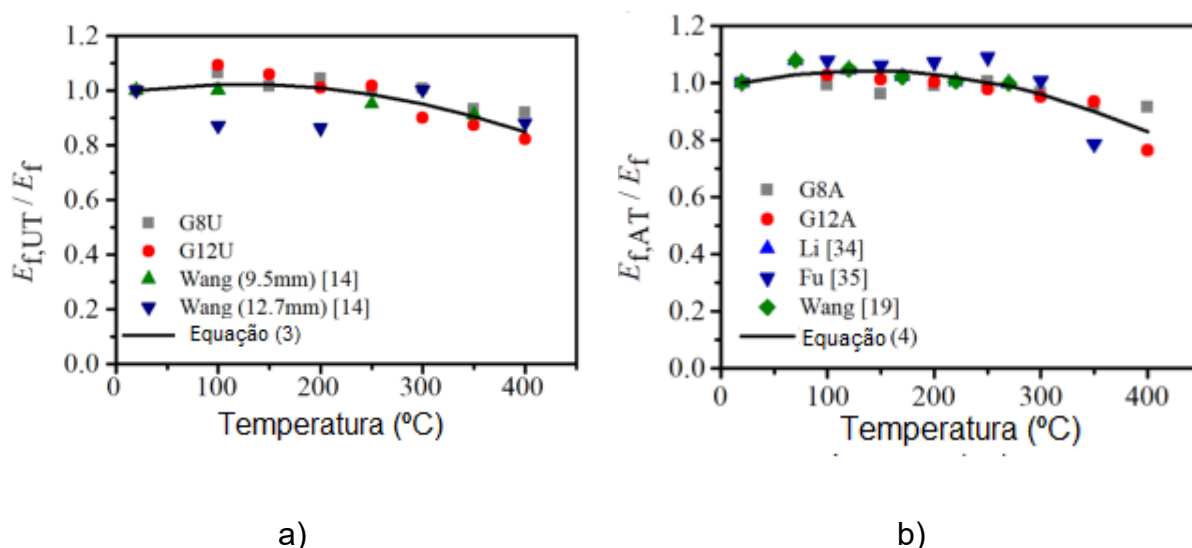


Figura 21: Resultados obtidos – Relação entre o módulo de elasticidade obtido experimentalmente e calculado (a) durante (U) e (b) após (A) elevadas temperaturas

Fonte: Zhou *et al.* (2022, p. 10), traduzido pelo autor

Em relação aos resultados obtidos experimentalmente e através de cálculo, notou-se uma semelhança e boa correlação entre os dois, considerando-se tanto o módulo de elasticidade durante as elevadas temperaturas quanto após a exposição.

A variação do módulo de elasticidade durante exposição às elevadas temperaturas também foi um objeto de análise para Wang e Zha (2011). Os valores obtidos pelos autores são apresentados graficamente na Figura 22.

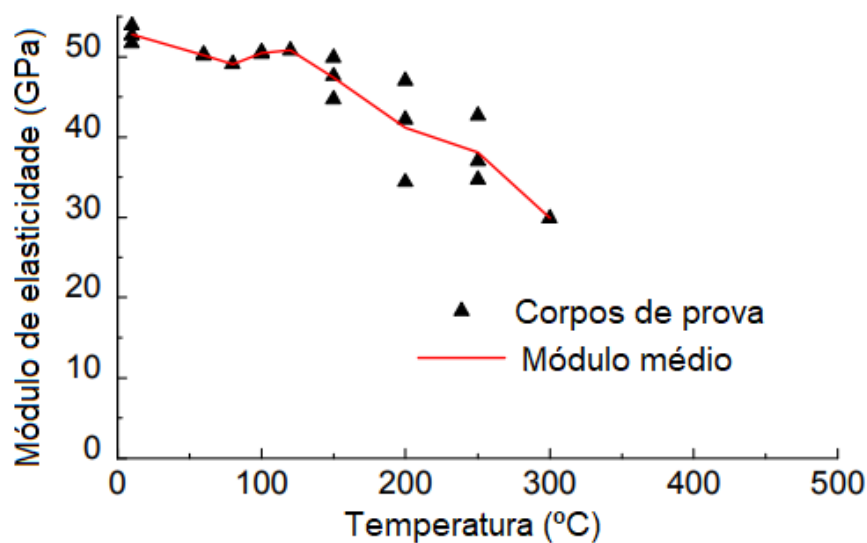


Figura 22: Resultados de módulo de elasticidade durante exposição em elevadas temperaturas

Fonte: Wang e Zha (2011, p.3593)

Pode-se perceber pela Figura 22 que até o patamar de 150 °C a alteração no módulo de elasticidade foi inferior ao que ocorre após essa temperatura. Segundo os autores, o módulo permaneceu praticamente inalterado até que se alcançou a temperatura de transição da resina epóxi. Desse ponto em diante a redução foi inversamente proporcional ao acréscimo de temperatura.

Wang, Wong e Kodur (2007) indicam que o módulo de elasticidade de barras de GFRP permaneceu praticamente inalterado até a faixa de temperatura de 300-400 °C, apresentando, após essa faixa, um degrau no valor do módulo.

Para facilitar a análise do efeito das barras em elevadas temperaturas, tem-se síntese na Figura 23.

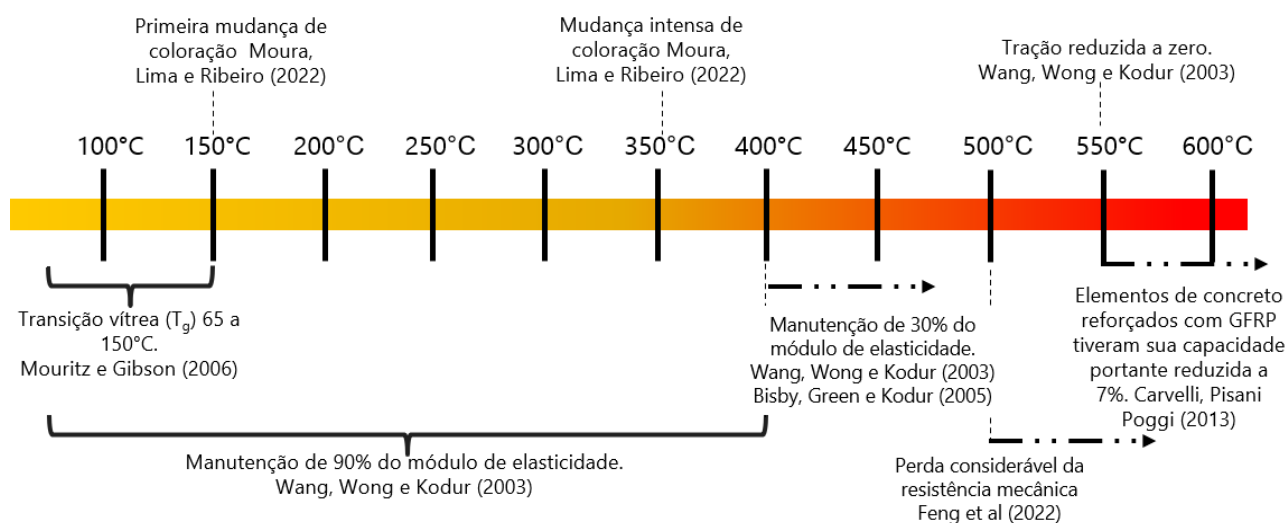


Figura 23: Efeito da temperatura nas barras

Fonte: Elaborada pelo autor conforme as referências citadas

2.5.2 Ensaios de barras inseridas em elementos de concreto

O estudo conduzido por Bisby, Green e Kodur (2005) apresenta uma análise do comportamento de fibras e de barras reforçadas com fibras com base em diversos estudos que submetem estes materiais à temperatura, variando de 0 a 600 °C. Os autores citam que o comportamento das barras nestas condições é regulado pela matriz polimérica uma vez que as fibras são mais resistentes a ação da temperatura.

O estudo de Robert e Benmokrane (2010) indica a temperatura de 980 °C como aquela em que se iniciam os danos mecânicos nas fibras e não apenas na resina em seu interior.

O desempenho, em percentual retido, da resistência à tração e módulo de elasticidade de diferentes tipos de fibras sob influência de temperatura é apresentado por meio da Figura 24. Já, através da Figura 25, é apresentado o comportamento de barras compostas por estas mesmas fibras.

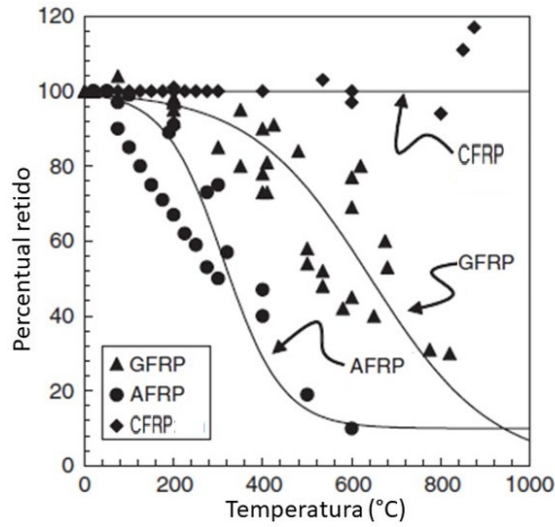


Figura 24: Comportamento de diferentes fibras submetidas a elevadas temperaturas

Fonte: Adaptado de Bisby, Green e Kodur (2005, p. 138)

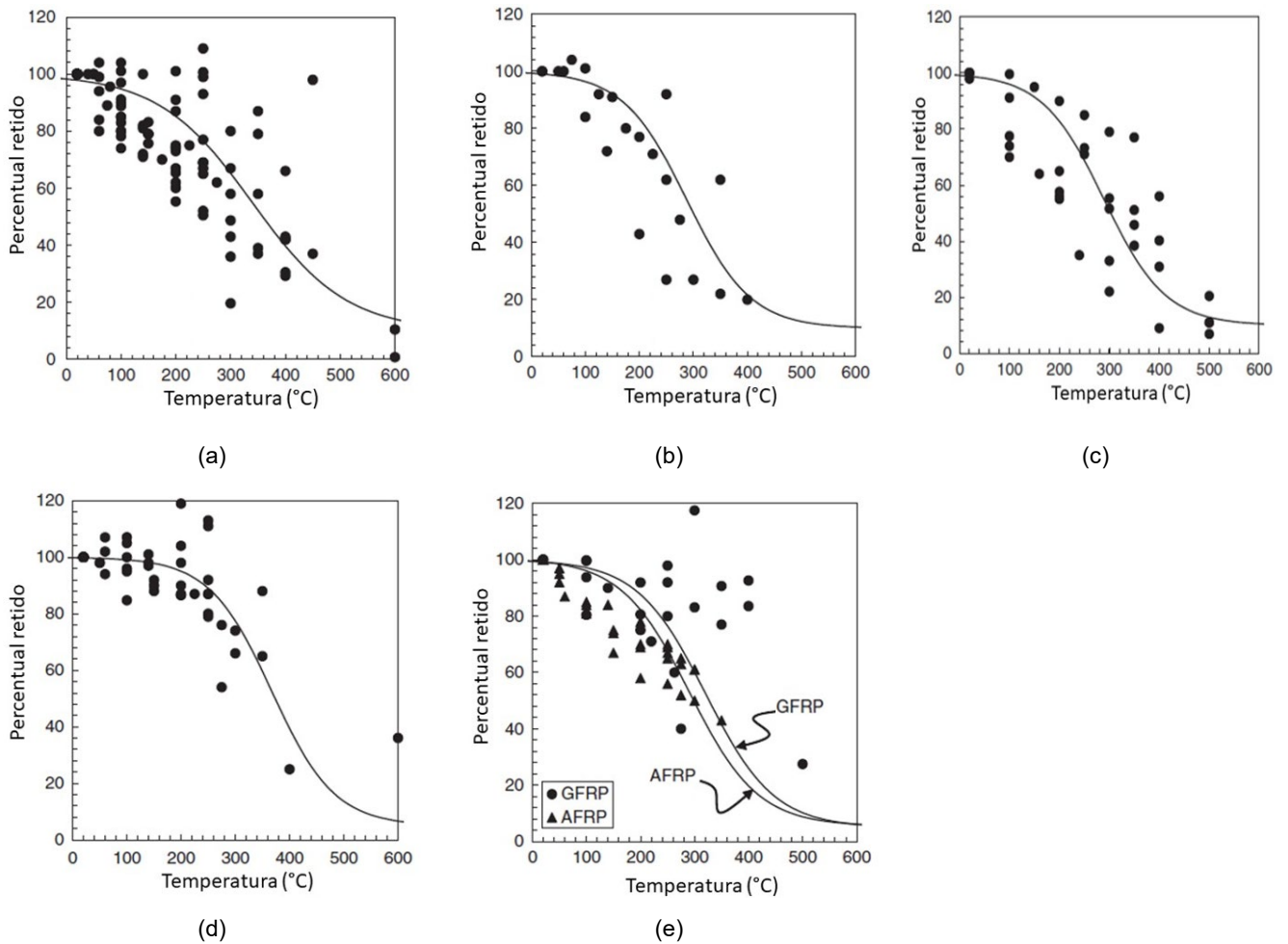


Figura 25: Comportamento à tração de barras de FRP em diferentes temperaturas a)

CFRP b) AFRP c) GFRP e módulo de elasticidade d) CFRP e e) GFRP e AFRP

Fonte: Adaptado de Bisby, Green e Kodur (2005, p. 139)

Masmoudi *et al.* (2009) optaram pela análise das barras em temperaturas mais amenas, simulando casos reais de clima seco e temperaturas variadas. Além disso, avaliaram as barras inseridas em elementos de concreto armado, com resistência à compressão de aproximadamente 30 MPa. As temperaturas adotadas foram de 20, 40, 60 e 80 °C, tendo sido mantidas por 4 meses em uma câmara de ensaios acelerados. Uma síntese dos resultados obtidos pelos autores é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9: Valores obtidos de aderência nas diferentes temperaturas

Temperatura	Aderência média (MPa)	
	16 mm (GFRP)	8 mm (GFRP)
20 °C	11,01 ± 0,25	14,37 ± 0,40
40 °C	10,87 ± 0,36	14,27 ± 1,04
60 °C	10,64 ± 0,15	14,11 ± 0,75
80 °C	9,50 ± 0,27	13,02 ± 0,22

Fonte: Adaptado de Masmoudi *et al.* (2009, p .204)

Como é possível perceber, considerando as barras de maior diâmetro, a redução foi de até 13,7% e esse valor foi de 9,3% nas barras de menor diâmetro. Em ambos os diâmetros de barra os valores obtidos apresentaram relação inversamente proporcional entre temperatura de exposição e valor obtido de aderência.

Masmoudi, Zaidi e Gérard (2005) analisaram a relação entre o diâmetro das barras imersas no concreto e o cobrimento adotado nos elementos, percebendo que quando a relação cobrimento/diâmetro é superior a 1,9 considera-se suficiente para que o elemento em questão resista a danos até uma temperatura de 80 °C.

Partindo para maiores temperaturas de exposição, tem-se o estudo de Carvelli, Pisani Poggi (2013), que analisaram o uso de barras de GFRP em elementos em concreto para pontes afirmam em seu estudo que a capacidade de carga após o aquecimento em 550 °C reduziu para 7%. A carga última após 550 °C para barras dobradas, no entanto, reduziu para 40%, o que foi atribuído ao descolamento das barras da matriz. No referido estudo, o deslocamento do concreto ocorreu em temperatura aproximada de 230 °C, prejudicando a aderência das barras, sendo este um dano provocado pela matriz cimentícia e que ocorreria igualmente para barras de aço.

Nigro *et al.* (2011) analisaram elementos em forno de exposição com curva de aquecimento conforme a ISO 834-1 e verificaram a distribuição de temperatura ao longo de barras de GFRP, considerando que uma área das barras estava exposta diretamente ao incêndio. De acordo com os autores, as barras apresentaram reduzida condutividade térmica, que foi confirmado por simulações computacionais no mesmo estudo, o que fez que variassem os valores medidos em relação ao local de exposição da amostra no forno de ensaio.

Gooranorimi *et al.* (2018) analisaram através de um ensaio em escala real em forno somado a ensaios mecânicos a temperatura de transição vítrea de barras de GFRP e comparados com barras não expostas às elevadas temperaturas. O estudo avaliou lajes expostas a altas temperaturas, sendo que na superfície das barras a temperatura de exposição foi de 115 °C.

Através da Tabela 10 apresentam-se os valores de temperatura de transição vítrea obtidos pelos autores em amostras sãs e em amostras após a exposição em elevadas temperaturas. Sendo GFRP-A uma barra de fibra de vidro com revestimento de areia e ranhuras helicoidais e GFRP-C barra de fibra de vidro com acabamento de superfície similar ao da barra de aço.

Tabela 10: Valores de temperatura de transição vítrea

Tipo de barra	T ^P _G (normal)			T ^F _G (Após exposição ao fogo)			Relação T ^F _G / T ^P _G
	Número de amostras	Valor médio (°C)	Coef. de variação (%)	Número de amostras	Valor médio (°C)	Coef. de variação (%)	
GRFP-A	3	81,1	16,6	3	119,3	5,9	1,47
GFRP-C	3	107,0	7,9	3	133,5	1,9	1,25

Fonte: Adaptada de Gooranorimi *et al.* (2018, p. 7)

Como apresenta-se na Tabela 10, para as duas barras avaliadas pelos autores, houve um valor superior na temperatura de transição vítrea após a exposição em elevadas temperaturas. Os autores pontuam que este acréscimo pode ter sido causado por uma cura tardia da resina em elevadas temperaturas, o que parece ter favorecido as duas barras, com valores de 47 e 25% superiores à condição normal.

3 METODOLOGIA

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desta pesquisa envolveu a exposição de barras de GFRP, à elevadas temperaturas para verificação das alterações em suas propriedades mecânicas e microestruturais. A exposição ocorreu em um grupo de amostras anteriormente aos ensaios mecânicos e no outro grupo durante a realização dos ensaios mecânicos (exposição à temperatura concomitantemente). O fluxograma da Figura 26 apresenta as etapas da pesquisa, destacando na cor amarela os ensaios feitos para cada etapa. A descrição é apresentada no item 3.2.

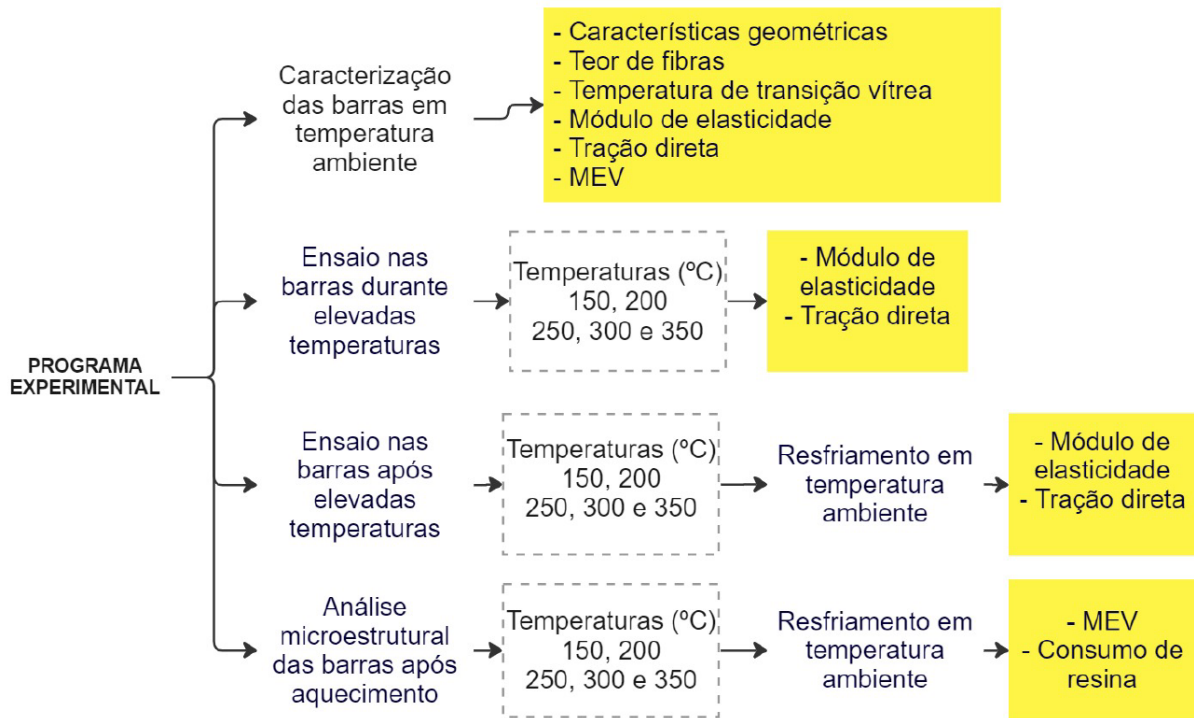


Figura 26: Etapas do programa experimental

3.2 MATERIAIS

Os próximos itens apresentam as propriedades dos materiais empregados na presente pesquisa.

3.2.1 Barras de FRP

As barras utilizadas na pesquisa são compostas por fibras de vidro e resina polimérica de base epóxi com ranhuras helicoidais e diâmetro nominal de 8 mm. Para preparo das barras, seguiu-se o mesmo procedimento de Wang e Kodur (2005) já apresentado, com inserção em tubos circulares de aço. Para garantir a centralização das barras durante a cura da resina empregada, a montagem dos corpos de prova foi feita de acordo com a Figura 27, com o uso de um gabarito de madeira, Figura 28.

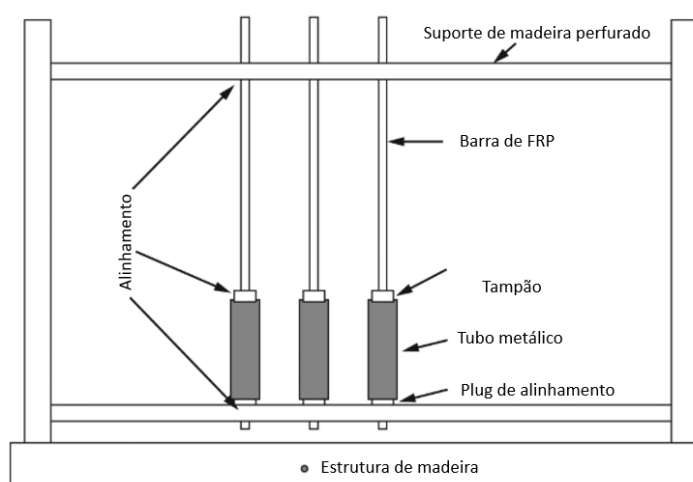


Figura 27: Gabarito de montagem para amostras de resistência à tração e módulo de elasticidade.

Fonte: Adaptada de ASTM D7205/D7205M-21 (ASTM, 2021, p. 13)

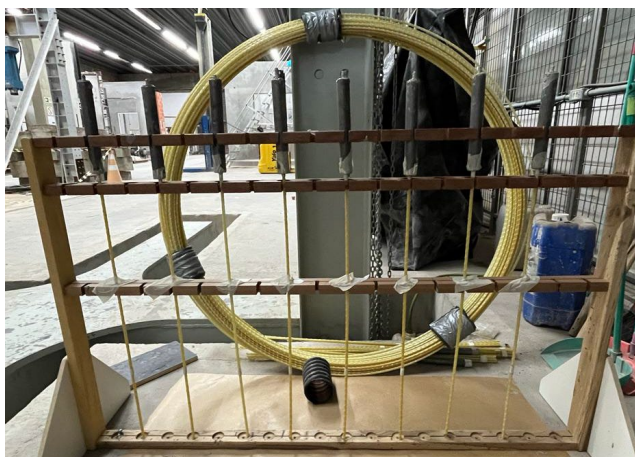


Figura 28: Gabarito para confecção das amostras e fornecimento das barras em rolos

3.2.2 Resina e tubos de aço

A resina utilizada para fixação das barras nos tubos de ancoragem foi a Sikadur 32. Trata-se de um adesivo para fins estruturais, a base de resina epóxi, bicomponente. A resina é fornecida em embalagens de 1 kg, e tem um tempo de uso de 45 min, respeitado na confecção das barras do presente estudo. Conforme dados do fabricante, a cura inicial da resina se dá com o prazo de 24 horas e final de 7 dias. O prazo de 7 dias foi respeitado como premissa de cura para todos os ensaios.

Os tubos de aço empregados para a fixação das barras foi do tipo Schedule 40, diâmetro externo de 26,7 mm e diâmetro interno de 20,93 mm.

3.3 MÉTODOS DE ENSAIO

Os métodos de ensaio seguidos no estudo são apresentados nos próximos itens. Conforme fluxograma apresentado na Figura 26, os ensaios foram feitos para caracterização das barras em temperatura ambiente, seguidos do grupo de ensaios mecânicos para as barras durante o aquecimento e após o aquecimento e resfriamento.

3.3.1 Diâmetro efetivo e densidade

O diâmetro efetivo e a densidade foram determinados conforme as recomendações de Cardoso *et al.* (2021), seguindo-se a ASTM D792:20.

Para calculado da densidade das barras, seguiu-se as equações 1 e 2.

$$sp\ gr\ 23/23^{\circ}C = \frac{a}{a - b} \quad \text{Equação 1}$$

$$D^{23^{\circ}C} = sp\ gr\ 23/23^{\circ}C \cdot 997,5 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

sp gr 23/23°C = densidade relativa

a = massa seca ao ar, em g

b = massa completamente submersa em água, em g

D^{23°C} = densidade, em kg/m³

997,5 = densidade da água a 23 °C, em kg/m³

Para o diâmetro efetivo foram empregados 5 corpos de prova. A condição de ensaio foi de temperatura de 22 ± 2 °C e umidade relativa do ar de 50 ± 5 %. Empregou-se paquímetro digital para medição do comprimento do trecho de barra, além de balança e balança hidrostática. Conforme o procedimento orientado, o cálculo do diâmetro nominal seguiu as equações 3, 4 e 5.

$$V = \frac{(a/1000)}{D^{23c}} \quad \text{Equação 3}$$

$$A_{ef} = \frac{V}{(C_{med}/1000)} \quad \text{Equação 4}$$

$$\emptyset_{ef} = 2 \sqrt{\frac{A_{ef}}{\pi}} \times 1000 \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

V = volume do exemplar, em m³;

C_{med} = comprimento médio do exemplar, em mm;

A_{ef} = área efetiva, em m²;

∅_{ef} = diâmetro efetivo, em mm;

O cálculo previsto por Cardoso *et al.* (2021) é apresentado na Equação 6.

$$d = \sqrt{\frac{4(m_1 - m_2)}{\pi \times \rho \times l}} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

m₁ e m₂: valores de massa da amostra em temperatura ambiente e em água, respectivamente (mg);

ρ: densidade da água em mg/ mm³, considerando como 1;

l: comprimento da amostra em mm

3.3.2 Determinação da temperatura de transição vítrea

O ensaio foi realizado pelo Lapol/UFRGS para determinação de temperaturas de transição e entalpias de fusão e cristalização de polímeros por calorimetria

diferencial de varredura, seguindo as premissas da ASTM D 3418:21. Essa técnica foi antecedida pela técnica de análise termogravimétrica, para definição da faixa de temperatura para DSC, conforme a ASTM E 1131:20.

Foi empregado o equipamento DSC Q20, da TA Instruments. Para o ensaio, utilizou-se aproximadamente 5 mg de amostra. Em relação aos parâmetros de ensaio, contou-se com: aquecimento de -80 °C a 200 °C sob taxa de 10 °C/min, resfriamento de 200 °C a -80 °C sob taxa de 10 °C/min, e segundo aquecimento de -80 °C a 200 °C sob taxa de 10 °C/min. Fluxo de gás nitrogênio (N₂) de 50 mL/min.

3.3.3 Aquecimento

As amostras foram submetidas a temperatura a partir da exposição em forno elétrico acoplável à máquina universal de ensaios. O aquecimento foi realizado até obtenção da temperatura desejada e então as amostras foram mantidas neste patamar por 30 minutos. Benmokrane *et al.* (2021) também mantiveram a amostra por 30 minutos para que houvesse o equilíbrio da temperatura em todo o exemplar. Este mesmo procedimento de manutenção da amostra sob influência da temperatura de interesse por 30 minutos foi adotado por Hamad, Johari e Haddad (2017) e Wang, Wong e Kodur (2007). A temperatura foi verificada através de um termopar acoplado ao forno de ensaio e indicada através de um monitor do controlador programável. Não foram registradas outras temperaturas internas, devido ao pequeno diâmetro e as peculiaridades da instrumentação (impossibilidade de instalação do termopar, pois o forno é vedado com exceção do encaixe da barra).

Para as amostras nas quais considerou-se o ensaio em elevadas temperaturas, foi mantido o patamar de temperatura por 30 min, após realizados os ensaios de módulo de elasticidade e resistência à tração, conforme descreve-se a seguir.

Para as amostras nas quais considerou-se o ensaio após as elevadas temperaturas, após 30 min, encerrava-se o patamar de exposição em elevadas temperaturas, abria-se o forno para resfriamento natural em temperatura ambiente e os ensaios de módulo de elasticidade e de tração eram conduzidos após 3 dias.

Através da Figura 29 apresenta-se o forno aberto, indicando o posicionamento da barra. Após cada ciclo de aquecimento, registrou-se visualmente as amostras, de modo a notar-se quaisquer alterações no aspecto superficial da

barra, assim como, características de coloração, delaminação ou outros. As barras expostas em cada temperatura são apresentadas no capítulo de resultados.

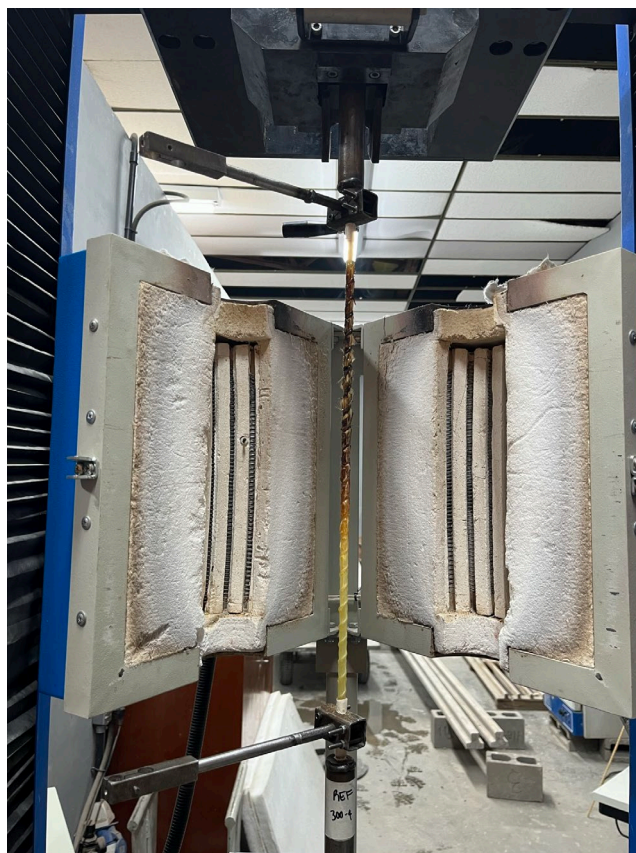


Figura 29: Acoplamento do forno à máquina universal de ensaios

Os ensaios descritos a seguir foram realizados tanto nas amostras em temperatura ambiente como durante e após o aquecimento aqui descrito.

3.3.3 Determinação do teor de fibras pelo método da combustão

O ensaio foi realizado conforme método proposto por Cardoso *et al.* (2021) com a confecção de 5 amostras por condição. As amostras podem conter comprimento variado, todavia devendo ficar dentro de uma faixa de massa de 2 a 10 g. Para realização deste ensaio foram utilizados os seguintes equipamentos e materiais: cadinho de porcelana, balança analítica, mufla, dessecador e estufa. Primeiramente deve ser registrada a massa do cadinho limpo e seco em ambiente com temperatura de $20 \pm 5^\circ\text{C}$, posteriormente o cadinho deve ser levado a estufa em 20°C por 10 minutos e sua massa deve ser novamente registrada e verificar se houve constância de massa entre as pesagens. Havendo constância deve-se

registrar tal valor como m_1 , em gramas, caso contrário, o procedimento deve ser repetido até observação desta condição. Continuamente a isso, cada amostra deve ser disposta em um cadinho, individualmente, e levada a estufa em $105\text{ }^\circ\text{C}$ até obtenção de constância de massa. O conjunto deve resfriado em dessecador até que atinja temperatura ambiente e então o valor da massa deve ser registrado como m_2 , em gramas. O conjunto então deve ser acomodado em uma mufla em $625\text{ }^\circ\text{C}$ até a constância de massa, novamente o conjunto deve ser disposto em um dessecador até que atinja temperatura ambiente e novamente pesado e sua massa registrada como m_3 .

Após estes procedimentos e os valores aplicados na Equação 07, são determinados os valores dos teores de fibra presentes em cada amostra.

Por meio da Figura 30 sintetizam-se as etapas do ensaio.



Figura 30: Amostras avaliadas – Etapas de exposição em mufla e amostras no dessecador

$$M_{fibra} = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100$$

Equação 7

Onde:

m_1 = massa do cadinho seco, em g

m_2 = massa do cadinho seco mais amostra, em g

m_3 = massa do cadinho mais amostra após exposição em mufla, em g

Esse ensaio foi utilizado em temperatura ambiente, para fins de caracterização das barras empregadas e realizado após a exposição nas temperaturas de 150 °C, 200 °C, 250 °C, 300 °C e 350 °C. Após a exposição à temperatura, o ensaio não foi conduzido para determinação do teor de fibra, que é constante para diferentes condições de exposição, mas para mensurar-se o consumo de resina em relação a uma barra em situação ambiente, estimando-se assim, indiretamente, o efeito da temperatura sobre a resina.

3.3.4 Resistência à tração e módulo de elasticidade

O ensaio foi realizado com base na ASTM D7205-M (ASTM, 2021) com taxa de deformação de $0,01 \text{ min}^{-1}$ com confecção de cinco amostras por condição.

As barras de GFRP tiveram suas pontas protegidas por tubos de aço que garantiram o correto posicionamento nas garras de fixação do equipamento de ensaio. A união entre a barra de FFRP e o tubo metálico foi feita com a utilização de adesivo estrutural, conforme descrito. A não execução da proteção das pontas da barra resulta no esmagamento da amostra pelo equipamento de ensaio.

Ainda no que tange à proteção com tubos metálicos, Cardoso *et al* (2021) apresenta os comprimentos mínimos a serem empregados nos referidos tubos. Para barras de 4 a 10 mm, é recomendado que o comprimento de ancoragem seja de 250 mm, todavia, devido ao tamanho do forno utilizado para aquecimento das barras e o comprimento máximo da amostra comportado pelo equipamento de ensaio, o comprimento de ancoragem adotado nesse estudo foi de 200 mm.

Quanto à instrumentação para aquisição de dados de alongamento das barras avaliadas, foi utilizado um transdutor de deslocamento variável linear (*Linear Variable differential transformer – LVDT*). Devido à elevada temperatura empregada nos ensaios de exposição, houve a necessidade de construção de prolongadores que mantivessem este equipamento externo ao forno utilizado. Apresenta-se pela Figura 31 o esquema de montagem dos equipamentos para realização dos ensaios.



Figura 31: Instrumentação de ensaio

Em parte dos gráficos de módulo de elasticidade, o comportamento foi anômalo, obtendo-se inicialmente uma inclinação para o quadrante negativo da deformação. Isso também ocorreu no estudo de Wang e Kodur (2005), podendo decorrer da instrumentação ou do comportamento das barras.

Para que esse comportamento não influenciasse o cálculo do módulo de elasticidade, adotou-se um procedimento conforme sintetiza-se a seguir:

- A inclinação da reta foi calculada entre três intervalos de aplicação de carga, e baseando-se nisso, a inclinação da reta foi obtida nesses três pontos;
- Adotou-se como valor de módulo de elasticidade a média entre os três valores obtidos;
- Percebeu-se que a variação entre os três pontos de análise a variação permaneceu em todas as amostras com valor inferior a 5,61%.

De modo a garantir a segurança no decorrer do ensaio e a integridade dos equipamentos de medição, especificamente no ensaio após a exposição em temperatura de 350 °C, o LVDT foi mantido até a ruptura em apenas uma das amostras. Nas demais, o equipamento foi retirado quando se alcançou

aproximadamente 50% da carga de ruptura adaptando-se a obtenção do módulo de elasticidade neste cenário, procedimento também realizado por Wang e Zha (2011), pelas mesmas razões.

3.3.5 Microscopia eletrônica de varredura

Para realizar a análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), a amostra foi previamente seca em estufa por aproximadamente 24 horas a uma temperatura de 45°C. Para registro das imagens, as amostras foram metalizadas com o uso de ouro. Ampliações de 59x até 4.000 vezes foram usadas para a análise. O objetivo foi identificar possíveis alterações superficiais nas barras e o consumo de resina decorrente da exposição em elevadas temperaturas. O equipamento para o MEV pertence ao Itt Fuse - Instituto Tecnológico em Segurança Funcional, da marca Zeiss.

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos no presente estudo são apresentados nesse capítulo, iniciando-se pela caracterização da barra em temperatura ambiente e apresentando na sequência os efeitos após e durante exposição em elevadas temperaturas em forno.

4.1 CARACTERIZAÇÃO EM TEMPERATURA AMBIENTE

Os próximos tópicos apresentarão a caracterização das barras em temperatura ambiente.

4.1.1 Diâmetro efetivo e densidade

Os valores obtidos de comprimento e de medida de massa das barras são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Valores de comprimento e de massa das barras

Amostra	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Lmédio (mm)	Massa seca (g)	Massa imersa em água (g)
1	114,33	114,32	114,39	114,35	8,997	4,513
2	114,4	114,3	114,39	114,36	8,948	4,393
3	114,32	114,26	114,32	114,30	9,035	4,546
4	114,21	114,25	114,32	114,26	8,975	4,446
5	114,22	114,31	114,28	114,27	8,936	4,423

De posse dos valores da Tabela 11, foram calculadas as variáveis apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: Valores obtidos de diâmetro efetivo e densidade

sp gr 23/23°C	D ^{23°C} (kg/m ³)	V (mm ³)	A _{ef} (mm ²)	Ø _{ef} (mm)
2,01	2001,23	4495,74	39,32	7,08
1,96	1959,31	4566,92	39,93	7,13
2,01	2007,67	4500,25	39,37	7,08
1,98	1976,72	4540,35	39,74	7,11
1,98	1975,11	4524,31	39,59	7,10

Com os dados apresentados na Tabela 12 é possível obter a densidade em 23 °C, média, de 1984,01 kg/m³ e o valor do diâmetro efetivo médio de 7,10 mm.

Em termos de área nominal, os valores obtidos apresentaram-se de forma inferior ao limite mínimo de área, que para barras de diâmetro nominal de 8 mm seria de 47,3 mm² (CARDOSO *et al.*, 2021). Tekle, Khennane e Kayali (2016) citam que é comum que existam pequenas diferenças entre os valores informados comercialmente e os obtidos através do ensaio, e que há dependência do tipo de tratamento superficial adotado para as barras.

A densidade obtida no presente estudo apresentou-se inferior ao indicado por Cardoso *et al.* (2021) de 2200 kg/m³. Moura, Lima e Ribeiro (2022) apresentam que para barras de GFRP com resina do tipo epóxi, como no presente estudo, o valor de densidade é de 1,9 ± 0,1 g/cm³, concordando assim, com os resultados obtidos. Há de se considerar que a densidade tem relação com o tipo de resina empregada na envoltória das fibras, sendo, segundo os autores, a resina epóxi aquela que apresenta menor massa específica nas barras (ao comparar-se com poliéster e éster vinil). Em específico sobre a densidade das resinas, Abedini *et al.*, (2017) apresentam a densidade específica da resina epóxi entre 1,2 e 1,3 g/cm³, com seu valor máximo sendo inferior aos valores máximos das resinas já citadas (poliéster e éster vinil).

4.1.2 Temperatura de transição vítrea

Os gráficos obtidos no ensaio de temperatura de transição vítrea são apresentados nas Figura 34, Figura 35 e Figura 36.

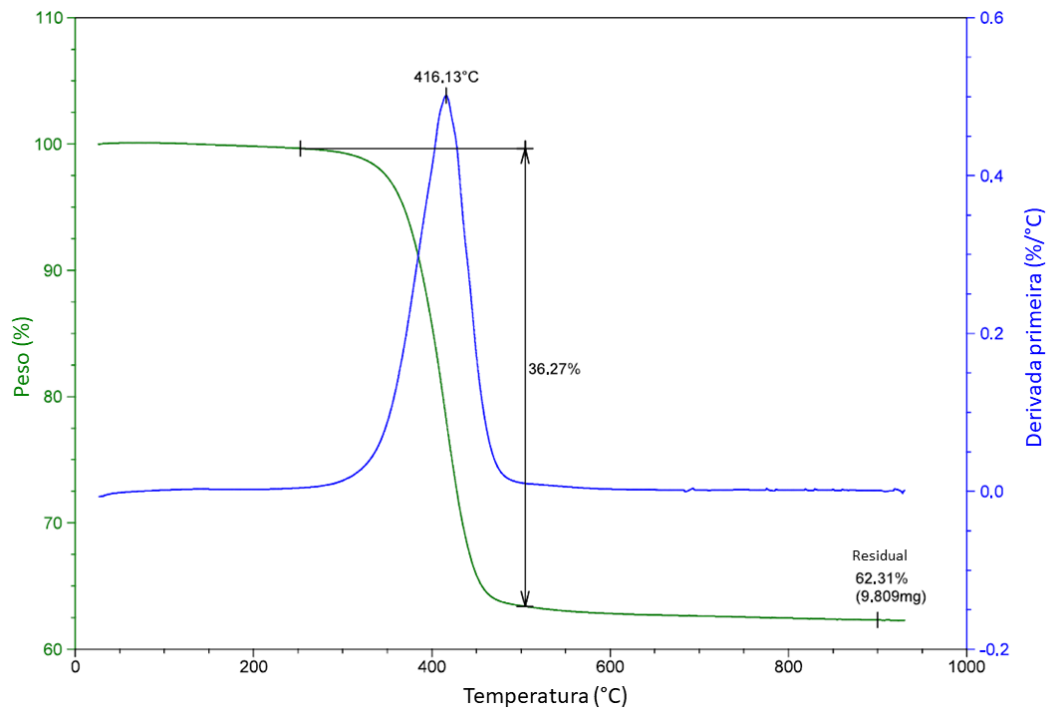


Figura 32: Gráfico obtido no ensaio de análise termogravimétrica

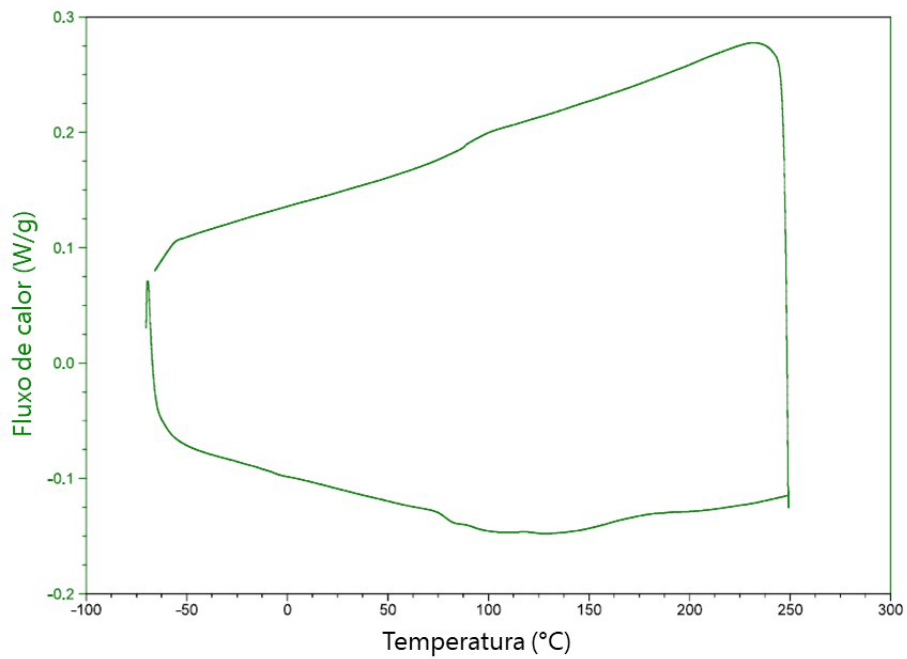


Figura 33: Gráfico obtido no ensaio de calorimetria diferencial de varredura (DSC) - primeiro ciclo de aquecimento e resfriamento

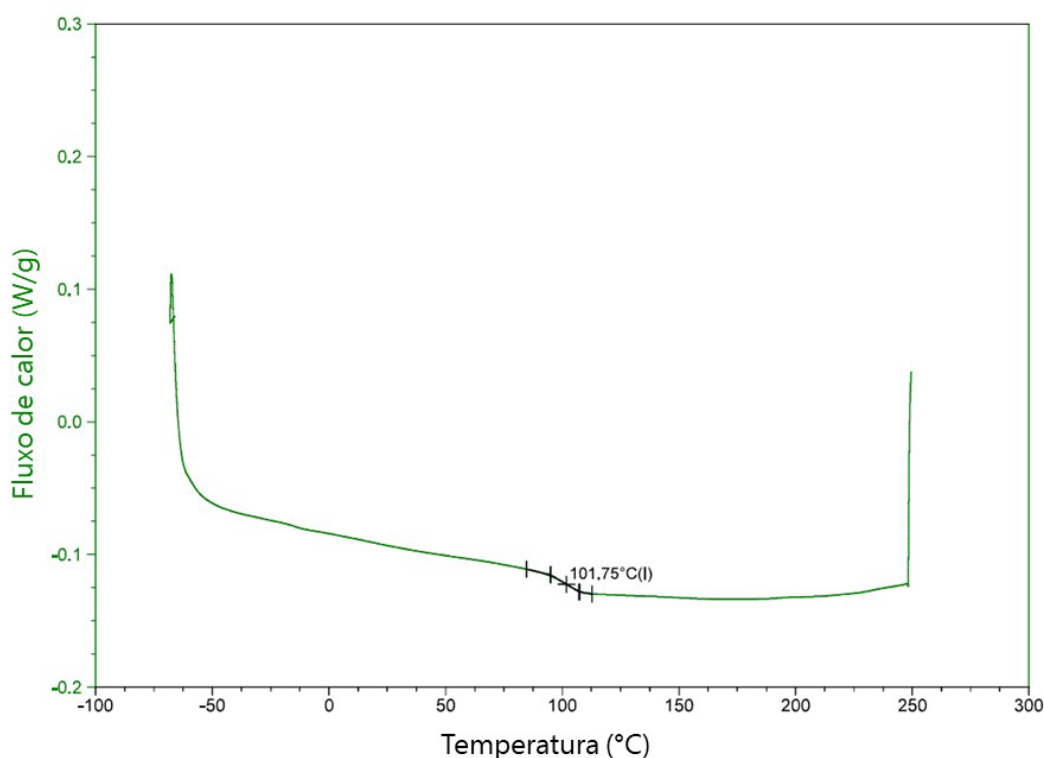


Figura 34: Gráfico obtido no ensaio de calorimetria diferencial de varredura (DSC) - segundo ciclo de aquecimento e resfriamento

Nas curvas DSC do primeiro aquecimento pode ser visualizado um evento que pode estar associado a cura residual do polímero. No segundo aquecimento pode ser observado o evento de relaxação do material polimérico com semelhança a uma transição vítrea da fase amorfa. Esta relaxação foi atribuída à temperatura de transição vítrea (T_g) associada a segmentos flexíveis possivelmente presentes no agente de cura e é visível na inflexão da curva de DSC do segundo aquecimento em torno de 101 °C. Assim, o valor obtido, conforme a Figura 34, foi de 101,75 °C.

Moura, Lima e Ribeiro (2022) indicaram que barras de GFRP com resina do tipo epóxi apresentaram uma temperatura de transição vítrea de 117,1 °C, portanto semelhante com a obtida e apresentada na Figura 34.

Segundo Gooranorimi *et al.* (2018), a composição da resina e o processo produtivo importam e impactam na T_g , mas os valores apresentados devem ser superiores a 100 °C, considerando as premissas da ACI 454. Os autores avaliaram a temperatura de transição em barras em condição ambiente e após exposição em

elevadas temperaturas, indicando que barras de GFRP com nervuras apresentaram 107 e 133,5 °C, respectivamente nessas condições.

Chowdhury *et al.*, (2011) apresentaram o valor de temperatura de transição vítrea de 75 °C ± 2 °C. O valor apresentado por Aydin *et al.* (2023) foi de 115 °C.

Protchenko *et al.*, (2019) citam que a T_g das barras poliméricas se encontra normalmente abaixo de 200 °C, mas os autores ainda afirmam que considerando a resina do tipo epóxi essa faixa pode ser entre 100 e 250 °C. Schartel *et al.* (2007) destacam que diferentes materiais podem ser empregados na resina e, com isso, podem impactar também nessa propriedade.

A faixa de variação entre as pesquisas destaca a influência da composição da resina e, conforme já citado, indicam a necessidade de análise dessa variável, considerando seu consequente comportamento mecânico frente as elevadas temperaturas (SHARIFIANJAZI *et al.*, 2022).

4.1.3 Teor de fibras

Como citado, para o ensaio de teor de fibras foram avaliadas cinco amostras por condição de ensaio. Os resultados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Valores obtidos de teor de fibra

Amostra	amostra seca	Amostra pós mufla	Δ_{massa} conjunto consumo de fibra	teor de fibras	Teor de fibras médio
1	8,295	6,353	1,942	76,59%	76,89%
2	8,026	6,241	1,785	77,76%	
3	7,981	6,17	1,811	77,31%	
4	8,282	6,321	1,961	76,32%	
5	8,102	6,195	1,907	76,46%	

O valor médio obtido de teor de fibra para as amostras em condição ambiente foi de 76,89%, superior ao valor mínimo estabelecido por Cardoso *et al* (2021). O teor de fibra possui relação direta com o comportamento mecânico das barras.

Morales *et al.* (2021) avaliaram o teor de fibra de quatro tipos de barra de GFRP, variando o aspecto superficial destas. O resultado indicado pelos autores apontou um valor mínimo de 71,51%, aproximando-se do obtido no presente estudo. Os autores citaram que em todas as barras houve conformidade com as premissas

das normas ASTM D7957-17 e CSA S807-10, que apresentam o valor mínimo de 70%.

Hajiloo, Green e Gales (2018) referindo-se a valores comerciais apresentaram faixa de variação entre 81 e 88%, dependendo-se do tipo de tratamento superficial, sendo as barras semelhantes a empregada neste estudo as que apresentaram 83%, valor 7,9% superior ao obtido nesse estudo e apresentado na Tabela 13.

Conforme citado, nesse estudo o ensaio de teor de fibra foi realizado como forma de caracterização das barras, além de ter sido uma técnica empregada como estimativa do consumo de resina, conforme apresenta-se no subcapítulo: 4.3.2 Consumo da resina.

4.2 ENSAIOS MECÂNICOS - EXPOSIÇÃO EM ELEVADAS TEMPERATURAS

Nos próximos itens apresentam-se os resultados de resistência à tração e módulo de elasticidade traçando-se uma análise conjunta entre as condições de análise, durante (DU) e após (PÓS) e, posteriormente, uma análise conjunta entre módulo de elasticidade e resistência à tração por condição de avaliação.

4.2.1 Síntese e análise comparativa

Para cada um dos ensaios mecânicos realizados, os resultados são apresentados nos itens seguintes, agrupados de acordo com a temperatura de exposição, e por fim, traçando-se uma análise comparativa entre as temperaturas.

4.2.1.1 Tração axial

A seguir, através da Figura 35 e da Tabela 14 apresenta-se uma análise comparativa dos resultados obtidos após e durante elevadas temperaturas comparando-se com a temperatura ambiente (REF).

Tabela 14: Efeito da exposição durante e após elevadas temperaturas na resistência à tração em relação a temperatura ambiente

Resistência à tração axial (MPa)				
Temp (°C)	DU		PÓS	
	$\sigma_{\text{média}}$	% Retida	$\sigma_{\text{média}}$	% Retida
Amb.	σ média: 956,44			
150	918,95	96,08	948,11	99,13
200	872,24	91,20	987,84	103,28
250	813,72	85,08	971,33	101,56
300	680,02	71,10	962,48	100,63
350	597,36	62,46	966,96	101,10

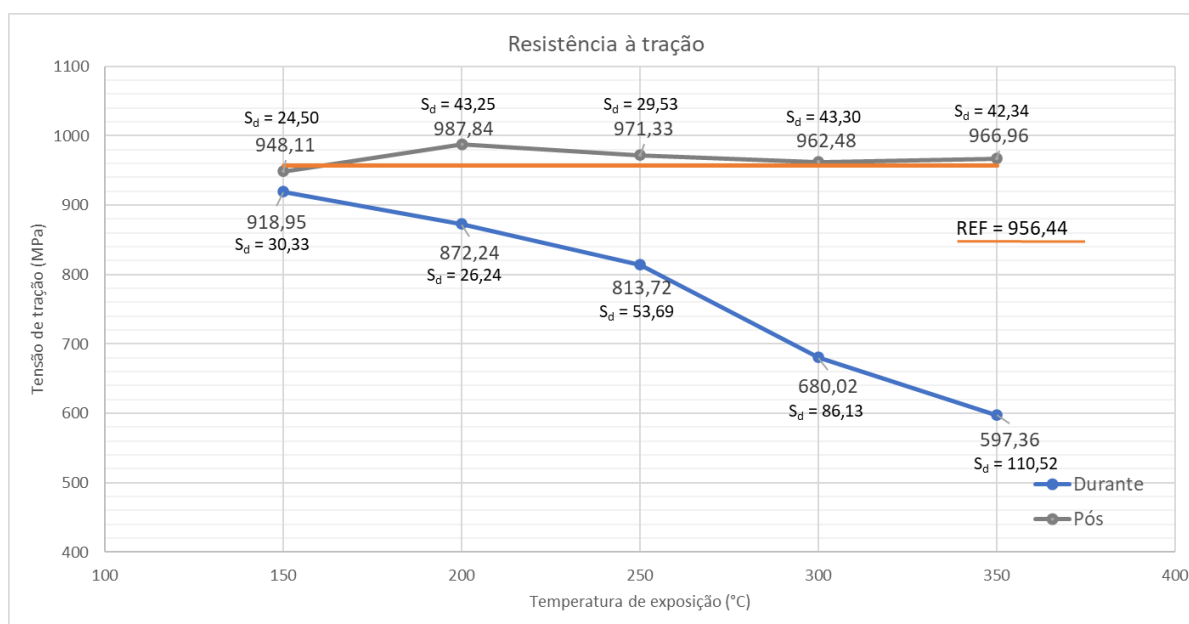


Figura 35: Efeito da exposição durante e após elevadas temperaturas na resistência à tração em relação a temperatura ambiente

O valor de tração axial médio sem exposição à elevadas temperaturas (REF) foi de 956,4 MPa. O valor apresentado como médio por Moura, Lima e Ribeiro (2022) foi de $971,3 \pm 8,6$ aproximando-se, portanto, do obtido experimentalmente nesse estudo.

Cardoso *et al.* (2021) apresentam como valor de referência para barras de GFRP a tensão de tração de 800 MPa, tendo sido tal valor satisfeito no presente estudo. O valor do presente estudo também é condizente com o que apresentam

Abed *et al.* (2020), com faixa de variação de tração para barras de GFRP entre 736 e 976 MPa.

Cabe mencionar que a resistência à tração é dependente das características de composição das fibras e da resina, além do processo produtivo em si, razão pela qual cita-se uma faixa de variação elevada para os compostos, entre 483 e 1600 MPa, por exemplo (HARAJLI; ABOUNIAJ, 2010 *apud* ABEDINI *et al.*, 2017).

Cabe ainda mencionar que por mais que se tenha notado um desvio padrão de aproximadamente 52 MPa, esse valor representa aproximadamente 5% em relação ao valor médio, tendo assim, pequeno coeficiente de variação. Essa variação foi inferior à obtida para o módulo de elasticidade, como apresenta-se a seguir.

O valor médio de resistência à tração durante a temperatura de 150 °C foi de 918,95 MPa. Comparando-se o valor obtido nesse patamar de temperatura com o valor em temperatura ambiente (956,44 MPa), tem-se uma redução de menos de 4% nessa propriedade. Já para a condição de pós exposição nesta mesma temperatura, percebe-se que o valor médio obtido de resistência à tração é de 948,11 MPa, redução inferior a 1% em relação a referência, sendo um indício que para esta condição de análise que a temperatura empregada não foi suficiente para causar danos representativos às barras.

Até que se atinja a temperatura de transição vítrea, há pequena variação no comportamento à tração das barras de FRP (WANG; ZHA, 2011). Considerando a temperatura obtida de aproximadamente 102 °C, no presente estudo, pode-se afirmar que a temperatura de transição vítrea foi alcançada, ainda assim, os danos foram de pequena intensidade.

Há indícios, pelo resultado de resistência à tração, que mesmo em um patamar superior à T_g , não houve incremento de temperatura suficiente para que fossem percebidos danos na matriz.

Para uma faixa semelhante de temperatura, Robert e Bemonkrane (2010) apresentaram uma redução de mais de 20%, empregando barras de 12,7 mm. No entanto, Fu *et al.* (2011) indicam que o diâmetro da barra tem grande relevância nesse comportamento, o que pode ser uma das hipóteses para a diferença entre os estudos.

De modo semelhante ao observado na temperatura de 150 °C, houve uma pequena variação no valor médio de tração axial para a temperatura de 200 °C,

aproximadamente 9% de redução em relação ao valor referência, mostrando um comportamento linear em relação à temperatura (ZHOU *et al.*, 2022). Comparando-se a diferença entre 150 e 200 °C, a redução foi de 5%.

Considerando a temperatura de 200 °C, cabe salientar que nesse momento já se atingiu a transição vítrea, como comprovado nos resultados apresentados anteriormente e um decréscimo maior na tração pode surgir nesse e nos próximos patamares em decorrência das alterações e do consumo da resina (GOORANORIMI *et al.*, 2018). Para o mesmo patamar de temperatura, porém na condição de pós exposição, um pequeno acréscimo na resistência à tração em relação ao valor em temperatura ambiente em aproximadamente 3% e em relação ao obtido aos 150 °C em 4%. Esse acréscimo aos 200 °C foi também percebido por Fu, Zhao e Li (2011). Najafabadi *et al.*, (2019) também pontuam em seu estudo o acréscimo na resistência à tração em decorrência da cura secundária da resina, beneficiada pela reação exotérmica. De fato, Gooranorimi *et al.*, (2018) chegaram a perceber que a exposição ao calor para a resina é capaz de modificar sua temperatura de transição vítrea, destacando assim seu impacto no comportamento.

Para os ensaios realizados durante a exposição em 250 °C, o decréscimo na resistência a tração foi de 15% em relação a amostra em temperatura ambiente, apresentando valor médio de 813,72 MPa. Ao atingir maiores temperaturas, nota-se que a deterioração e o consumo da resina podem ter sido mais intensos, de fato impactando na resistência final das barras. Considerando a forma como o ensaio foi realizado, a resina pode, no patamar de 250 °C, ter alterado seu comportamento mecânico, apresentando menor resistência à tração.

Todavia, na condição de ensaios realizados após a exposição e ciclo de resfriamento, foi observado um acréscimo na resistência à tração da ordem de 2%. Zhou *et al.* (2022) concordam com a pequena variação obtida neste estudo, indicando que há uma tendência de estabilização nos valores de resistência à tração pós elevadas temperaturas até a temperatura de 250 °C. Os autores também indicam que no patamar de 250 °C, no seu estudo a resistência foi muito semelhante ao valor obtido em condições ambientes.

Cabe reforçar o apontado por Gooranorimi *et al* (2018), que as barras podem reconfigurar-se após a exposição em elevadas temperaturas e que os autores chegaram a perceber inclusive um incremento de 47% na temperatura de transição

vítrea, o que pode indicar que após o aquecimento e o resfriamento, a barra tenha seu comportamento microestrutural modificado.

No patamar de 300 °C observou-se um decréscimo mais acentuado na resistência a tração entre duas temperaturas consecutivas quando avaliadas durante o cenário de exposição. A redução foi de aproximadamente 29% em relação a condição inicial das barras. A redução gradual da resistência percebida nos resultados apresentados até o presente momento foi também observada no estudo de Weber (2008).

Essa maior redução pode ser atribuída a um maior consumo da resina, que acaba por prejudicar o comportamento conjunto (resina + fibras). A temperatura até o momento não foi suficiente para degradação das fibras, mas minimiza a contribuição da resina na resistência e proteção das fibras. De fato, como será apresentado a seguir, nesse ensaio, notou-se na ruptura uma maior exposição das fibras, indicando o consumo da resina.

A redução de 30% da resistência à tração foi percebida por Zhou *et al.* (2022) com a temperatura de 200 °C, tendo as barras do presente estudo apresentando melhor comportamento frente à ação do calor durante o ensaio de resistência à tração axial.

Wang e Kodur (2005) citam em seu estudo que na temperatura de 325 °C houve redução de 50% da capacidade portanto, indicando que esse valor representa a temperatura crítica para as propriedades mecânicas das barras.

Para a situação de avaliação pós exposição, observa-se ainda um incremento na resistência à tração em relação à referência com uma tendência de estabilização da resistência próximo ao valor original do produto. Conforme já citado, estudos vinculam esse ganho de resistência a um processo de pós cura da resina, o que pode proporcionar ganhos no comportamento mecânico das barras (GOORANORIMI *et al.*, 2018; NAJAFABADI *et al.*, 2019; SPAGNUOLO, 2018; ZHOU *et al.*, 2022).

Em relação a temperatura de exposição, Weber (2008) pontua que os danos mecânicos passam a ser mais severos em temperatura superior a 400 °C, concordando, portanto, com os valores obtidos no presente estudo, de pequena variação da resistência.

Nó último patamar de temperatura em que as barras foram submetidas, 350 °C, novamente observam-se perdas significativas na propriedade de resistência a tração, sendo nesta temperatura 37,5% menor do que seu valor inicial de 956,44

MPa para a condição DU. Uma das hipóteses para tal redução no valor da resistência à tração é a maior danificação da resina de envoltória das fibras, reduzindo o valor de resistência à tração.

Essa maior queda para esse patamar de temperatura é apresentada também por Wang e Zha (2011) e Zhou *et al.* (2022). Zhou *et al.* (2022) relatam uma queda de resistência de 50%, nesse estudo percebida como 40%. Wang e Kodur (2005) aos 325 °C perceberam perda de 50% da capacidade portante, mostrando danos mais intensos do que os percebidos nesse estudo.

De fato, a bibliografia relata uma estabilização na resistência à tração entre as temperaturas de 150 e 350 °C, indicando essa queda acentuada aos 350 °C, comportamento validado nesse estudo. Najafabadi *et al.*, (2019) indicam que acima dos 300 °C, os danos na resina passam a ser mais representativos, impactando no comportamento mecânico das barras.

O fato de as barras ainda apresentarem uma resistência à tração que corresponde a aproximadamente 60% do valor das barras em estado natural pode decorrer do fato de não se ter alcançado maiores patamares de temperatura, pois, de acordo com Hajiloo, Green e Gales (2018) para que ocorra uma deterioração mais severa das barras, a temperatura de exposição durante o ensaio deve ser superior a 400 °C.

Ainda, na condição de avaliação após exposição e ciclo de resfriamento, pode-se perceber, que na temperatura de exposição de 350 °C, as barras ainda mantiveram valores de resistência à tração muito semelhantes aos obtidos em temperatura ambiente, com variação de aproximadamente 1,1%, para mais.

Moura, Lima e Ribeiro (2022) afirmam que 350 °C é a temperatura crítica para que impactos mais severos mecânicos sejam verificados nas barras, no entanto, no presente estudo esse patamar apenas causou os maiores danos nos ensaios durante a exposição ao calor, não mantendo-se essa tendência para os ensaios nas barras após a exposição ao aquecimento e o resfriamento natural das barras.

Em geral, é possível afirmar que em nenhuma temperatura, considerando os ensaios após exposição, houve variação superior a 3%, o que pode ser um indício de que não houve o alcance de uma temperatura crítica que pudesse causar danos mais intensos no comportamento mecânico das barras.

Para exemplificar o decaimento que ocorre em temperaturas mais extremas para avaliações durante exposição, cabe mencionar o estudo de Weber (2008), no

qual o autor percebeu entre a temperatura de 200 °C e a de 350 °C uma redução de 20%. Já ao avaliar comparativamente as temperaturas de 200 °C e 500 °C, a redução foi superior a 75%.

O formato de ruptura obtido após a exposição a temperatura de 350 °C e o estado das barras após o ensaio de tração axial são apresentados na Figura 36.














Figura 36: Forma da barra após ensaio de tração axial - Pós temperatura de 350 °C

A hipótese mais relevante para que esse comportamento tenha sido percebido é que até a temperatura de 350 °C o efeito de pós cura da resina foi preponderante a quaisquer perdas no teor de resina de revestimento das fibras, ou ainda, ao comportamento das fibras em si.

Como é possível verificar através da Tabela 15, o comportamento durante as elevadas temperaturas causou maiores danos nas barras.

Tabela 15: Aspecto visual das barras na situação durante e pós o ensaio em exposição em elevadas temperaturas

Temp (°C)	Temp (°C)	Temp (°C)	Temp (°C)	Temp (°C)	Temp (°C)
DU	PÓS	Temp (°C)	DU	PÓS	PÓS
REF		250			
150		300			
200		350			

Enquanto em condição de pós exposição a resistência à tração manteve-se estável, com variação entre aproximadamente 99 e 103% em relação ao valor em temperatura ambiente, chegou-se a notar nos ensaios durante elevadas

temperaturas um decréscimo de aproximadamente 40% nas propriedades mecânicas.

Esse fato pode decorrer da possibilidade da resina, em um cenário pós exposição ter sido resfriada e apresentado uma recuperação mecânica, ao passo que, no cenário durante exposição ao calor, teve seu aspecto alterado, sendo solicitada nessa condição, sem a possibilidade de uma recuperação mecânica. Diante dessa alteração de estado, concomitantemente com a aplicação de carga, percebe-se um decaimento no comportamento mecânico das barras.

É importante mencionar que o ensaio durante elevadas temperaturas simula condições mais próximas as reais de exposição, em que elementos submetidos à elevadas temperaturas continuam sob ações mecânicas impostas.

Nos ensaios durante elevadas temperaturas todos os valores apresentaram decaimento. Já nos ensaios após elevadas temperaturas foi possível perceber um ganho na resistência, conforme também apontado por Zhou *et al.* (2022) considerando a temperatura de 200 e 250 °C.

Esse comportamento destoante foi também verificado por Zhou *et al.* (2022), sobre o qual se traçam as seguintes hipóteses.

- a. Os ensaios após exposição em elevadas temperaturas possuem pequena variação entre as temperaturas de 150 e 350 °C (HAJILOO; GREEN, 2016), temperaturas que não são suficientes para provocar danos severos no comportamento das barras;
- b. O comportamento após a exposição pode ser favorecido por um efeito de pós cura na resina (GOORANORIMI *et al.*, 2018; ZHOU *et al.*, 2022). Durante a exposição a elevadas temperaturas, as barras poliméricas apresentam um modo de ruptura diferente em relação às barras ensaiadas após o resfriamento. Isso ocorre devido à degradação da resina utilizada na formação das barras, que acontece quando a temperatura excede sua temperatura de transição vítrea e a resina entra em um estado elástico (ROBERT; BENMOKRANE, 2010).
- c. Na condição de ensaio pós exposição ao calor, o resfriamento natural das barras e conseqüentemente da resina provoca uma recuperação de sua resistência, o que acaba por garantir um melhor comportamento mecânico (ZHOU *et al.*, 2022).

Sobre o maior decaimento verificado no patamar de 300 °C, para a resistência à tração, Sharifianjazi *et al.*, (2022) citam que na faixa entre 300 e 400 °C que costuma ocorrer a maior deterioração da resina epóxi, que acaba por prejudicar a aderência e integridade também das fibras e desse ponto em diante os danos passam a ser mais severos, conforme validado no presente estudo.

Em relação ao comportamento após a exposição em elevadas temperaturas, uma hipótese traçada na presente pesquisa é que mesmo diante da temperatura de 350 °C, os danos não foram severos a ponto de impactar significativamente na resistência à tração. Nos ensaios pós temperatura, a resina também é degradada (assim como nos ensaios durante), mas suas condições residuais são melhores devido à reorganização da cadeia molecular da resina epóxi. Essa reorganização proporciona alguma recuperação das propriedades mecânicas do polímero, embora ainda haja degradação em comparação ao estado original (ELLIS; TABATABAI; NABIZADEH, 2018).

Ainda sobre a resistência à tração, o estudo de Ellis, Tabatabai e Nabizadeh (2018) também indicou uma variação de 3% na resistência à tração considerando exposição de até 200 °C, variação semelhante a obtida e apresentada na Tabela 17.

O comportamento verificado nesse estudo, que indica que os ensaios durante a atuação do calor apresentaram maior impacto nos resultados das propriedades mecânicas em relação aos ensaios após, também foi validado por Zhou *et al.* (2022), Ellis, Tabatabai e Nabizadeh (2018) entre outros.

4.2.1.2 Módulo de elasticidade

Os valores obtidos de módulo de elasticidade em condição ambiente (REF) são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Valores obtidos de módulo de elasticidade

Amostra	Valores obtidos e análise								
	45% - 65%	40% - 80%	40% - 60%	Média amostral (GPa)	Desvio padrão	Coef. Variação	Média geral (GPa)	Desvio padrão	Coef. Variação
REF 1	45,82	46,96	46,11	46,30	0,60	1,29%			
REF 2	47,31	46,74	47,31	47,12	0,33	0,69%			
REF 3	41,41	42,09	44,26	42,59	1,49	3,49%	44,72	2,79	6,23%
REF 4	40,73	40,50	41,56	40,93	0,56	1,37%			
REF 5	46,65	45,69	47,72	46,69	1,01	2,17%			

O valor médio obtido de módulo de elasticidade sem exposição à elevadas temperaturas foi de 44,72 GPa,

Os valores de módulo de elasticidade apresentados por Mohamed *et al.* (2013) situam-se entre 66,9 e 69,6, superior ao obtido no presente estudo. Hajillo, Green e Gales (2018) apresentam valores próximos aos citados, com variação entre 62,6 e 64,1 GPa, considerando três diferentes fabricantes.

Wang e Kodur (2005) apresentaram valores de módulo de elasticidade de 41,02 e 41,11 GPa, valores próximos ao valor médio de 44,72 obtido neste trabalho e apresentado na Tabela 16. Tais resultados indicados pelos autores foram avaliados em temperatura ambiente.

O valor se aproxima ao citado por Couto (2007), que apresentou valor de módulo de elasticidade de 40,8 GPa, citando dados de uma empresa fabricante de barras de GFRP. Cardoso *et al.* (2021) citam como valor de referência 50 GPa para barras de GFRP, valor cerca de 12% superior ao valor médio obtido.

Há de ser mencionado que a natureza da resina exerce influência no módulo de elasticidade obtido nas barras. O módulo de elasticidade da resina de poliéster é de 4 GPa, enquanto tem-se 3,5 GPa para a resina de Éster-vinil e 3,0 GPa para resina epóxi (BENMOKRANE; MOHAMED; AHMED, 2016).

Na Tabela 17 e na Figura 37 é apresentado o comportamento obtido de módulo de elasticidade, destacando as amostras ensaiadas após e durante a exposição em elevadas temperaturas.

Tabela 17: Efeito da exposição durante e após elevadas temperaturas na resistência à tração em relação a temperatura ambiente

Módulo de elasticidade (GPa)				
Temp (°C)	DU		PÓS	
	$E_{\text{médio}}$	% Retido	$E_{\text{médio}}$	% Retido
Amb.	$E_{\text{médio}}: 44,72$			
150	45,71	102,21	41,34	92,44
200	42,55	95,15	41,18	92,08
250	42,26	94,50	42,25	94,48
300	42,15	94,25	42,45	94,92
350	40,99	91,66	44,4	99,28

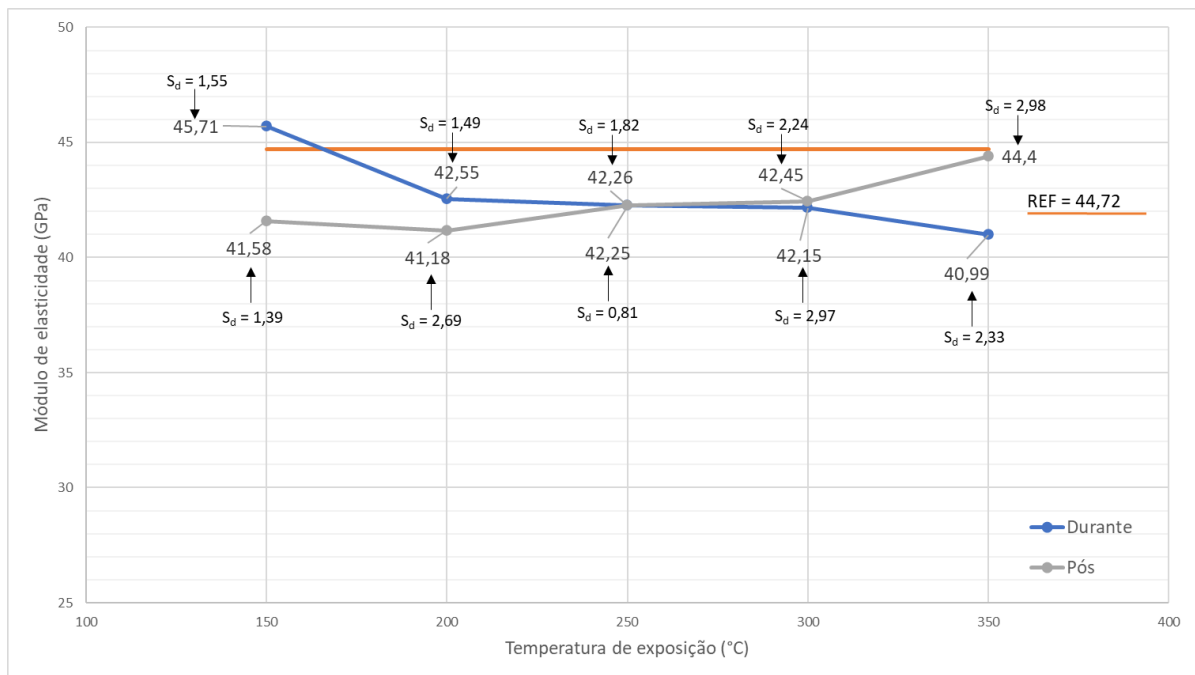


Figura 37: Efeito da exposição durante e após elevadas temperaturas no módulo de elasticidade em relação a temperatura ambiente

Para cenário de avaliação de avaliação durante exposição em 150 °C, percebeu-se um pequeno acréscimo no módulo de elasticidade, de aproximadamente 2%, considerando o valor obtido em condição ambiente (44,72 GPa). Zhou *et al.* (2022) também indicaram em seu estudo um pequeno acréscimo

no módulo de elasticidade para as temperaturas de 150 °C e 200 °C, o que segundo os autores pode ser causado por um processo de cura tardia da resina.

Na bibliografia, além de estudos que indicam pequenos acréscimos, há o indicativo de que pode haver pequenas reduções no valor de módulo de elasticidade. Wang, Wong e Kodur (2003), de fato pontuaram que a redução era inferior a 10% no módulo de elasticidade na faixa de exposição de temperatura de 100 °C, indicando que temperaturas mais amenas não impactariam de modo representativo nessa grandeza. Rosa *et al.* (2018) indicam que em 100 °C a redução é de 9%, e em 150 °C a redução foi de 5%, considerando também ensaios realizados durante a exposição nas temperaturas.

Yang e Yao (2018) avaliaram também para 150 °C um decréscimo de apenas 3% em relação a temperatura ambiente, indicando, no entanto, que os danos percebidos no módulo de elasticidade são inferiores aos percebidos em relação aos resultados de resistência à tração.

Uma das hipóteses para essa menor redução no módulo de elasticidade é o fato de as fibras exercerem maior influência nessa propriedade, e que estas possuem maior resistência ao incremento de temperatura. Além disso, a redução da resina aos 150 °C foi muito pequena, conforme será apresentado no item 4.3.2 Consumo da resina.

Para a condição de pós exposição no patamar de 150 °C houve uma pequena variação entre o comportamento das amostras, resultando em um desvio padrão de 1,39 GPa. A média obtida entre as 5 amostras avaliadas foi de 41,58 GPa. Considerando-se a comparação com o módulo obtido em temperatura ambiente, a redução foi de apenas 7%.

Em 150 °C, Zhou *et al.* (2022) indicaram que nesta situação de avaliação uma redução no módulo de elasticidade de aproximadamente 3,5% foi observada, indicando que essa faixa de temperatura não é suficiente para uma degradação significativa nas barras.

Feng *et al.* (2022) indicam que até que se atinja a temperatura de transição vítrea os danos mecânicos percebidos são irrelevantes. Indicam, no entanto, que após esse patamar, os danos se tornam mais intensos em decorrência da degradação da resina.

No entanto, cabe mencionar que a bibliografia aponta que os danos percebidos tendem a ser maiores na resistência à tração e inferiores no módulo de elasticidade.

Fu, Zao e Li (2011) complementam, afirmando que há uma perda de desempenho em decorrência de uma mudança de fase, na qual tem-se uma difusão da cadeia molecular, o que impacta no comportamento da barra.

Após apresentar um pequeno acréscimo na temperatura de 150 °C durante ensaio de módulo de elasticidade, percebeu-se aos 200 °C que houve uma pequena redução em relação a barra em condição ambiente, sendo o valor que corresponde a 95% do módulo de elasticidade inicial. Essa pequena variação no módulo de elasticidade também foi reportada por Wang e Kodur (2005).

Na avaliação após ciclo de resfriamento, percebe-se novamente que o valor médio apresentou redução em valor ao ensaio em condição ambiente. Comparando-se com tal condição, a redução do módulo de elasticidade para a temperatura de 200 °C foi de 8%, tendo apresentado em relação ao patamar anterior (150 °C), um decréscimo de menos de 1%.

Fu, Zhao e Li (2011) indicam que há de fato pequenas alterações quanto ao módulo de elasticidade em amostras após submissão em elevadas temperaturas, com exceção dos casos em que temperaturas extremas são empregadas.

Nesse caso, no cenário de ensaios após o efeito da temperatura, a resistência à tração foi favorecida pelo fenômeno de pós cura da resina, que pode ter alterado sua microestrutura frente ao acréscimo da temperatura, porém, não exerce essa influência positiva no módulo de elasticidade, dado que as fibras que governam esse comportamento. Vale reforçar que a deterioração das fibras é percebida em aproximadamente 1000 °C (ROBERT; BENMOKRANE, 2010)

El Gamal *et al.* (2023) avaliaram o efeito da temperatura e perceberam também, em barras de GFRP, que nos ensaios após o resfriamento a redução foi muito pequena na faixa de 100, 200 e 300 °C, tendo variação inferior a 1%.

Ainda que os resultados apresentados em 250 °C sejam muito semelhantes ao apresentado no patamar anterior de temperatura, cabe mencionar que se percebe uma relação inversamente proporcional entre o módulo de elasticidade e a temperatura de exposição durante o ensaio, conforme também indicado por Wang e Zha (2011).

Ainda, para o mesmo patamar de 250 °C, os danos na resistência à tração foram superiores aos danos no módulo de elasticidade. Tal fato pode ser um indício de que a deterioração da resina impacta de forma mais severa na capacidade resistente das barras, sem alterar, no entanto, a relação entre tensão e deformação, permanecendo com valores muito próximos de módulo de elasticidade.

Para o mesmo patamar de temperatura citado acima, todavia na condição de pós exposição, é observada uma mudança de comportamento em relação as temperaturas anteriores. Enquanto na avaliação aos 150 e aos 200 °C houve redução do módulo diretamente proporcional ao incremento de temperatura, na temperatura de 250 °C houve um incremento, de cerca de 1% em relação aos 200 °C.

Em relação ao módulo de elasticidade em temperatura ambiente, ainda se notou um pequeno decréscimo de menos de 6%. Zhou *et al.* (2022) também indicaram um pequeno acréscimo no módulo de elasticidade na temperatura de 250 °C, concordando com o obtido nesse estudo.

Para o cenário de avaliação durante exposição à elevadas temperaturas, o valor obtido de módulo de elasticidade médio foi de 42,15 GPa. Após o pequeno ganho de módulo verificado na temperatura de 150 °C, para todas as demais houve uma relação inversa, na qual maiores temperaturas apresentaram menores valores de módulo de elasticidade.

A variação, no entanto, entre os patamares de temperatura é reduzida, tendo apresentado aos 300 °C um decréscimo de aproximadamente 5%. Percebe-se que houve entre as temperaturas, até o momento, pequena variação no valor de módulo, sendo entre 250 °C e 300 °C a variação de 1%. Zhou *et al.* (2022) reportaram em ensaios durante o aquecimento que havia pequenas variações no módulo entre as essas temperaturas, concordando com o obtido no presente estudo.

Novamente no cenário de pós exposição, observa-se para 300 °C uma mesma tendência de comportamento verificada anteriormente aos 250 °C. Houve um pequeno incremento no módulo de elasticidade, após os decréscimos verificados aos 150 e aos 200 °C. Como já citado, a temperatura de submissão das amostras pode ter provocado um benefício químico na resina (NAJAFABADI *et al.*, 2019), melhorando o comportamento mecânico das barras como um todo. Em relação ao valor obtido aos 250 °C, a variação foi de aproximadamente 1%.

De acordo com os resultados apresentados, mesmo com a temperatura de 350 °C durante o ensaio, o módulo de elasticidade apresentou pequena variação em relação aos valores iniciais, apresentando um valor médio de 40,99 GPa, em comparação ao valor em temperatura ambiente, de 44,72 GPa. Dessa forma, a redução de menos de 10% no módulo para essa temperatura, citada por Wang e Kodur (2005) foi de fato percebida na presente pesquisa.

Fu, Zhao e Li (2011), indicaram para ensaios durante a exposição em elevadas temperaturas, que a redução do módulo de elasticidade máxima verificada aos 400 °C foi de 8,0%, concordando, portanto, com a pequena variação dessa propriedade.

Finalizando os resultados obtidos nos ensaios durante exposição às elevadas temperaturas, é importante mencionar que o dano percebido foi mais acentuado na resistência à tração do que no módulo de elasticidade, no qual a variação foi de menos de 10%. Tal fato pode ser atribuído a uma menor capacidade resistente pelo consumo da resina e pela alteração do seu estado. Além disso, a menor redução no módulo de elasticidade pode indicar que mesmo apresentando menor tensão de ruptura, percebeu-se nas barras uma tendência de manutenção do comportamento entre tensão e deformação. Bazli e Abolfazli (2020) reforçam essa hipótese, indicando que a temperatura de exposição não é suficiente para danificar o comportamento das fibras, de maior relevância no módulo de elasticidade.

Para finalizar, os valores obtidos de módulo de elasticidade, neste último patamar de exposição e análise pós resfriamento, tem-se que as barras apresentaram o valor médio de 44,4 GPa de módulo de elasticidade, em relação ao comportamento em temperatura ambiente, de 44,72 GPa. Dessa forma, o presente estudo apresentou semelhança com El Gamal et al. (2023).

Spagnuolo et al. (2018) apresentam em seu estudo que os benefícios da pós-cura da resina podem ocorrer na faixa entre 100 e 300 °C. Segundo os autores, é possível que essas melhorias sejam identificadas, uma vez que a resina contribui com a envoltória das fibras, e no comportamento conjunto da barra, o que pode ter favorecido seu desempenho em comparação as temperaturas mais amenas.

A real contribuição da resina no módulo de elasticidade é pequena, sendo esse comportamento, conforme já mencionado, governado pelas fibras envoltas pela resina. O comportamento durante e após, para a mesma faixa de temperatura de

350 °C indicou aspectos de ruptura diferentes, o que pode decorrer desse comportamento diferencial da resina e da interação entre a resina e as fibras.

4.2.2 Comparação entre variáveis

De modo a permitir a análise comparativa entre as variáveis de comportamento mecânico, tem-se as Figura 38 e Figura 39, considerando os ensaios após e durante as elevadas temperaturas, respectivamente.

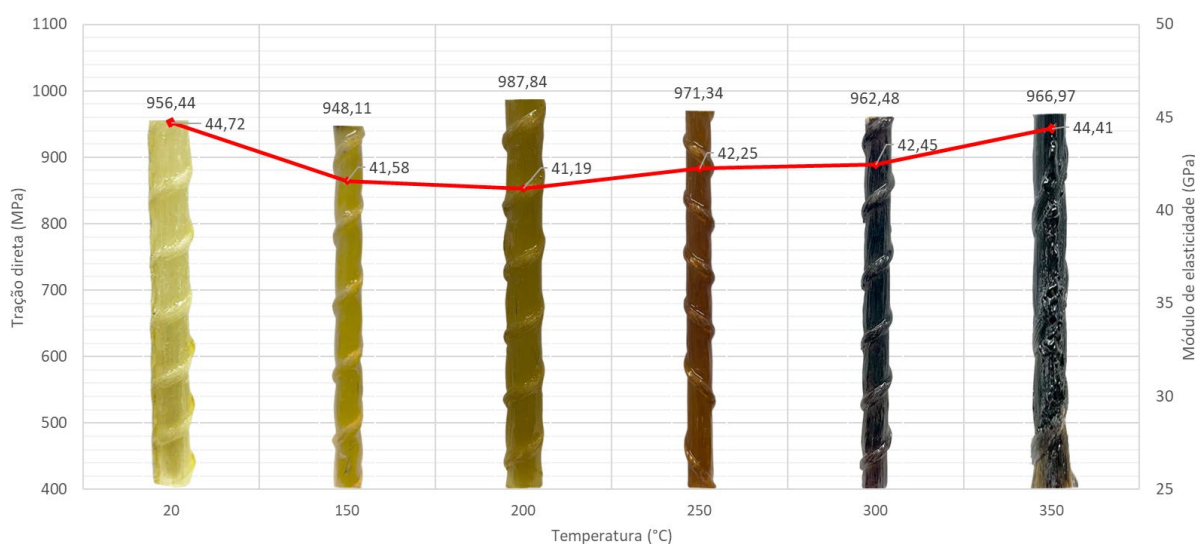


Figura 38: Resultados de resistência à tração, módulo de elasticidade e aspecto visual das barras em relação à temperatura, considerando ensaios após exposição

Para os ensaios após exposição em elevadas temperaturas, tanto a resistência à tração quanto o módulo de elasticidade apresentaram variação inferior à 10% (em relação à condição ambiente). Para a resistência à tração, chegou-se a perceber um incremento na resistência à tração em relação à condição inicial, cenário também reportado por Fu, Zhao e Li (2011), Spagnuolo *et al.* (2018), entre outros.

De acordo com Najafabadi *et al.* (2019), trata-se de um comportamento típico após a exposição em elevadas temperaturas, o que acaba por proporcionar um efeito de pós cura na resina e após o resfriamento, há um incremento em relação a sua condição inicial.

Ellis, Tabatabai e Nabizadeh (2018) inclusive citam um resultado que se assemelha ao obtido nesse estudo: os autores indicam a temperatura de 200 °C como aquela que apresentou o maior resultado de resistência à tração, também destacando os benefícios na resina.

Considerando a temperatura crítica, trazida por diversos autores como aquela na qual reduz-se 50% a capacidade portante, cabe mencionar que para as barras avaliadas no presente estudo, não se verificou tal decaimento.

Em relação ao comportamento após a exposição e a temperatura de transição vítrea, pode-se perceber que sendo a T_g de aproximadamente 101,7 °C e a temperatura de exposição inicial no patamar de 150 °C, que houve deterioração maior no módulo de elasticidade do que na resistência à tração, conforme já relatado e apontado pela bibliografia.

Dando continuidade, é informado na Figura 39 o comportamento das barras considerando o ensaio mecânico durante a exposição em elevadas temperaturas.

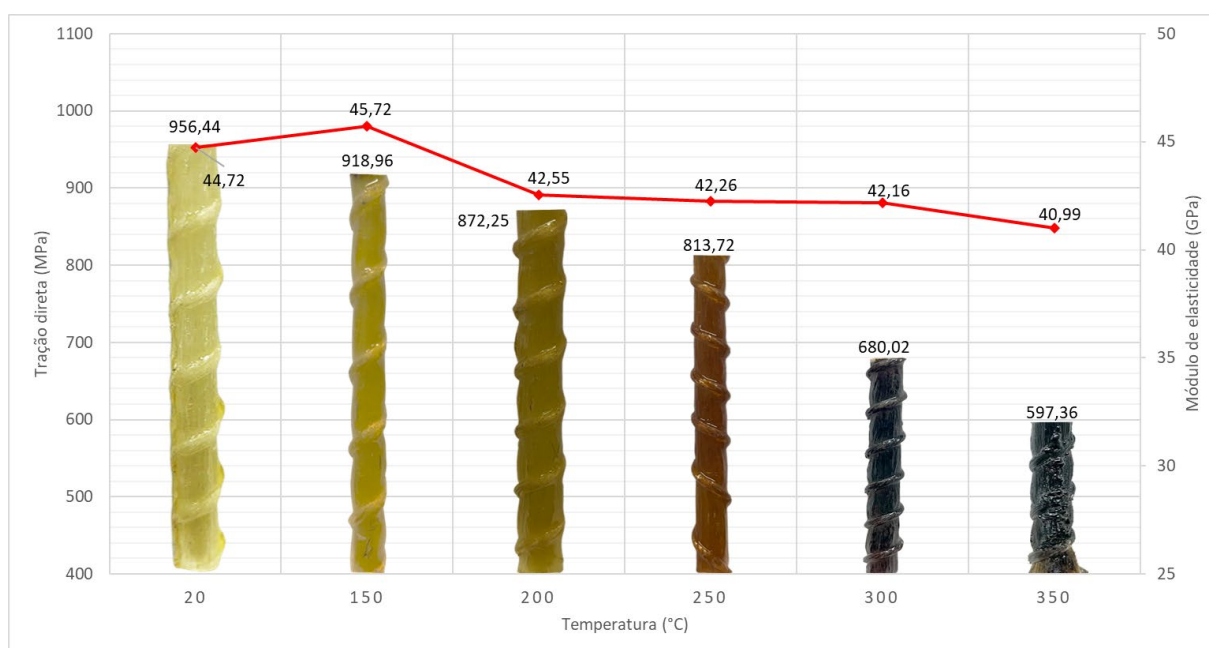


Figura 39: Resultados de resistência à tração, módulo de elasticidade e aspecto visual das barras em relação à temperatura, considerando ensaios durante exposição

Considerando-se o comportamento da resistência à tração, enquanto a variação foi pequena entre a temperatura ambiente e a temperatura de 150 °C, após os 200 °C se perceberam maiores diferenças entre os valores dos resultados

durante o aquecimento das barras. Hajiloo, Green e Gales (2018) pontuaram, também em ensaios durante o aquecimento que após 250 °C se percebia uma relação linear entre o incremento de temperatura e o dano da resistência à tração.

Sobre esse maior dano na resistência à tração do que no módulo de elasticidade, algumas hipóteses podem ser delineadas:

- a. O módulo de elasticidade é mais estável em relação ao incremento de temperatura do que a resistência à tração, uma vez que nessa variável há maior influência do comportamento da fibra, que tende a não se deteriorar em temperatura inferior a 400 °C (ZHOU *et al*, 2022).
- b. O dano percebido nas barras de impacto na resina reduziu o valor de resistência à tração, todavia, até a ruptura, mesmo diante de elevadas temperaturas o comportamento das barras segue a mesma tendência de deformação, o que também possui relação com o comportamento das fibras em si, o que não chegou a ser impactado mesmo nas maiores temperaturas avaliadas.

Wang e Kodur (2005) vão ao encontro disso, afirmando que no patamar de 325 °C, enquanto houve redução de 50% da capacidade portante, o módulo de elasticidade foi impactado em menos de 10%. Tal fato pode decorrer da deterioração da resina e da quebra de suas cadeias moleculares, o que, em um segundo momento prejudica também as fibras e impacta de forma mais severa no comportamento mecânico.

Por mais que os valores de módulo tenham se mantido estáveis, em decorrência da resistência à tração, atenta-se ao recomendado por Sharifianjazi *et al.* (2022) que indicam que a temperatura de exposição não supere a de transição vítrea, garantindo a integridade estrutural. Os autores indicam estratégias, tais como o incremento do revestimento das barras. Ainda em relação aos resultados obtidos, Najafabadi *et al.* (2019) indicam que os maiores danos mecânicos são obtidos em temperaturas de 300 °C ou mais, o que concorda com o impacto na resistência à tração apresentado nesse estudo.

4.3 ENSAIOS COMPLEMENTARES: MEV E CONSUMO DE RESINA

Os próximos tópicos abordam as microscopias eletrônicas de varredura e o ensaio de teor de fibra, realizado como estimativa indireta do consumo de resina nas elevadas temperaturas.

4.3.1 Microscopia eletrônica de varredura

4.3.1.1 Amostra em condição ambiente

Através da Figura 40 é iniciada a apresentação das microscopias eletrônicas de varredura, apresentando a barra analisada sem exposição em elevadas temperaturas (referência).

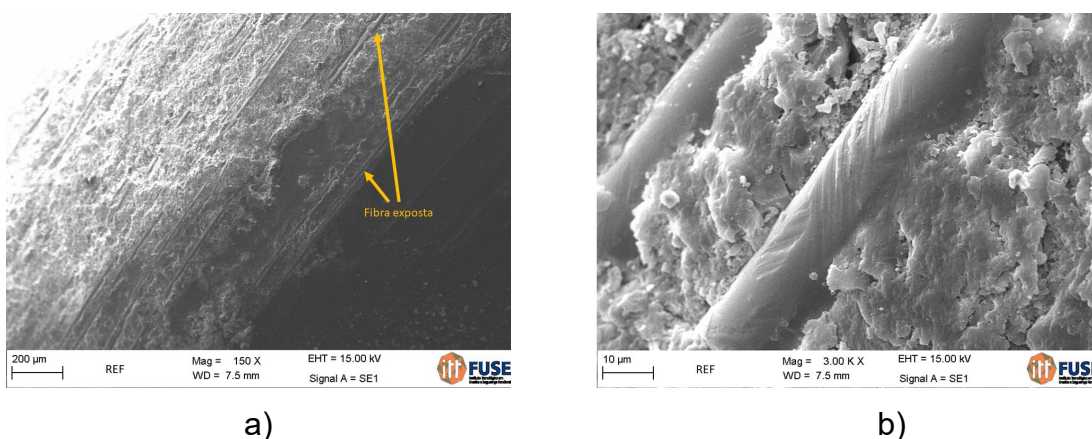


Figura 40: Microscopia em amostras não expostas em elevada temperatura (a) ampliação de 150x, aspecto superficial das barras com fibras expostas e (b) ampliação de 3000x, interface entre as fibras e a resina

De acordo com as aproximações realizadas, foi possível perceber em a) fibras expostas em relação à superfície da barra, o que pode indicar uma falha na envoltória das barras com as resinas poliméricas. Em b) buscou-se analisar a interface entre a resina e as fibras, notando-se a aderência perfeita entre os dois locais, sem a existência de microfissuras.

Em relação a interação das fibras com a resina, cabe mencionar que a imagem obtida no presente estudo é semelhante a indicada pelos autores Zhou *et al.* (2022), indicando uma aderência satisfatória entre a dispersão das fibras de vidro e a envoltória com a resina polimérica.

4.3.1.2 Amostra após 150 °C

Nas Figura 41 e Figura 42 apresentam-se as imagens ampliadas considerando as barras após exposição em patamar de temperatura de 150 °C.

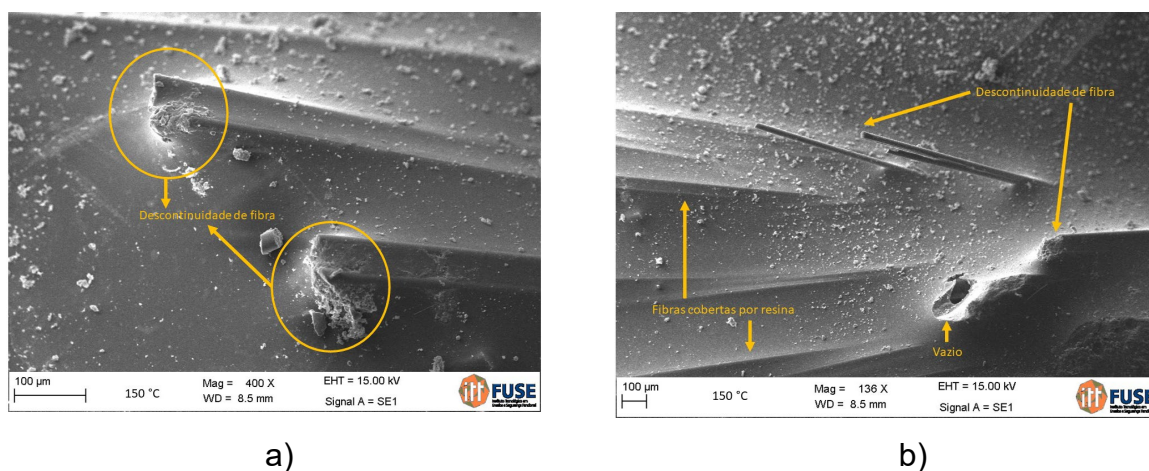


Figura 41: Microscopia em amostras expostas em 150 °C (a) ampliação de 400x, (b) ampliação de 136x- em ambas, descontinuidade das fibras

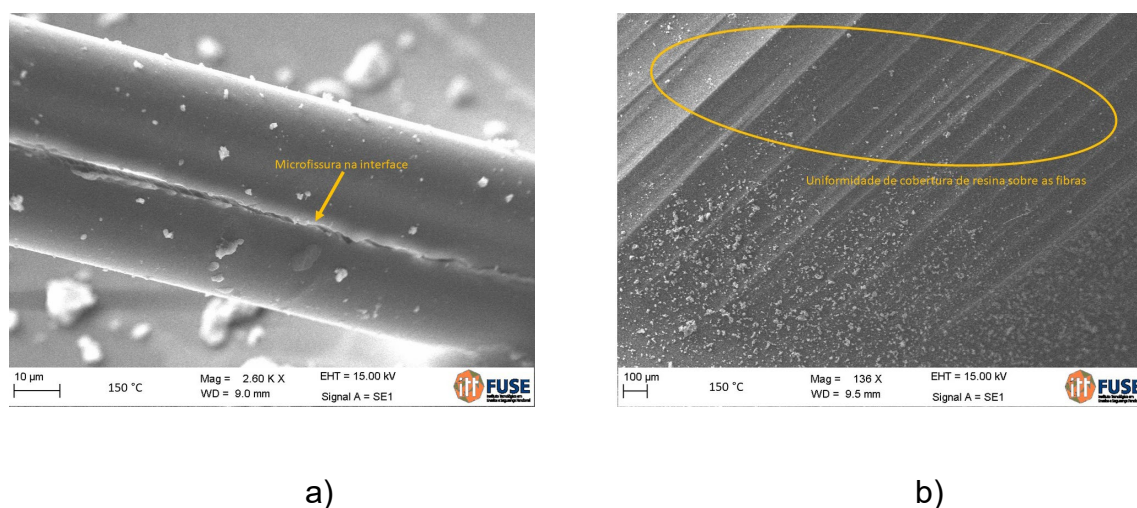


Figura 42: Microscopia em amostras expostas em 150 °C (a) amp. de 2600x, microfissura na interface de resinas e fibras (b) amp. de 136x- aspecto superficial

Em alguns trechos foi possível perceber a ruptura das fibras, também percebida por Ellis, Tabatabai e Nabizadeh (2018). Ainda nesse patamar de temperatura notou-se, em uma ampliação de 136x, uma cobertura uniforme das

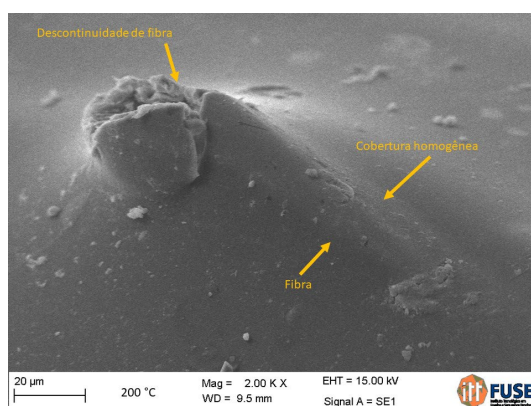
fibras com a resina empregada, indicando um aspecto superficial conforme das barras.

Alsayed *et al.* (2012) também avaliaram a cobertura da resina sobre as fibras dispersas, tendo obtido imagens semelhantes às do presente estudo. Segundo os autores, o fato de ser possível notar a posição das fibras e da resina de coberturas é um indício de que superficialmente a temperatura possa ter deteriorado a resina, consumindo-se e deixando as barras mais superficiais em relação a sua posição inicial (de maior envoltória da resina).

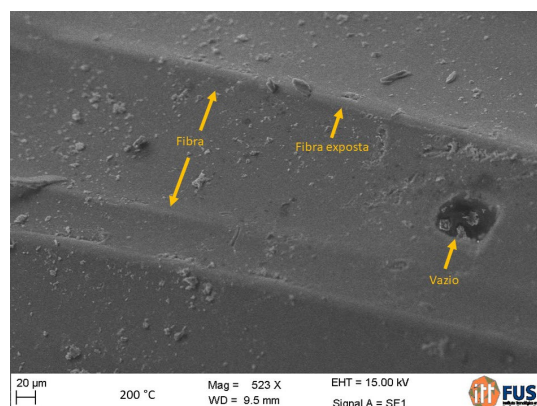
Beura *et al.* (2018) apresentaram imagens de microscopia de barras de GFRP após a ruptura, indicando um formato de ruptura das barras que se assemelha ao apresentado na Figura 61a, o que pode ser atribuído a falha na fibra ou em um trecho de fibra não contínua que sofreu com o consumo da resina na temperatura.

4.3.1.3 Amostra após 200 °C

Através da Figura 43 apresentam-se as imagens de barra exposta em temperatura de 200 °C, indicando possíveis falhas superficiais e descontinuidade nas fibras.



a)



b)

Figura 43: Microscopia em amostras expostas em 200 °C (a) amp. de 2000x, descontinuidade na fibra (b) amp. de 523 x - fibra exposta e irregularidade superficial

Conforme é ilustrado na Figura 43, foram percebidas pequenas irregularidades superficiais nas barras. Sharifianjazi *et al.* (2022) afirmam que

mesmo nas temperaturas em que não há maior danificação da resina, é possível perceber danos superficiais, como fissuras e delaminações.

4.3.1.4 Amostra após 250 °C

Após a exposição da barra em temperatura de 250 °C os danos percebidos passaram a ser mais severos, conforme exposto na Figura 44.

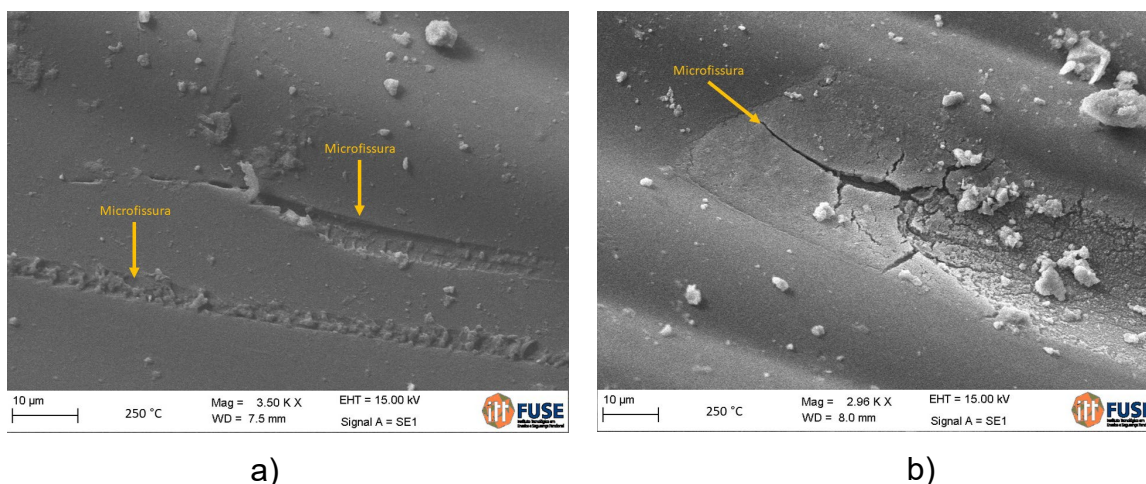


Figura 44: Microscopia em amostras expostas em 250 °C (a) amp. de 3500x, microfissuras na superfície (b) amp. de 2960x- microfissura e vazios

Conforme é apontado na Figura 64, a ocorrência de fissura se deu de forma mais significativa do que pode ser percebido nas temperaturas demonstradas anteriormente.

4.3.1.5 Amostra após 300 °C

Nas Figura 45 e Figura 46 apresentam-se os danos verificados na barra após exposição em temperatura de 300 °C, indicando descontinuidade e exposição das fibras em decorrência de uma maior danificação da resina.

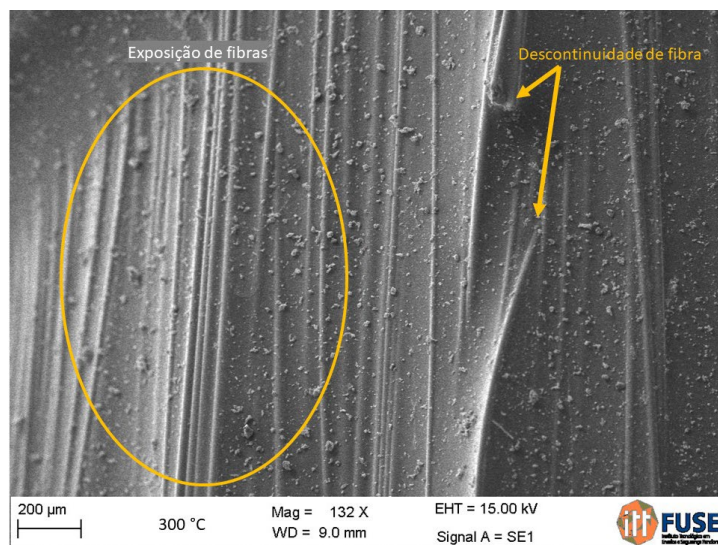


Figura 45: Microscopia em amostra exposta em 300 °C - amp. de 132x, exposição e descontinuidade das fibras

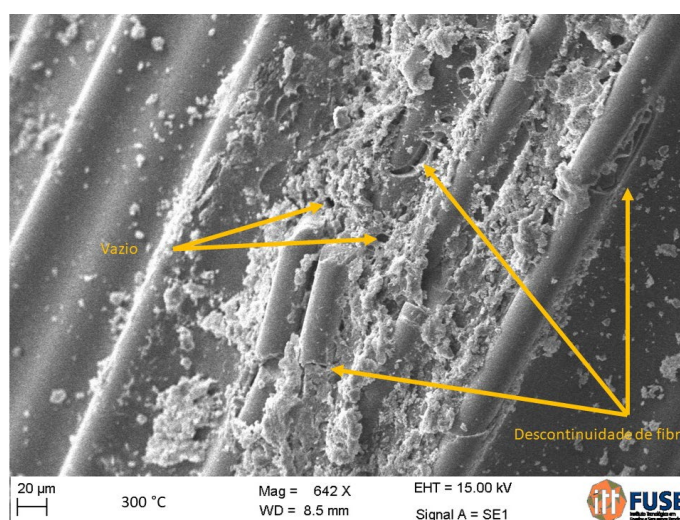


Figura 46: Microscopia em amostra exposta em 300 °C - amp. de 642x, exposição e descontinuidade das fibras, vazios entre trechos da fibra

É possível perceber através das imagens a maior exposição das fibras, assim como a existência de vazios e de falhas ao longo das barras, o que parece ser um dano decorrente do incremento de temperatura.

Alsayed *et al.* (2012) também avaliaram microscopias após a exposição das barras em temperatura de 300 °C. Assim como no presente estudo, os autores denotaram a deterioração da resina, uma vez que as fibras se apresentaram como a superfície da barra analisada nas imagens.

O consumo da resina e a fragilidade das fibras concorda com o obtido em relação ao comportamento mecânico, sendo que as faixas de temperaturas de 300 e 350 °C foram as quais se destacaram como de maior prejuízo para as barras, concordando, portanto, com o aspecto observado através das imagens.

O aspecto verificado nessa temperatura guarda semelhança com as imagens apresentadas por Zhou *et al.* (2022), que indicaram uma percepção mais fácil das fibras, o que decorre, segundo os autores, do maior consumo de resina.

Sharifianjazi *et al.* (2022) indicam que na faixa de temperatura entre 300 e 500 °C percebe-se que o dano da resina é capaz de provocar a descontinuidade entre as fibras, causando a ruptura, como percebido também na microscopia.

4.3.1.6 Amostra após 350 °C

Por meio da Figura 47 apresentam-se as imagens após a exposição das barras em temperatura de 350 °C.

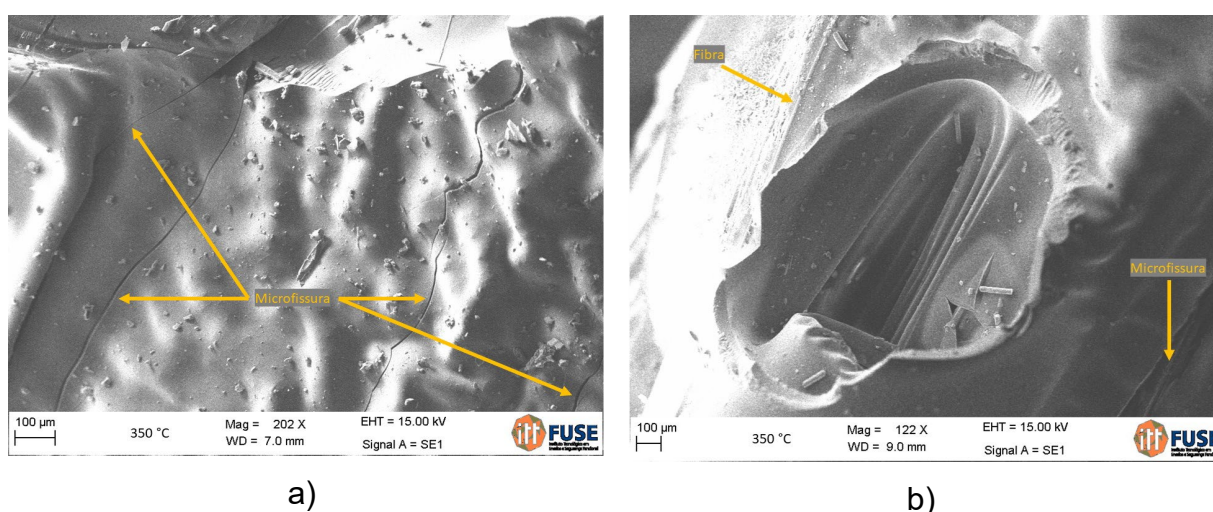


Figura 47: Microscopia em amostra exposta em 350 °C – (a) amp. de 202x, microfissuras ao longo da resina (b) amp. 122x microfissuras e vazios

Após a submissão das amostras em 350 °C, percebeu-se danos mais severos na superfície, com a ocorrência mais intensa de fissuras, próximas umas das outras, o que pode indicar falhas também na aderência e cobertura entre as fibras. Tal observação concorda com o que mostrará o capítulo a seguir, indicando que os

danos são mais intensos e tem maior progressão no consumo de resina após o patamar de 250 °C.

4.3.2 Consumo da resina

Como indicado anteriormente, o ensaio de teor de fibra foi empregado nessa pesquisa como uma forma indireta de mensuração do consumo de resina diante das elevadas temperaturas. Os resultados obtidos de teor médio são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Teor de resina em amostras após exposição em elevadas temperaturas

Amostra	amostra seca	peso pós mufla (g)	Δ_{massa} conjunto (g)	consumo médio de resina (g)	consumo esperado (g)	resina consumida pela temperatura de exposição (g)	% consumida pela temperatura de exposição
150-1	7,883	6,127	1,756				
150-2	7,793	6,095	1,698				
150-3	7,503	5,791	1,712	1,693	1,760	0,067	3,82%
150-4	7,267	5,663	1,604				
150-5	7,624	5,929	1,695				
200-1	7,844	6,051	1,793				
200-2	8,27	6,43	1,84				
200-3	8,204	6,357	1,847	1,7954	1,861	0,066	3,54%
200-4	8,068	6,25	1,818				
200-5	7,87	6,191	1,679				
250-1	7,827	6,18	1,647				
250-2	7,86	6,112	1,748				
250-3	7,984	6,242	1,742	1,7386	1,835	0,097	5,26%
250-4	7,859	6,166	1,693				
250-5	8,16	6,297	1,863				
300-1	7,452	5,926	1,526				
300-2	7,242	5,75	1,492				
300-3	6,172	4,877	1,295	1,5062	1,672	0,166	9,91%
300-4	7,588	6,027	1,561				
300-5	7,705	6,048	1,657				
350-1	8,341	6,794	1,547				
350-2	5,404	4,564	0,84				
350-3	8,153	6,597	1,556	1,3486	1,754	0,405	23,11%
350-4	7,427	6,155	1,272				
350-5	8,608	7,08	1,528				

Os resultados obtidos são apresentados graficamente na Figura 48.

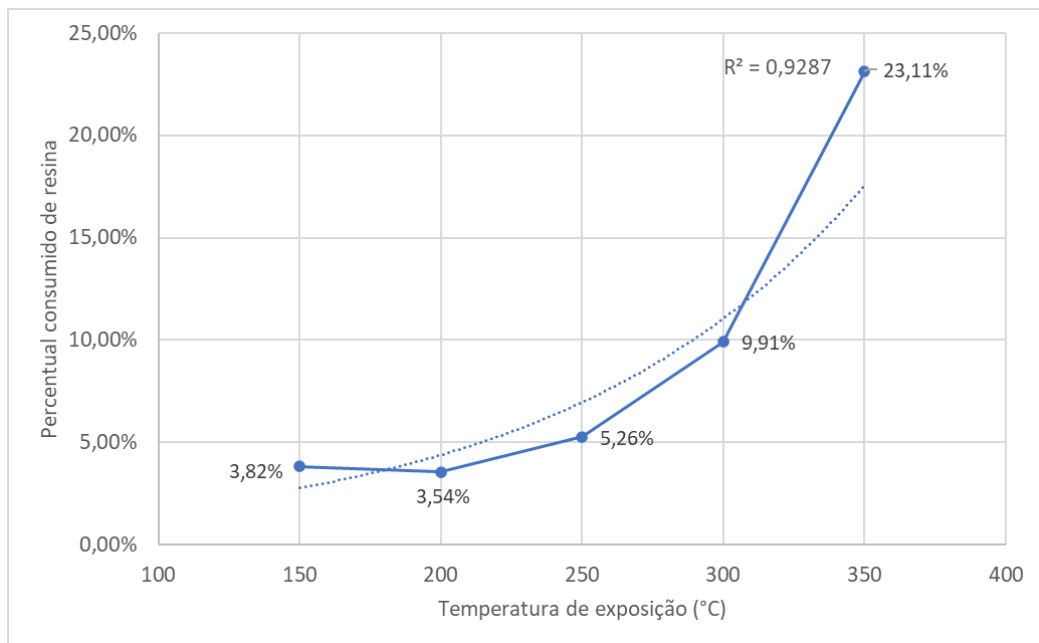


Figura 48: Consumo de resina em relação à condição ambiente

Como é possível perceber analisando-se a Figura 48, o comportamento obtido em relação ao acréscimo de temperatura foi de uma perda exponencial da resina. Enquanto nas temperaturas de 150 e 200 °C, a redução foi inferior a 4%, no patamar de 250 °C e nas temperaturas mais elevadas a perda de resina intensificou-se, chegando a alcançar o patamar de 23,11% quando aquecida em 350 °C.

Percebe-se que o comportamento obtido, de perda acentuada entre os 250 °C e 350 °C de fato se consolidou para a resistência à tração nos ensaios durante a exposição em elevadas temperaturas, destacando o fato de que o consumo de resina impactou na resistência obtida.

Bazli e Abolfazli (2020) citam que, quando as barras são expostas em temperaturas inferiores à temperatura de transição vítrea, pequenos impactos são verificados na matriz, não impactando na sua característica superficial ou seu comportamento mecânico. Observando tal afirmação, é possível notar que esse foi o comportamento verificado em termos de conservação da resina.

Os resultados obtidos por essa mensuração indireta também vão ao encontro do que as imagens geradas na microscopia eletrônica de varredura apontaram: conforme eleva-se a temperatura de exposição das barras, visivelmente nota-se que

a camada de resina que envolve as barras se torna menos espessa, apresentando as fibras de forma mais superficial.

5. CONCLUSÃO

Esse estudo envolveu a análise do comportamento das barras de GRFP em elevadas temperaturas. Após a exposição em ciclos de aquecimento, foi possível tecer considerações sobre o estudo, a serem descritas no item seguinte.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em relação ao objetivo específico a, de caracterizar as barras em seu comportamento mecânico em temperatura ambiente, percebeu-se que a resistência à tração média foi de 956,44 MPa e o módulo de elasticidade médio foi de 44,72 GPa. Dessa forma, a resistência à tração atendeu as premissas estabelecidas por Cardoso *et al.* (2021), e o módulo de elasticidade permaneceu abaixo do requerido, de 50 GPa. No que tange as demais características, enquanto o diâmetro efetivo encontrou-se abaixo dos limites estabelecidos pelas práticas recomendadas, o teor de fibra satisfaz esse documento, ao apresentar valor superior a 75%, atendendo consequentemente as normas que preconizam um teor mínimo de 70%.

A temperatura de transição vítrea obtida pela barra foi de 101,75 °C, encontrando-se, portanto, dentre as faixas de temperatura indicadas na literatura e indicadas nesse estudo.

O módulo de elasticidade e a resistência à tração axial durante as elevadas temperaturas, objeto de estudo do objetivo específico b, apresentaram maior decaimento do que na condição de ensaio após a temperatura. A resistência à tração durante o aquecimento chegou a apresentar 40% de redução, considerando a temperatura de 350 °C, sendo a maior avaliada nesse estudo. O módulo de elasticidade apresentou comportamento de decréscimo conforme as temperaturas eram ampliadas, não variando, no entanto, mais do que 8,3%. Percebeu-se, diante desse cenário, que por mais que tenha variado o valor de resistência à tração de forma significativa, o comportamento de deformação das barras frente ao incremento de carga foi estável, o que pode decorrer de uma maior influência da fibra para tal comportamento e menor influência da resina, que acabou por impactar mais na resistência última do conjunto.

Já em relação às propriedades mecânicas após o aquecimento e resfriamento, como o objetivo específico c, houve temperaturas nas quais se

verificou acréscimo na resistência à tração em relação ao valor inicial, o que pode ser atribuído ao fenômeno de pós cura da resina. A resistência à tração foi praticamente estável em todas as temperaturas avaliadas. Para o módulo de elasticidade ensaiado nessa condição, notou-se decréscimo aos 150 °C, que se acentuou aos 200 °C, porém, dos 250 °C em diante notou-se um incremento nessa variável, chegando aos 350 °C em um valor médio muito próximo ao inicial. Novamente destaca-se que o efeito de dano ou de benefício da resina (durante e após, conseqüentemente) guarda menor relação com o módulo de elasticidade, característica de influência predominante das fibras.

Considerando que a resina é o elemento com maior desgaste frente o avanço das temperaturas, foi realizado o ensaio para determinação do consumo de resina com base no ensaio de teor de fibras no qual foi possível perceber uma deterioração exponencial da resina, considerando seu maior impacto na temperatura de 350 °C, que chegou a superar 20% de consumo comparativamente com a temperatura ambiente. Cabe destacar que os resultados obtidos de consumo da resina concordam com a avaliação mecânica das barras e com as micrografias.

Em relação ao objetivo específico e, de avaliar microscopicamente as barras pelo ensaio de microscopia eletrônica de varredura, foi possível identificar por essa técnica falhas na resina de envoltória das fibras, maior incidência de ruptura das fibras com aumento da temperatura e maior incidência de danos. Além disso, foi possível perceber uma maior exposição das fibras, em decorrência do maior consumo da resina. Esse comportamento microestrutural percebido se relaciona de fato com o comportamento mecânico, especialmente considerando os ensaios durante elevada temperatura, uma vez que o consumo da resina nesse caso impactou de forma mais intensa na resistência à tração percebida.

5.2 SUGESTÃO PARA ESTUDOS FUTUROS

- a. Por mais que diversos estudos tenham abordado que a temperatura crítica ocorre na faixa de 300-350 °C, recomenda-se que especificamente nos ensaios após a exposição as elevadas temperaturas, que seja ampliada a faixa de avaliação;
- b. Avaliar o comportamento das barras em situações de pré-carregamento;
- c. Ampliar a análise com diferentes diâmetros de barra, verificando se há diferenças significativas no comportamento mecânico diante ação da temperatura;

d. Avaliar diferentes naturezas de resina e/ou tipos de tratamento superficial das barras;

e. Variar o tempo de exposição das barras após alcance da temperatura desejada para análise.

REFERÊNCIAS

ABED, F.; MEHAINI, Z.; OUCIF, C.; ABDUL-LATIF, A.; BALEH, R. Quasi-static and dynamic response of GFRP and BFRP bars under compression. **Composites Part C: Open Access**, [s. l.], v. 2, n. August, p. 100034, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100034>

ACI COMMITTEE 440. **ACI440.1R-15** Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2015. 88 p.

AL-THAIRY, H.; AL-HASNAWI, N. H.. Behavior and Failure Mode of GFRP bars RC Beams under Elevated Temperature. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 888, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/888/1/012012>

ALAJARMEH, O.; MANALO, A.; BENMOKRANE, B.; SCHUBEL, P.; ZENG, X.; AHMAD, A.; HASSANLI, R.; SORBELLO, C. D. Compression behavior of GFRP bars under elevated In-Service temperatures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 314, n. November, p. 2021–2022, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125675>

ALSALIHI, M.. **Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymer Bars After Exposure to Elevated Temperatures**. 159 f. 2014. University of Wisconsin – Milwaukee, 2014.

ALSAYED, S.; AL-SALLOUM, Y.; ALMUSALLAM, T.; EL-GAMAL, S.; AQUEL, M. Performance of glass fiber reinforced polymer bars under elevated temperatures. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 43, n. 5, p. 2265–2271, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.034>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D7205** (2021). Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.

____ **ASTM D792** (2020). Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

____ **ASTM E1131** (2020). Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

____ **ASTM D3418** (2021). Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.

ARCZEWSKA, P.; POLAK, M. A.; PENLIDIS, A. Degradation of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars in concrete environment. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 293, p. 123451, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123451>

AYDIN, F.; AKYÜREK, M.; ARSLAN, S.; YILMAZ, K. Effects of concrete cover thickness and concrete strength on temperature transfer in high temperature exposed FRP reinforced concrete. **Revista de la Construcción**, [s. l.], v. 22, n. 1, p. 242–258, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.7764/RDLC.22.1.242>

BANK, L. C. **FRP Confining**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9780470121429.ch11>

BAZLI, M.; ABOLFAZLI, M. Mechanical properties of fibre reinforced polymers under elevated temperatures: An overview. **Polymers**, [s. l.], v. 12, n. 11, p. 1–31, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym12112600>

BENMOKRANE, B.; MOUSA, S.; MOHAMED, K.; SAYED-AHMED, M. Physical, mechanical, and durability characteristics of newly developed thermoplastic GFRP bars for reinforcing concrete structures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 276, p. 122200, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122200>

BENMOKRANE, B.; MOHAMED, H.; AHMED, E. Recent developments on FRP rebars as internal reinforcement in concrete structures and field applications. **Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologie**, [s. l.], 2016.

BEURA, S.; THATOI, D. N.; CHAKRAVERTY, A. P.; MOHANTY, U. K. Impact of the ambient on GFRP composites and role of some inherent factors: A review report. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, [s. l.], v. 37, n. 8, p. 533–547, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0731684418754359>

BOLINA, F. L.; GIL, A. M.; FERNANDES, B.; HENNEMANN, G. G.; GONÇALVES, J.; TUTIKIAN, B. F. Influence of design durability on concrete columns fire performance. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 4968–4977, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.015>

BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P.R.L. **Patologia de estruturas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

CALLISTER, W.Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais 2**. [S. l.: s. n.], 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.22533/at.ed.635183010>

CARDOSO, D. C. T.; CARNIO, M. A.; FORTI, N. C. S.; CHRIST, R. **Estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras (FRP)**. 1ed. São Paulo: Editora Ibracon, 2021.

CARVELLI, V.; PISANI, M. A.; POGGI, C. High temperature effects on concrete members reinforced with GFRP rebars. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 54, n. 1, p. 125–132, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.05.013>

CHOWDHURY, E. U.; EEDSON, R.; GREEN, M. F.; BISBY, L. A.; BENICHO, N. Mechanical Characterization of Fibre Reinforced Polymers Materials at High Temperature. **Fire Technology**, [s. l.], v. 47, n. 4, p. 1063–1080, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10694-009-0116-6>

COUTO, I. A. **Análise Teórica E Experimental Do Comportamento Da Aderência Entre O Concreto E Barras De Fibra De Vidro Impregnada Por Polímero**. 141 f. 2007. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2007.

CUNHA, D. R. **Estudo da aderência de barras poliméricas reforçadas com fibras de vidro (GFRP) ao concreto**. 111 f. 2019. - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, [s. l.], 2019.

DALFRÉ, G. M.; MAZZÚ, A. D. E.; FERREIRA, F. G. S. Dimensionamento De Vigas De Concreto Armadas À Flexão Com Barras Não Metálicas. **Concreto & Construções**, [s. l.], v. XLVIII, n. 98, p. 72–78, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/1809-7197.2020.98.0007>

MOURA, R. C. A.; LIMA, P. R. L.; RIBEIRO, D. V.. Effect of Temperature on Mechanical Behavior of Concrete Reinforced with Different Types of GFRP Bar. **Polymers**, [s. l.], v. 14, n. 17, p. 1–21, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14173437>

DUAN, D.; OUYANG, L.; GAO, W.; XU, Q.; LIU, W.; YANG, J. Fire Performance of FRP-RC Flexural Members : **Polymers**, [s. l.], v. 14, n. 346, 2022.

EHRENBRING, H. Z. **Desenvolvimento de engineered cementitious composites (ECC) autocicatrizantes com diferentes fibras poliméricas e agentes de cicatrização**. 408 f. 2020. - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, [s. l.], 2020.

EKOLU, S. O. Model for natural carbonation prediction (NCP): Practical application worldwide to real life functioning concrete structures. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 224, n. June, p. 111126, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111126>

EL-HASSAN, H.; EL MAADDAWY, T. Microstructure Characteristics of GFRP Reinforcing Bars in Harsh Environment. **Advances in Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 2019, p. 19, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2019/8053843>

EL-SALAKAWY, E.; BENMOKRANE, B.; EL-RAGABY, A.; NADEAU, D. Field Investigation on the First Bridge Deck Slab Reinforced with Glass FRP Bars Constructed in Canada. **Journal of Composites for Construction**, [s. l.], v. 9, n. 6, p. 470–479, 2005. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2005\)9:6\(470\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2005)9:6(470))

EL GAMAL, S. E.; AL-FAHDI, A. M.; MEDDAH, M.; AL-SAYDY, A.; SOHEL, K.M. A. Flexural Behavior Of Frp Bars After Exposure To Elevated Temperatures. **Journal of Engineering Research**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 12–19, 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.53540/tjer.vol18iss1pp12-19>

ELLIS, D. S.; TABATABAI, H.; NABIZADEH, A. Residual tensile strength and bond properties of GFRP bars after exposure to elevated temperatures. **Materials**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 1–14, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma11030346>

FENG, G.; ZHU, D.; GUO, S.; RAHMAN, M. Z.; JIN, Z.; SHI, C. A review on mechanical properties and deterioration mechanisms of FRP bars under severe environmental and loading conditions. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 134, n. August 2021, p. 104758, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104758>

FU, Y. N.; ZHAO, J.; LI, Y. L. Research on tensile mechanical properties of GFRP rebar after high temperature. **Advanced Materials Research**, [s. l.], v. 181–182, p. 349–354, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.181-182.349>

GIBSON, A.G; MOURITZ, A.P. **Fire Properties of Polymer Composite Materials**. 1. ed. Dordrecht: Springer, 2006.

GIL, A. M.; PACHECO, F.; CHRIST, R.; BOLINA; F. L.; KHAYAT, K. H. TUTIKIAN, B. F. Comparative study of concrete panels' fire resistance. **ACI Materials Journal**, [s. l.], v. 114, n. 5, p. 755–762, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.14359/51689715>

GOORANORIMI, O.; CLAURE, G.; DE CASO, F.; SUARIZ; W.; NANNI, A. Post-Fire Behavior of GFRP Bars and GFRP-RC Slabs. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 30, n. 3, p. 04017296, 2018. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002168](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002168)

GOURI, M. L.; NAZZER, M.; NIZAD, A.; SURESH, S. Fibre reinforced concrete - A state-of-the-art review. **International Journal of Earth Sciences and Engineering**, [s. l.], n. October, p. 1–9, 2009.

HAJILOO, H.; GREEN, M. F.; GALES, J. Mechanical properties of GFRP reinforcing bars at high temperatures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 162, p. 142–154, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.025>

HAMAD, R.J. A.; JOHARI, M. A.M.; HADDAD, R. H. Mechanical properties and bond characteristics of different fiber reinforced polymer rebars at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 142, p. 521–535, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.113>

JABBAR, S.A.A.; FARID, S.B.H. Replacement of steel rebars by GFRP rebars in the concrete structures. **Karbala International Journal of Modern Science**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 216–227, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.kijoms.2018.02.002>

KASHWANI, G. A.; AL-TAMIMI, A. K. Evaluation of FRP bars performance under high temperature. **Physics Procedia**, [s. l.], v. 55, p. 296–300, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.07.043>

KOBRAEI, M.; JUMAAT, M. Z. Using FRP-bars in Concrete Beams: A General Review. **Technical Postgraduates International Conference**, [s. l.], n. June, 2009.

LEE, J. Y.; LIM, A.; KIM, J.; KIM, J. Bond behaviour of GFRP bars in high-strength concrete: Bar diameter effect. **Magazine of Concrete Research**, [s. l.], v. 69, n. 11, p. 541–554, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/jmacr.15.00403>

LIU, Y.; ZHANG, H. T.; ZHAO, H. H.; LU, L.; HAN, M. Y.; WANG, J. C.; GUAN, S. Experimental Study on Mechanical Properties of Novel FRP Bars with Hoop Winding Layer. **Advances in Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 2021, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2021/9554687>

LU, J.; AFEFY, H. M.; AZIMI, H.; SENNAH, K.; SAYED-AHMED, M. Bond performance of sand-coated and ribbed-surface glass fiber reinforced polymer bars in high-performance concrete. **Structures**, [s. l.], v. 34, n. November 2019, p. 10–19, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.060>

MANICA, G. C.; BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F.; OLIVEIRA, M.; MOREIRA, M. A. Influence of curing time on the fire performance of solid reinforced concrete plates. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 2506–2512, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.081>

MASMOUDI, A.; OUEZDOU, M. B.; DAOUD, A.; MASMOUDI, R. Durability of GFRP bars under high temperature in dry environment. [s. l.], n. May, 2009.

MASMOUDI, R.; ZAIDI, A.; GÉRARD, P. Transverse Thermal Expansion of FRP Bars Embedded in Concrete. **Journal of Composites for Construction**, [s. l.], v. 9, n. 5, p. 377–387, 2005. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2005\)9:5\(377\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2005)9:5(377))

MOHAMED, N.; FARGHALY, A. S.; BENMOKRANE, B.; NEALE, K. W. Evaluation of GFRP-reinforced shear walls. **Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering**, [s. l.], v. 4, n. January, p. 2890–2899, 2013.

MOHAMEDIEN, M. A.; HOSNY, A. H.; ABDELRAHMAN, A. Use of FRP in Egypt, research overview and applications. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 54, p. 2–21, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.003>

MORALES, C. N.; CLAURE, G.; EMPARANZA, A. R.; NANNI, A. Durability of GFRP reinforcing bars in seawater concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 270, n. April, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121492>

MOURA, R.C.A.; RIBEIRO, D.V.; LIMA, P.R.L. Microstructural evaluation of GFRP bars subjected to severe environments. **9th international conference on concrete under severe conditions-environment & loading**, [s. l.], n. January, p. 0–10, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.31808/5ca6e03d5ca4f0d406ac88a8>

MOURA, R. C. A.; LIMA, P. R. L.; RIBEIRO, D. V. Effect of Temperature on Mechanical Behavior of Concrete Reinforced with Different Types of GFRP Bar.

Polymers, [s. l.], v. 14, n. 17, p. 1–21, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14173437>

MUHAMMAD, A. M.; AHMED, F. R. Evaluation of deflection and flexural performance of reinforced concrete beams with glass fiber reinforced polymer bars. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 18, n. December 2022, p. e01855, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01855>

NAJAFABADI, E. P.; OSKOU EI, A. V.; KHANEGHAHI, M. H.; SHOAEI, P.; OZBAKKALOGLU, T. The tensile performance of FRP bars embedded in concrete under elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 211, p. 1138–1152, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.239>

NEPOMUCENO, E.; SENA-CRUZ, J.; CORREIA, L.; D'ANTONIO, T. Review on the bond behavior and durability of FRP bars to concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 287, p. 123042, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123042>

NIGRO, E.; CAFARELLI, G.; BILOTTA, A.; MANFREDI, G.; COSENZA, E. Fire resistance of concrete slabs reinforced with FRP bars. Part II: Experimental results and numerical simulations on the thermal field. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 42, n. 6, p. 1751–1763, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.02.026>

ORTOLAN, V. K. **Estudo de matriz cimentícia reforçada com fibra têxtil para uso em painéis**. 288 f. 2021. - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, [s. l.], 2021.

PROTCHENKO, K.; SZMIGIERA, E.; URBANSKI, M.; GARBACZ, A.; NARLOCH, P.; LESNIAK, P. State-of-the-Art on Fire Resistance Aspects of FRP Reinforcing Bars. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 661, n. 1, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/661/1/012081>

RAVIKUMAR, C. S.; RAMASAMY, V.; THANDAVAMOORTHY, T. S. Effect of fibers in concrete composites. **International Journal of Applied Engineering Research**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 419–430, 2015.

REICHENBACH, S.; PREINSTORFER, P.; HAMMERL, M.; KROMOSER, B. A review on embedded fibre-reinforced polymer reinforcement in structural concrete in Europe. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 307, n. September, p. 124946, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124946>

RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; TUTIKIAN, B. F.; SOUZA, C. A. C.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z.; CASUDO, O.; HELENE, P. **Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle, técnicas de análise e intervenção**. 2ªed. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2018. 416 f. ISBN 978-85-3527-487-5

ROBERT, M.; BENMOKRANE, B. Behaviour of GFRP reinforcing bars subjected to extreme temperatures. **Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering**, [s. l.], v. 3, n. August, p. 1587–1596, 2010. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000092](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000092)

ROSA, I. C.; FIRMO, J. P.; CORREIA, J. R.; BARROS, J. A. O.; Bond behaviour of sand coated GFRP bars to concrete at elevated temperature – Definition of bond vs. slip relations. **Composites Part B**, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.020>.

ROSA, I. C.; SANTOS, P.; FIRMO, J. P.; CORREIA, J. R. Fire behaviour of concrete slab strips reinforced with sand-coated GFRP bars. **Composite Structures**, [s. l.], v. 244, n. March, p. 112270, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112270>

SALEH, N.; ASHOUR, A.; SHEEHAN, T. Bond between glass fibre reinforced polymer bars and high - strength concrete. **Structures**, [s. l.], v. 22, n. July, p. 139–153, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.08.003>

SCHARTEL, B.; BALABANOVICH, A. I.; BRAUN, U.; KNOLL, U.; ARTNER, J.; CIESIELSKI, M.; DÖRING, M.; PEREZ, R.; SANDLER, J. K. W.; ALTSTÄDT, V.; HOFFMANN, T.; POSPIECH, D. Pyrolysis of Epoxy Resins and Fire Behavior of Epoxy Resin Composites Flame-Retarded with 9,10-Dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide Additives. **Journal of Applied Polymer Science** [s. l.], v.104, p. 2260-2269, 2007. Disponível em: DOI 10.1002/app.25660

SCHNEIDER, D. **Desenvolvimento de fibras metálicas espaciais e avaliação experimental do comportamento de compósitos de concretos com adições híbridas de fibras**. 86 f. 2016. - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, [s. l.], 2016.

SERUTI, C.A. **Caracterização mecânica e desempenho estrutural de elementos pultrudados**. 147 f. 2013. - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2013.

SHARIFIANJAZI, F.; PARHAM, Z.; BAZLI, M.; ESMAEILKHANIAN, A.; RAHMANI, R.; BAZLI, L.; KHAKSAR, S. Fibre-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Members under Elevated Temperatures: A Review on Structural Performance. **Polymers**, [s. l.], v. 14, n. 3, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14030472>

SPAGNUOLO, S.; MEDA, A.; RINALDI, Z.; NANNI, A. Residual behaviour of glass FRP bars subjected to high temperatures. **Composite Structures**, [s. l.], v. 203, n. July, p. 886–893, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.077>

TEIXEIRA, B. A. C. **Avaliação do comportamento de vigas de concreto armadas concreto armadas com barras de fibra de vidro – um estudo experimental**. 179 f. 2018. - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2018.

TEKLE, B. H.; KHENNANE, A.; KAYALI, O. Bond Properties of Sand-Coated GFRP Bars with Fly Ash–Based Geopolymer Concrete. **Journal of Composites for**

Construction, [s. l.], v. 20, n. 5, 2016. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000685](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000685)

WANG, Y.C.; WONG, P.M.H.; KODUR, V.K.R. Mechanical properties of FRP reinforcing bars at elevated temperatures. **ASCE/SFPE Specialty Conference of Designing Structures for Fire**, [s. l.], p. 1–10, 2003.

WANG, Xiaolu; ZHA, Xiaoxiong. Experimental research on mechanical behavior of GFRP bars under high temperature. **Applied Mechanics and Materials**, [s. l.], v. 71–78, p. 3591–3594, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.71-78.3591>

WEBER, A. Fire-resistance tests on composite rebars. **Proceedings of the 4th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2008**, [s. l.], p. 22–24, 2008.

WORNER, V. J. Use of Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP) reinforcing bars for concrete bridge decks. [s. l.], p. 137, 2015.

YANG, F.; YAO, P. Effect of temperature on tensile mechanical properties of GFRP bars with different diameters. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s. l.], v. 189, n. 3, p. 0–4, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/189/3/032068>

ZHANG; LI; WU. Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Polymer (FRP). [s. l.], p. 1–16, 2023.

ZHOU, C.; PAN, J.; ZHANG, Z.; ZHU, Y. Comparative study on the tensile mechanical behavior of GFRP bars under and after high temperature exposure. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 16, n. January, p. e00905, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00905>

APÊNDICE A – GRÁFICOS RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE REFERÊNCIA

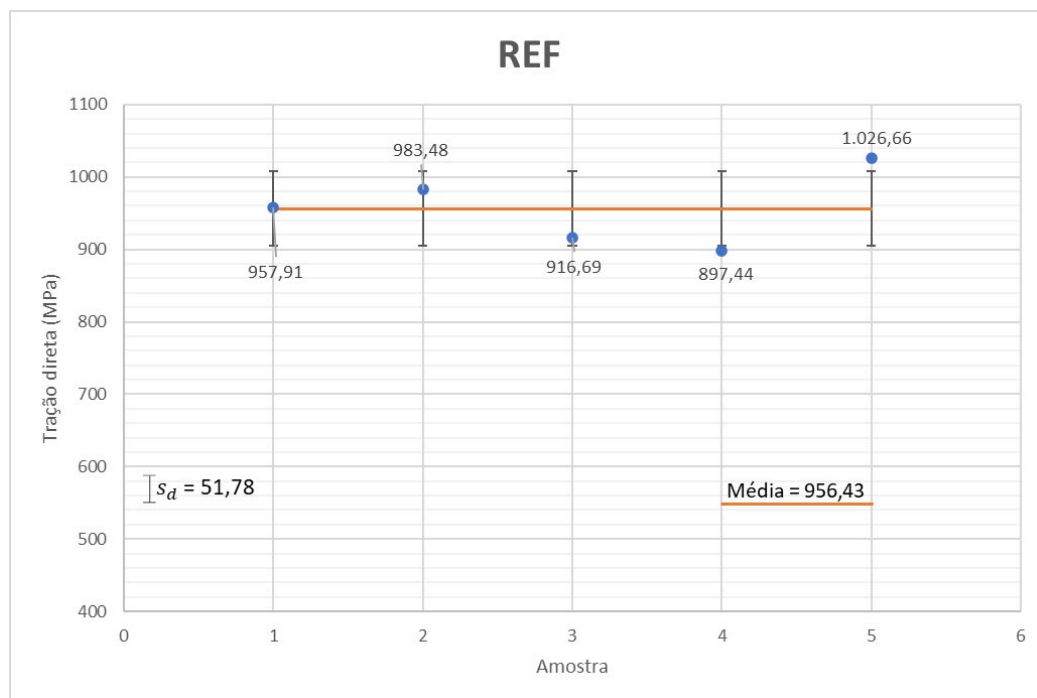


Gráfico A-1: Resistência à tração axial Referência

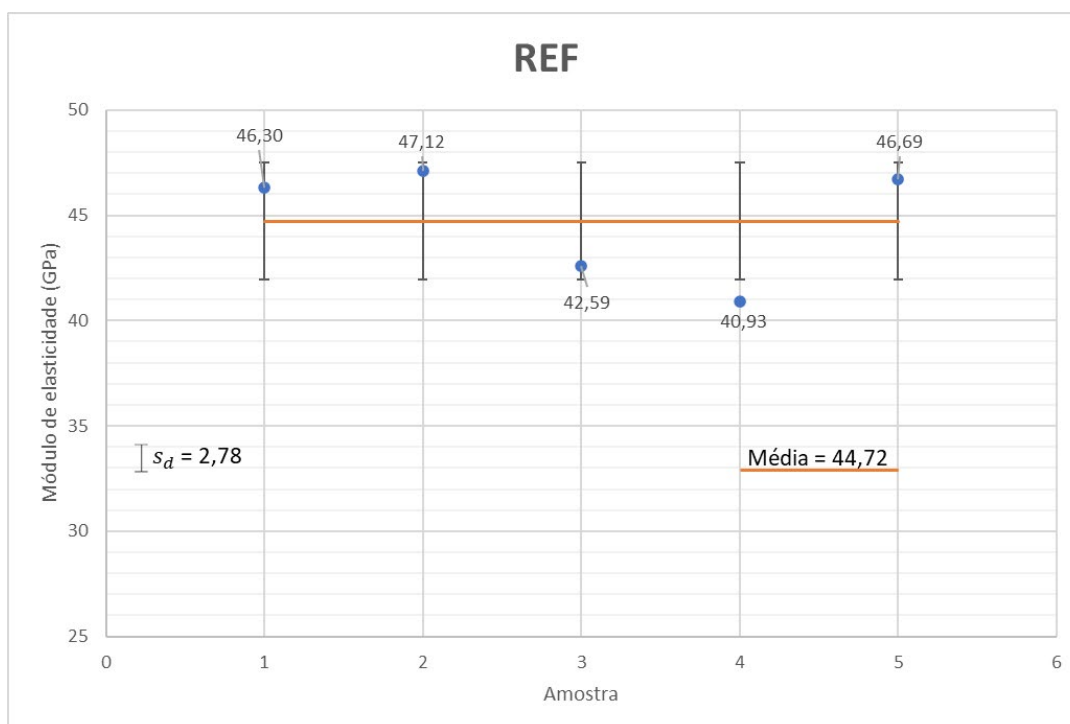


Gráfico A-2: Módulo de elasticidade (GPa) Referência

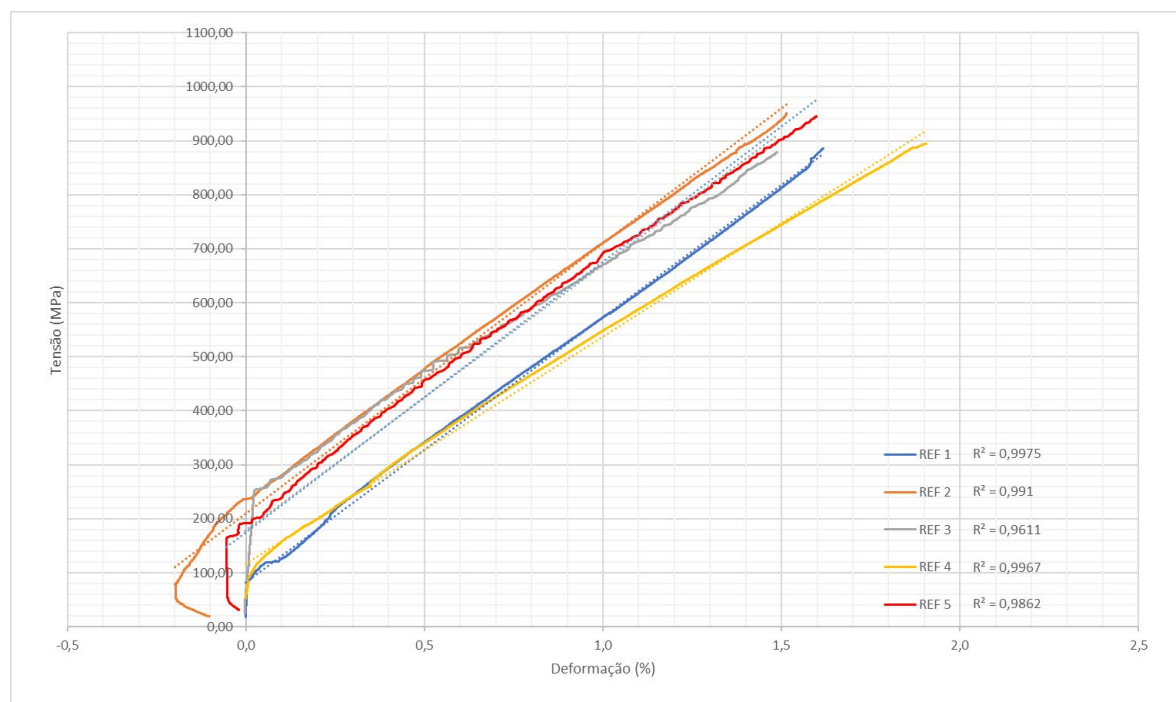


Gráfico A-3: Curva do Módulo de elasticidade (GPa) Referência

APÊNDICE B – GRÁFICOS RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DURANTE E PÓS EXPOSIÇÃO

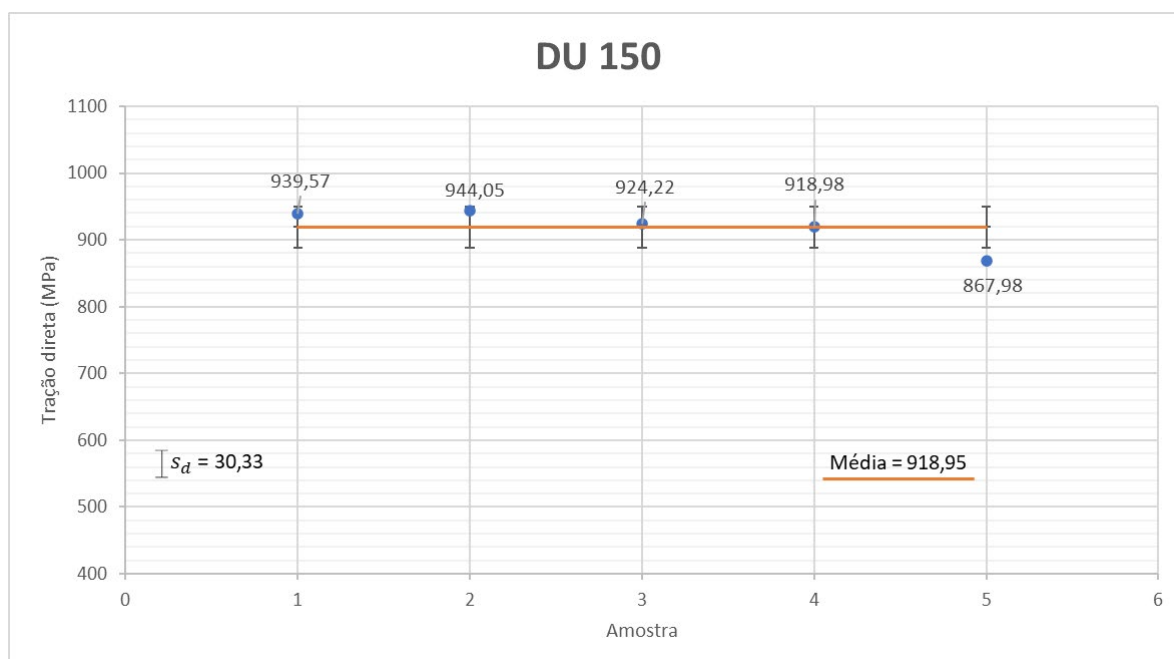


Gráfico B-1: Resistência à tração axial durante exposição em temperatura de 150 °C

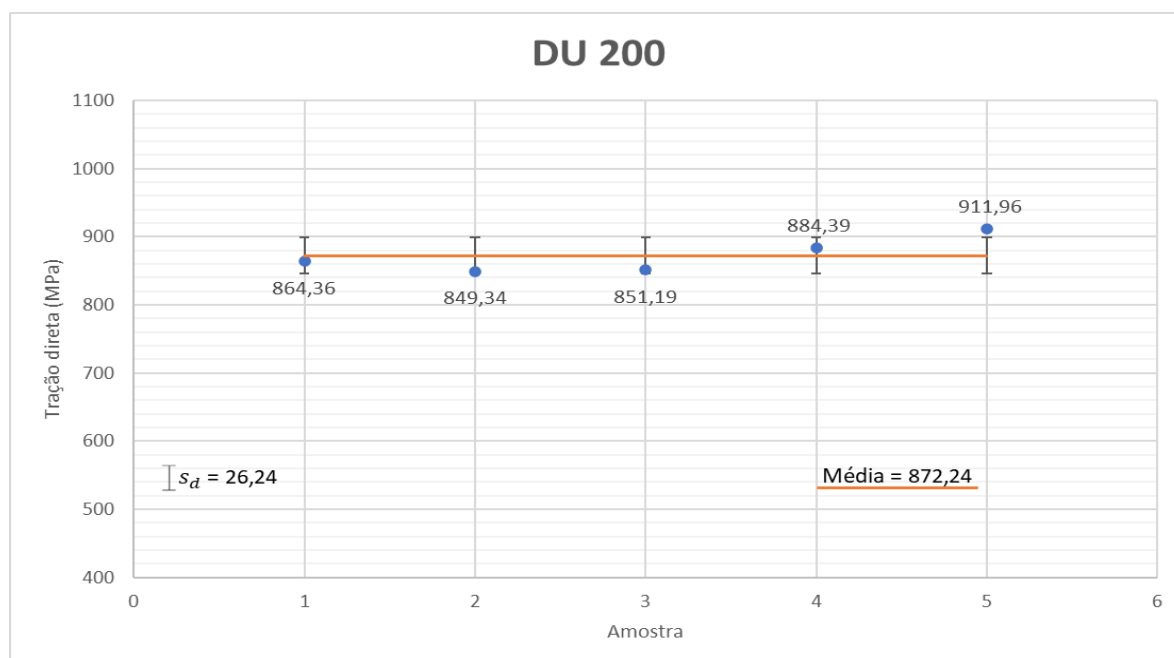


Gráfico B-2: Resistência à tração axial durante exposição em temperatura de 200 °C

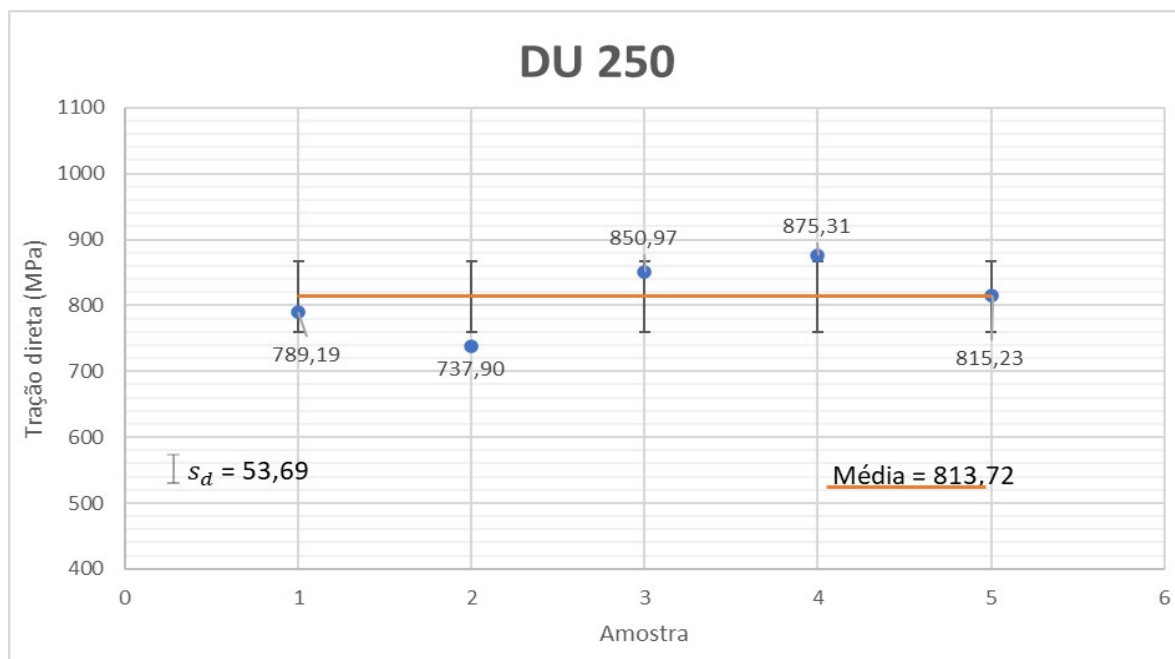


Gráfico B-3: Resistência à tração axial durante exposição em temperatura de 250 °C

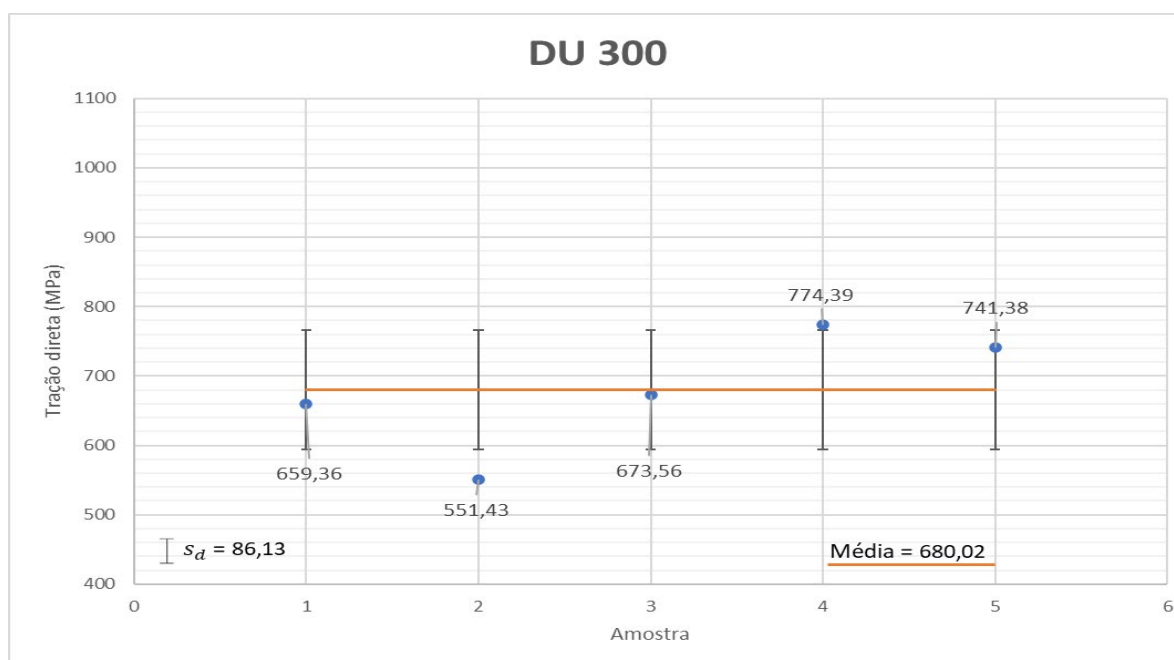


Gráfico B-4: Resistência à tração axial durante exposição em temperatura de 300 °C

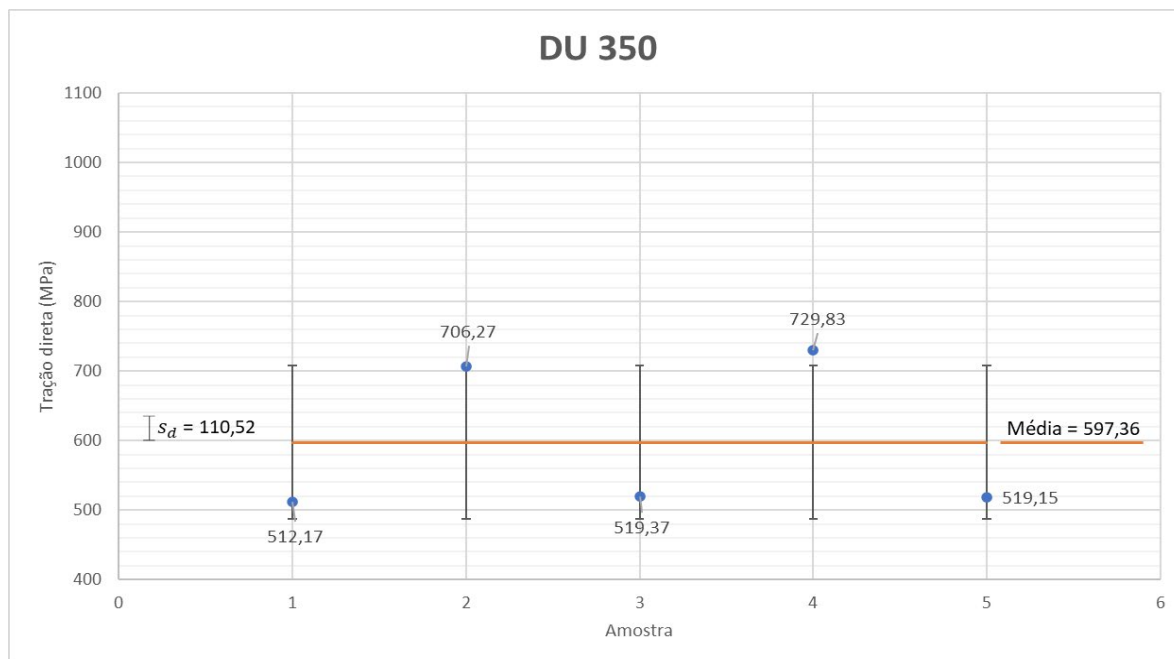


Gráfico B-5: Resistência à tração axial durante exposição em temperatura de 350 °C

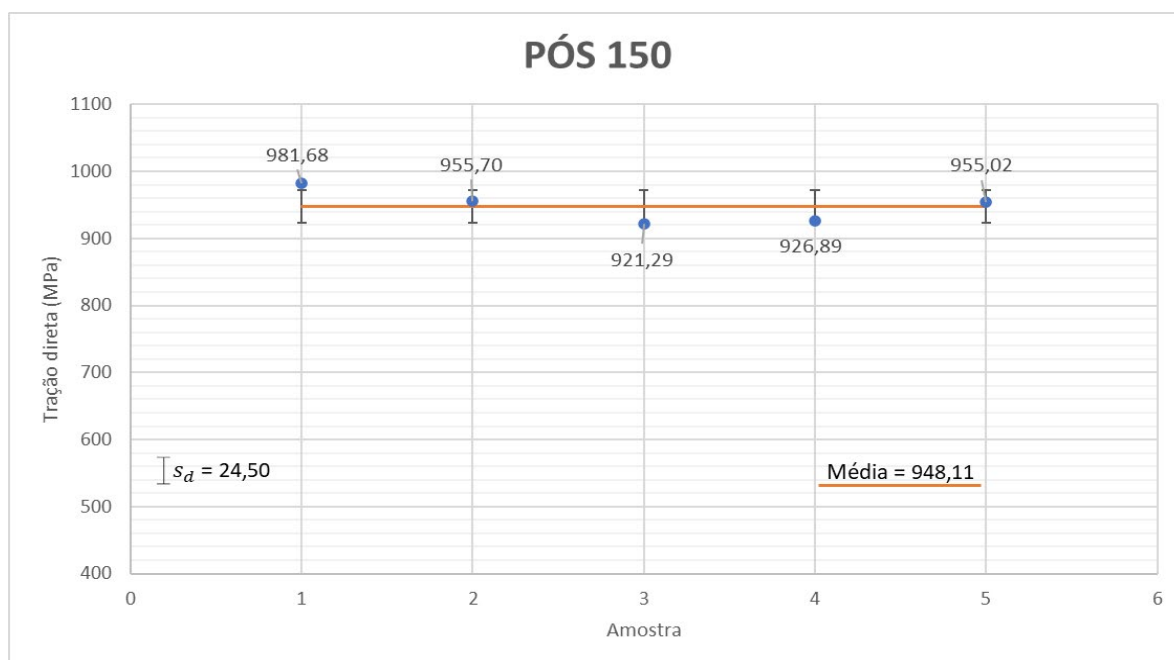


Gráfico B-6: Resistência à tração axial após exposição em temperatura de 150 °C

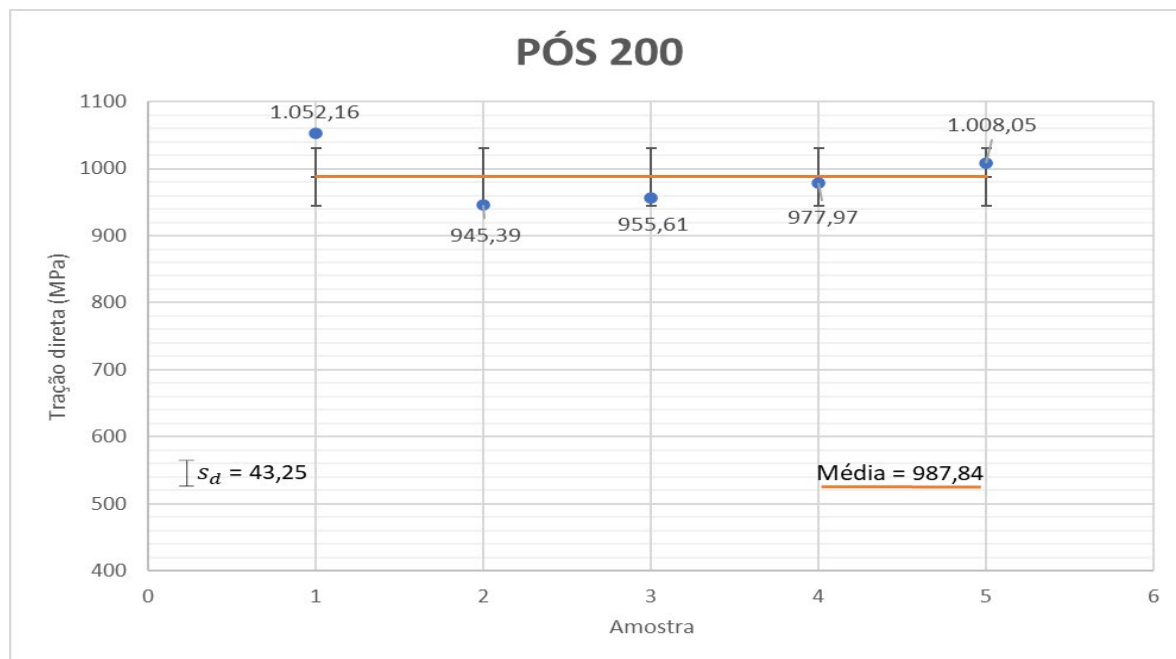


Gráfico B-7: Resistência à tração axial após exposição em temperatura de 200 °C

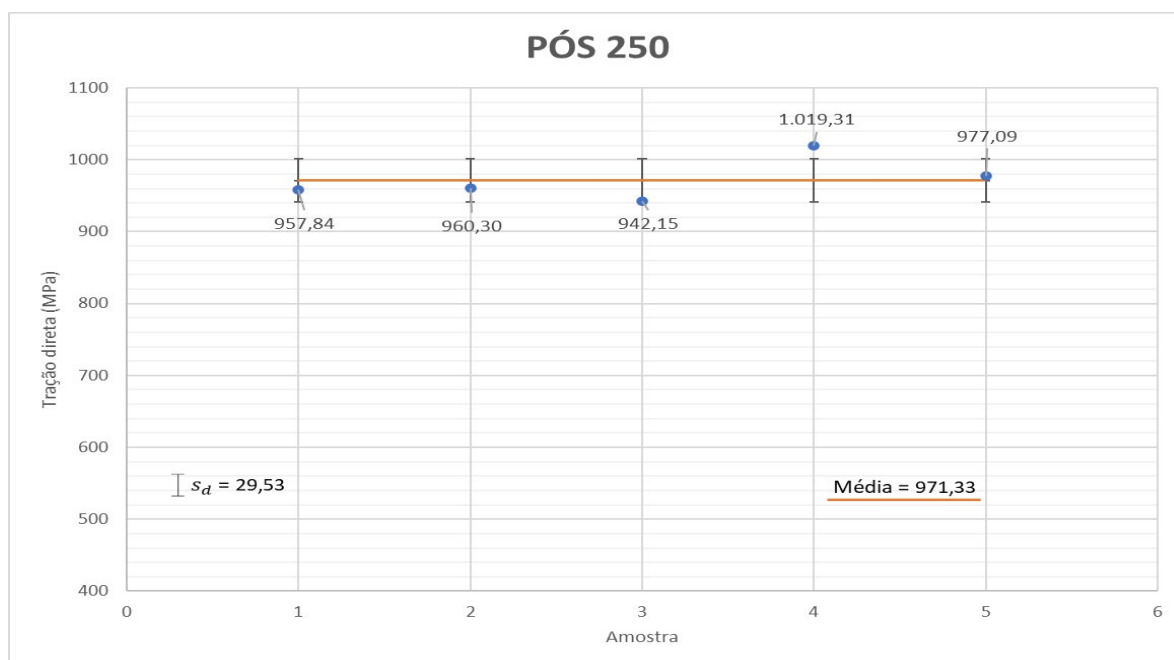


Gráfico B-8: Resistência à tração axial após exposição em temperatura de 250 °C

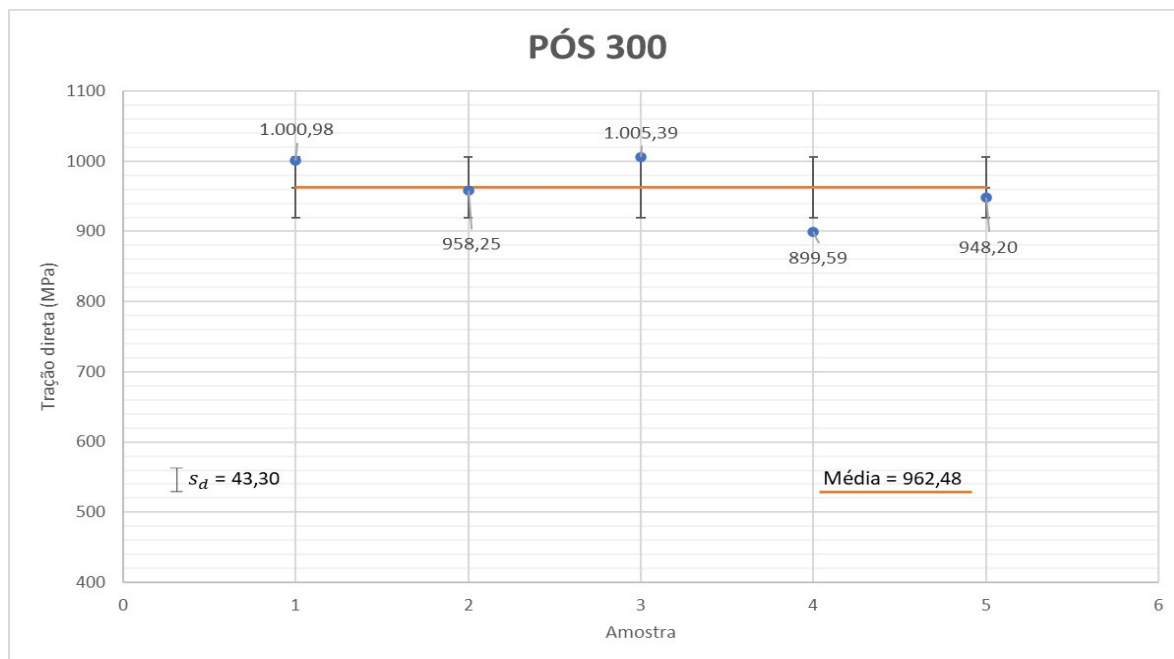


Gráfico B-9: Resistência à tração axial após exposição em temperatura de 300 °C

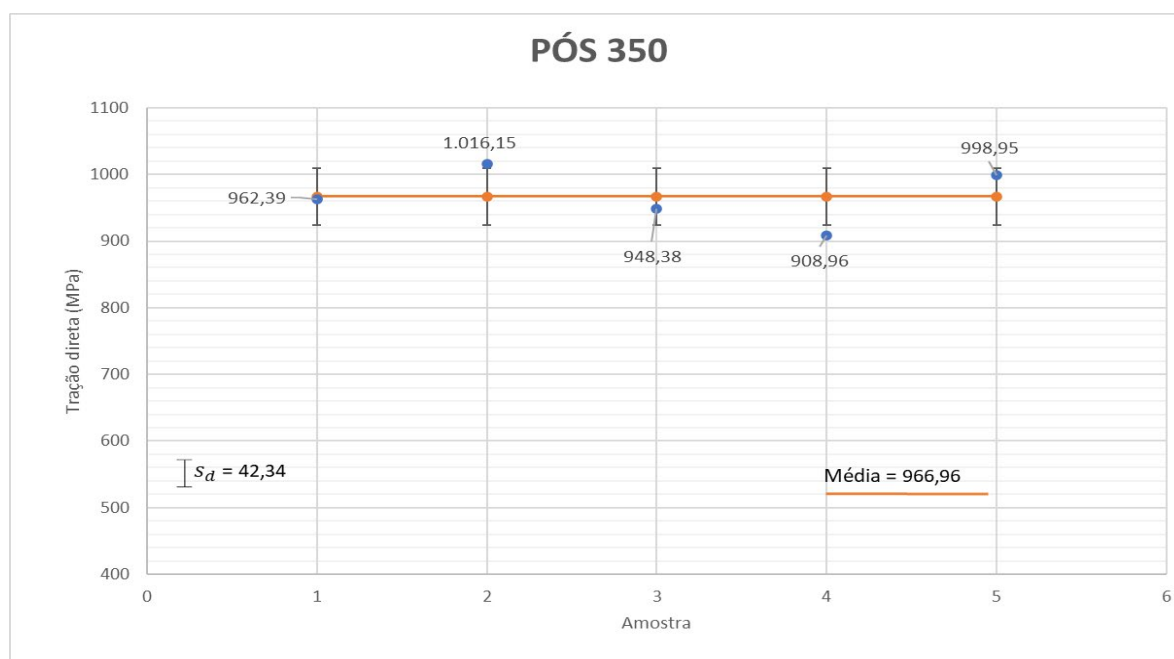


Gráfico B-10: Resistência à tração axial após exposição em temperatura de 350 °C

APÊNDICE C – GRÁFICOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DURANTE E PÓS EXPOSIÇÃO

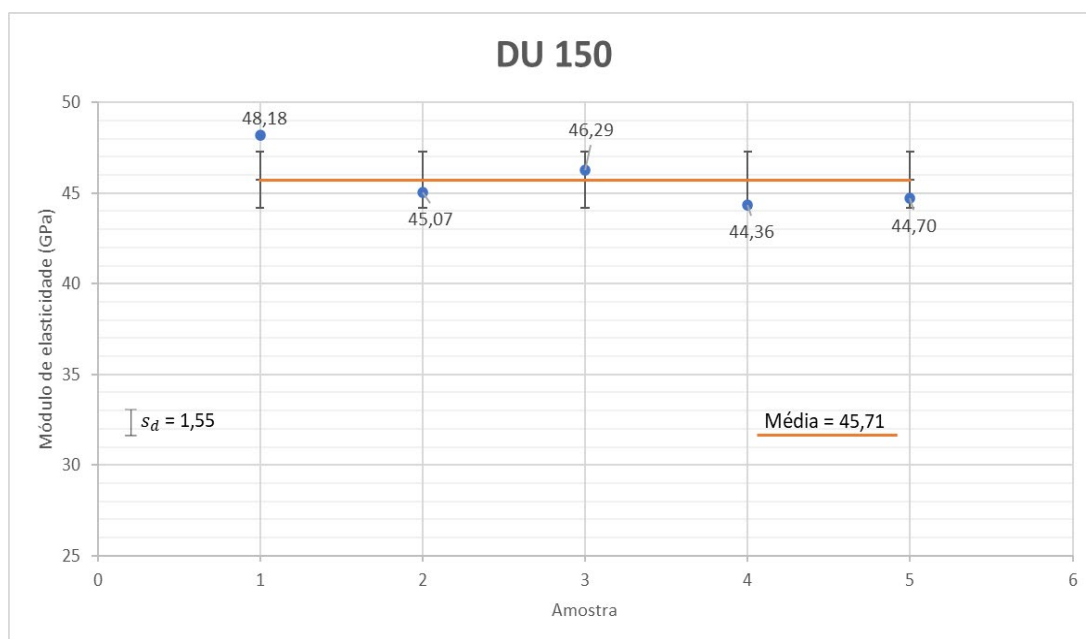


Gráfico C-1: Módulo de elasticidade (GPa)- Amostras durante a exposição à temperatura de 150 °C

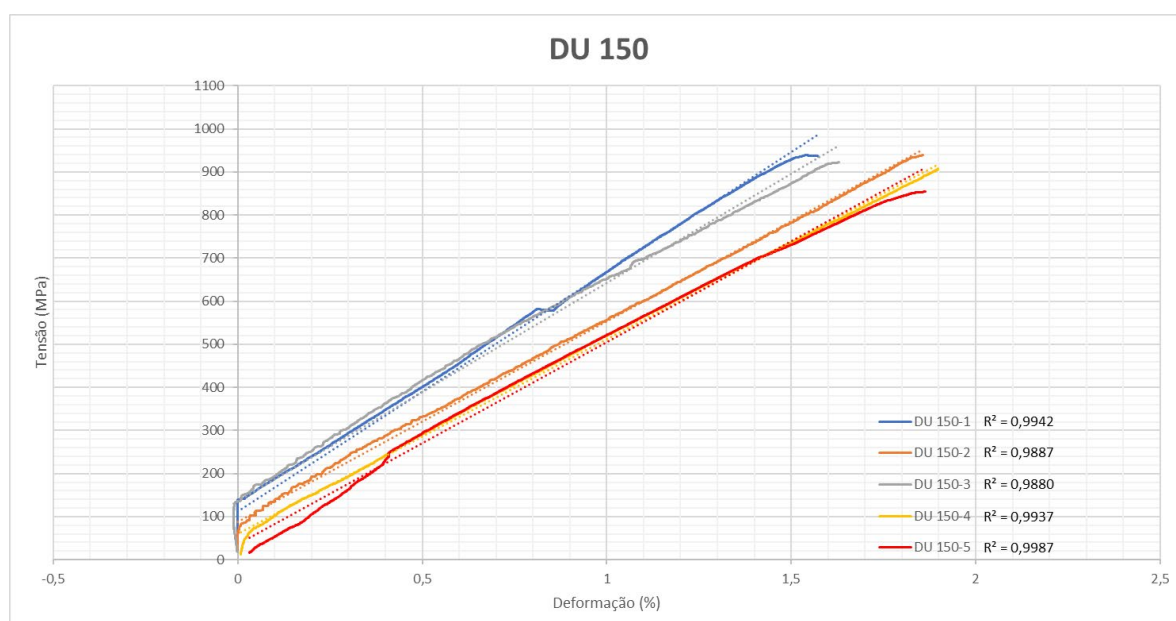


Gráfico C-2: Curva do Módulo de elasticidade (GPa)- Amostras durante a exposição à temperatura de 150 °C

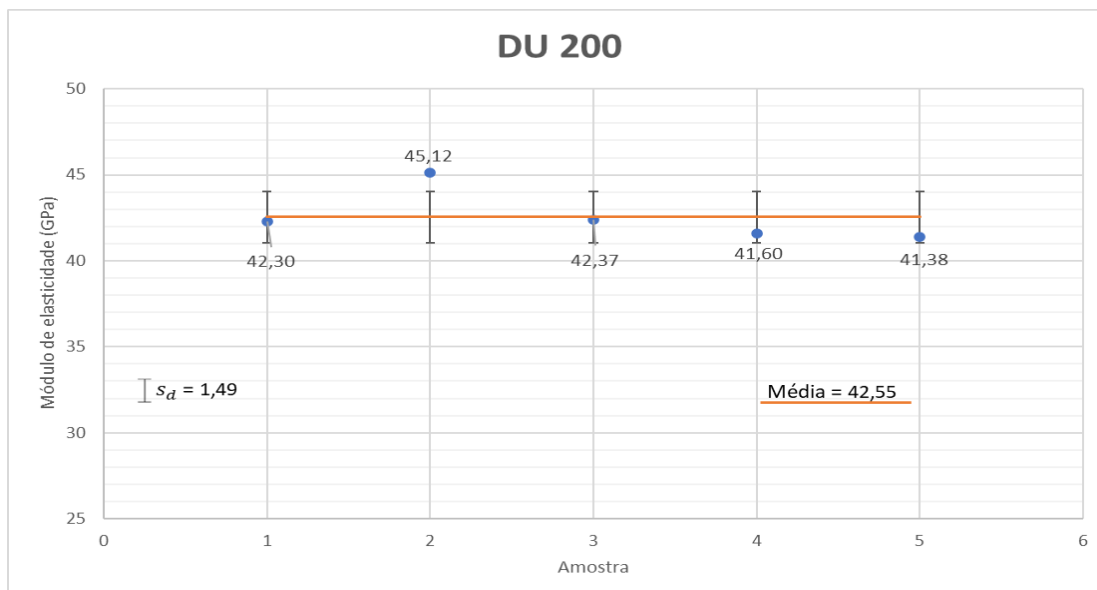


Gráfico C-3: Módulo de elasticidade (GPa)- Amostras durante a exposição à temperatura de 200 °C

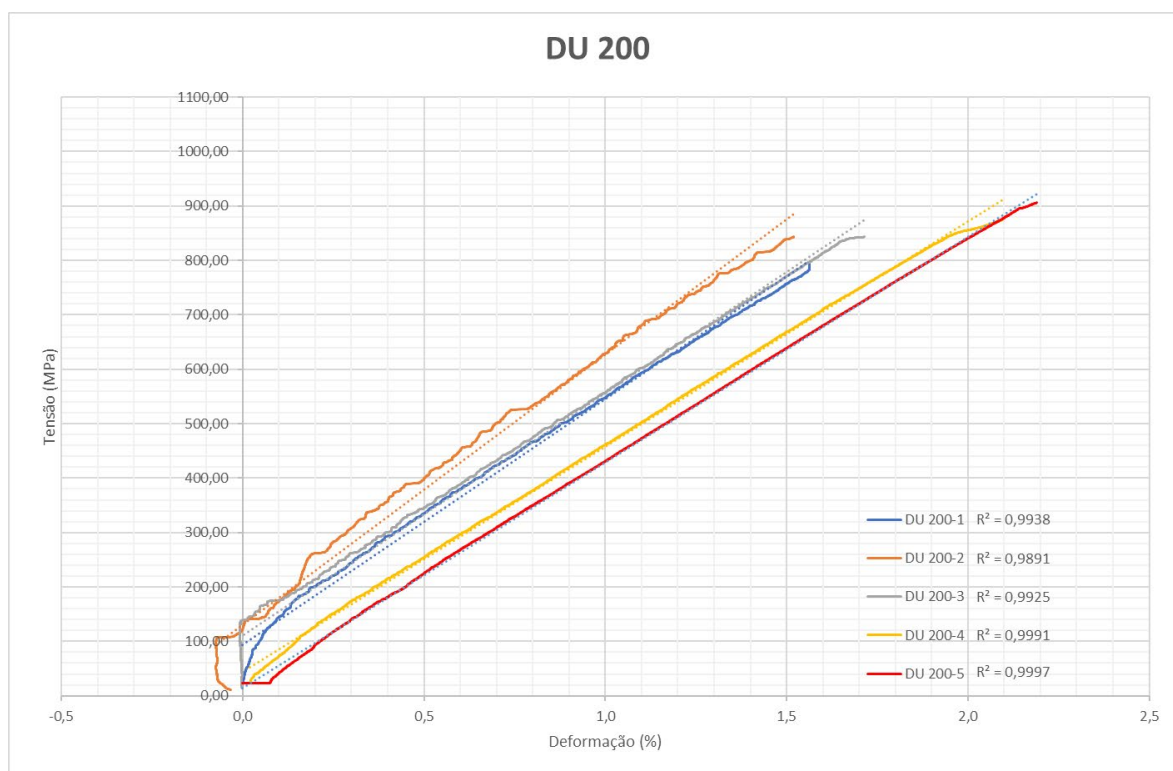


Gráfico C-4: Curva do Módulo de elasticidade (GPa)- Amostras durante a exposição à temperatura de 200 °C

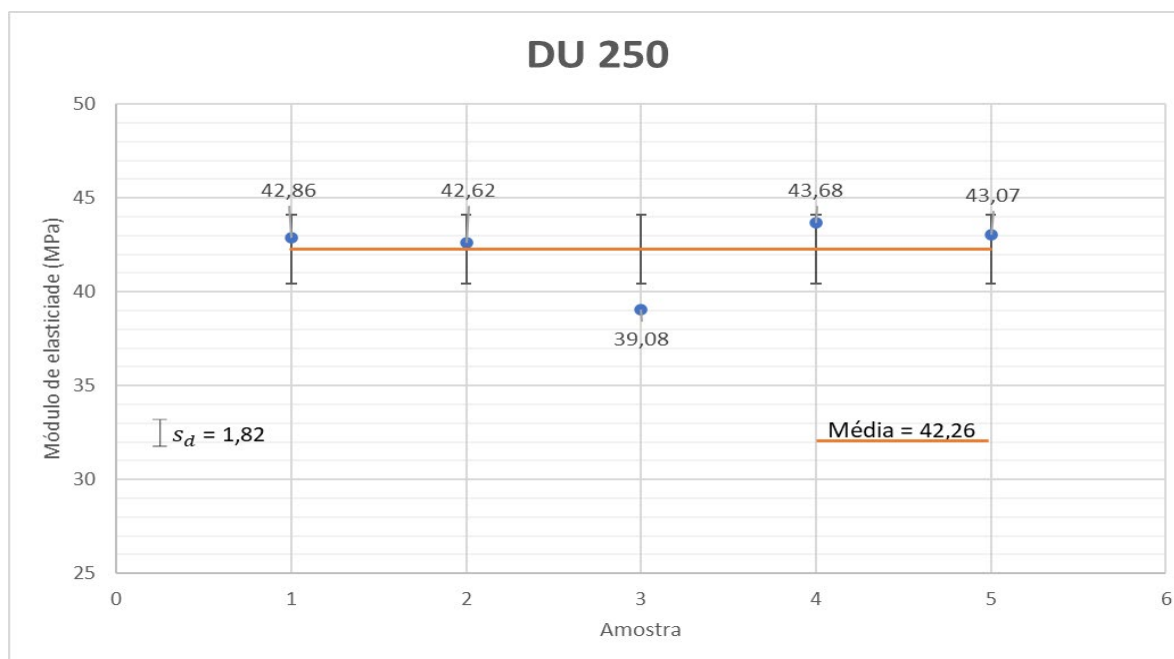


Gráfico C-5: Módulo de elasticidade (GPa)- Amostras durante a exposição à temperatura de 250 °C

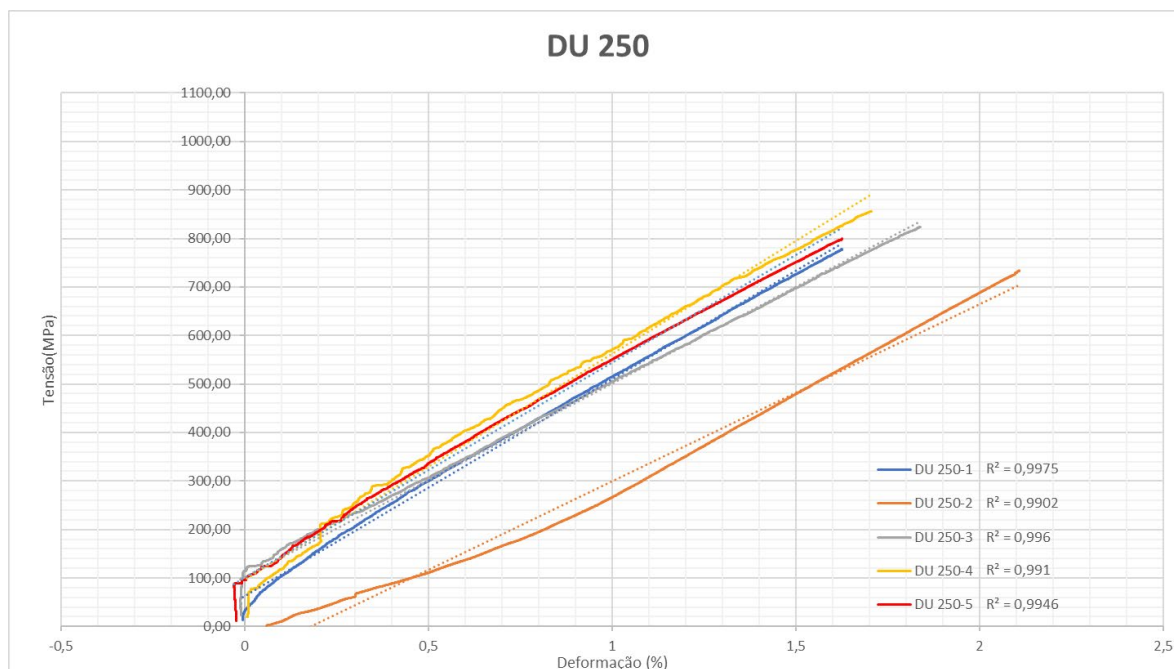


Gráfico C-6: Curva do Módulo de elasticidade (GPa)- Amostras durante a exposição à temperatura de 250 °C

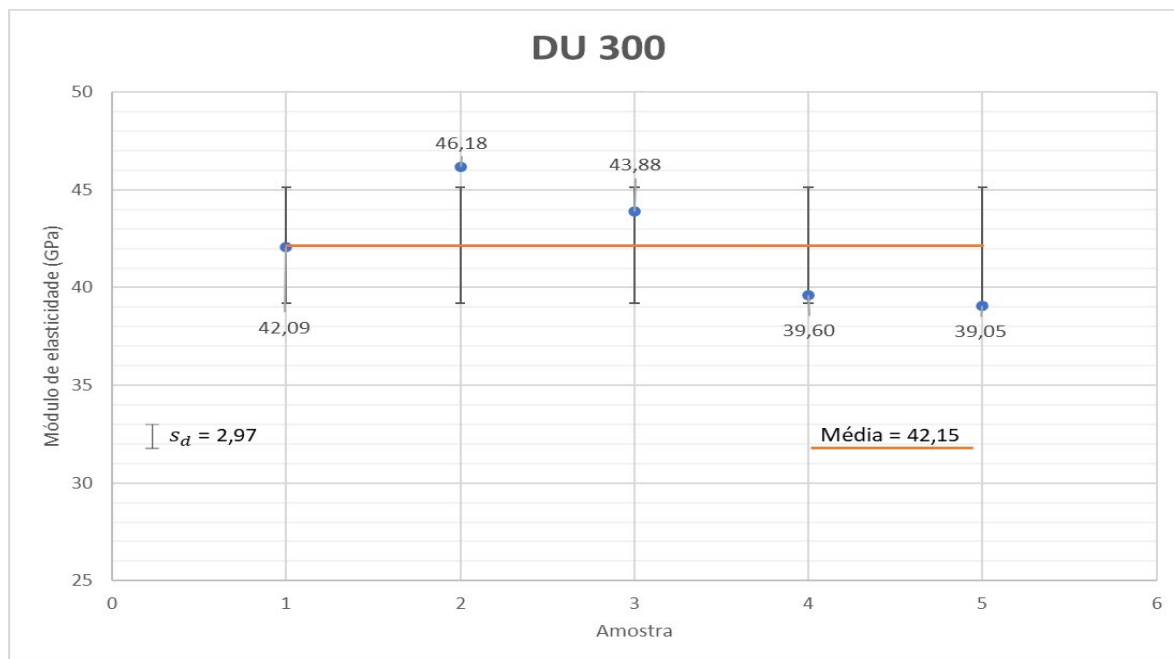


Gráfico C-7: Módulo de elasticidade (GPa)- Amostras durante a exposição à temperatura de 300 °C



Gráfico C-8: Curva do Módulo de elasticidade (GPa)- Amostras durante a exposição à temperatura de 300 °C

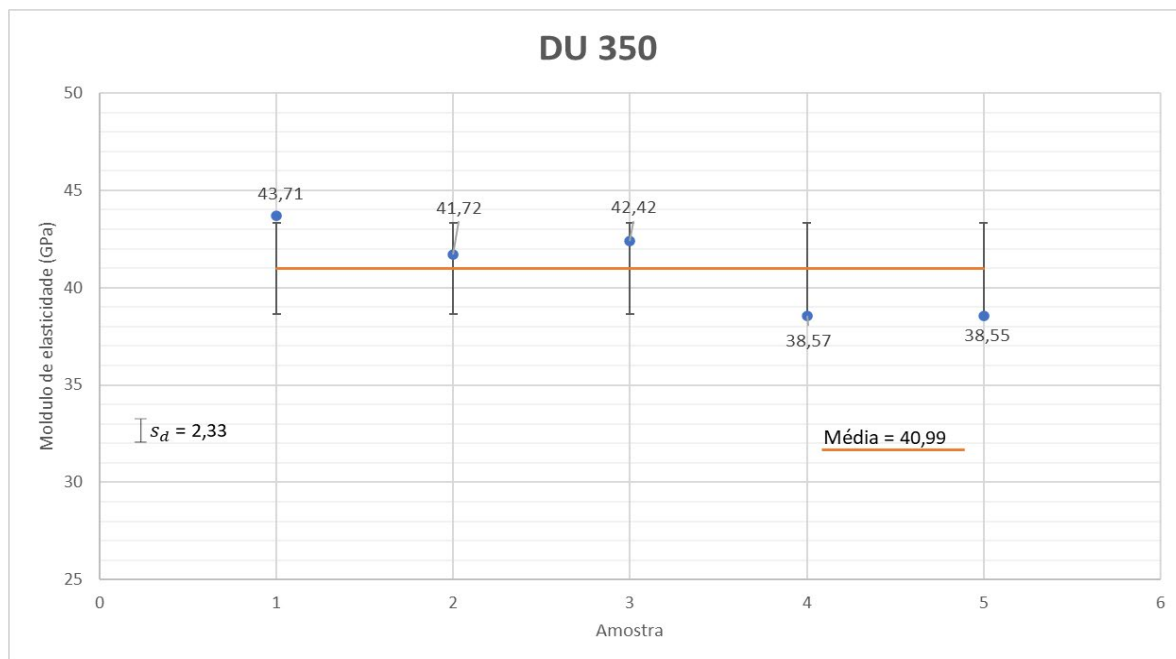


Gráfico C-9: Módulo de elasticidade (GPa)- Amostras durante a exposição à temperatura de 350 °C

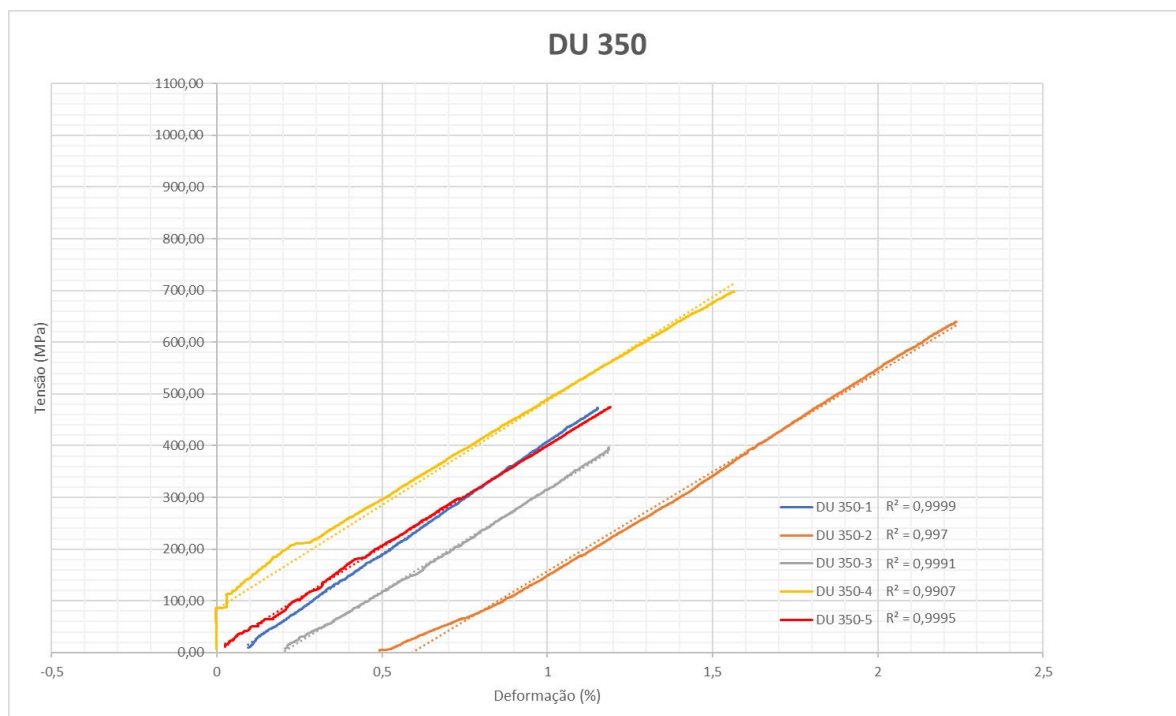


Gráfico C-10: Curva do Módulo de elasticidade (GPa)- Amostras durante a exposição à temperatura de 350 °C

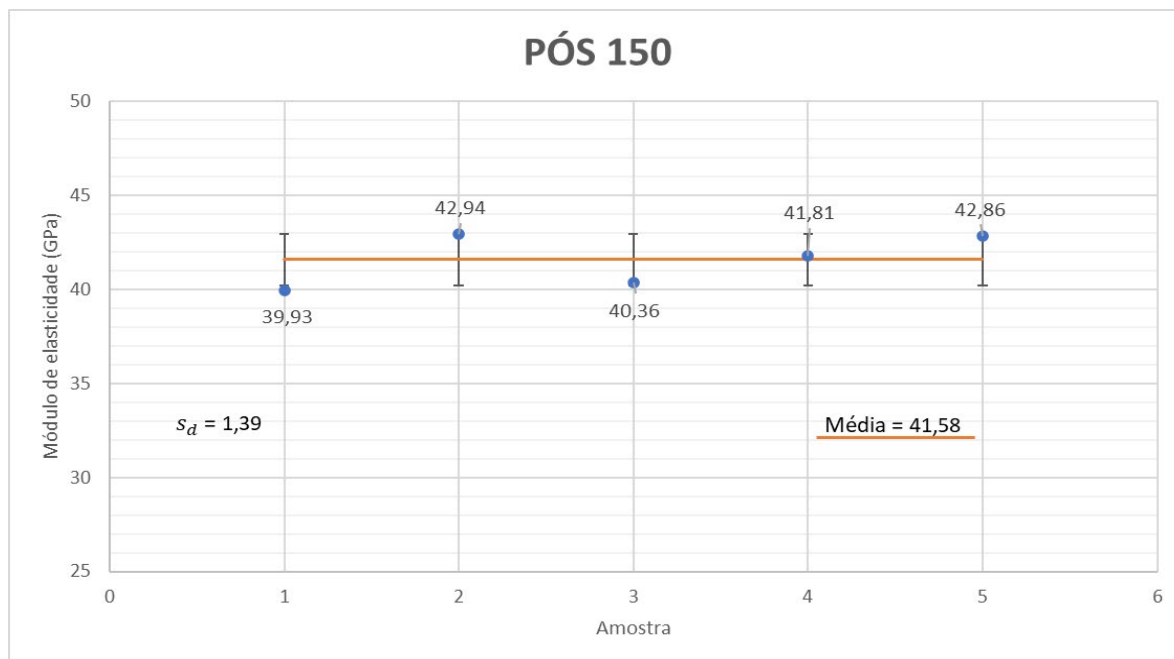


Gráfico C-11: Módulo de elasticidade (GPa)- Amostras após a exposição à temperatura de 150 °C

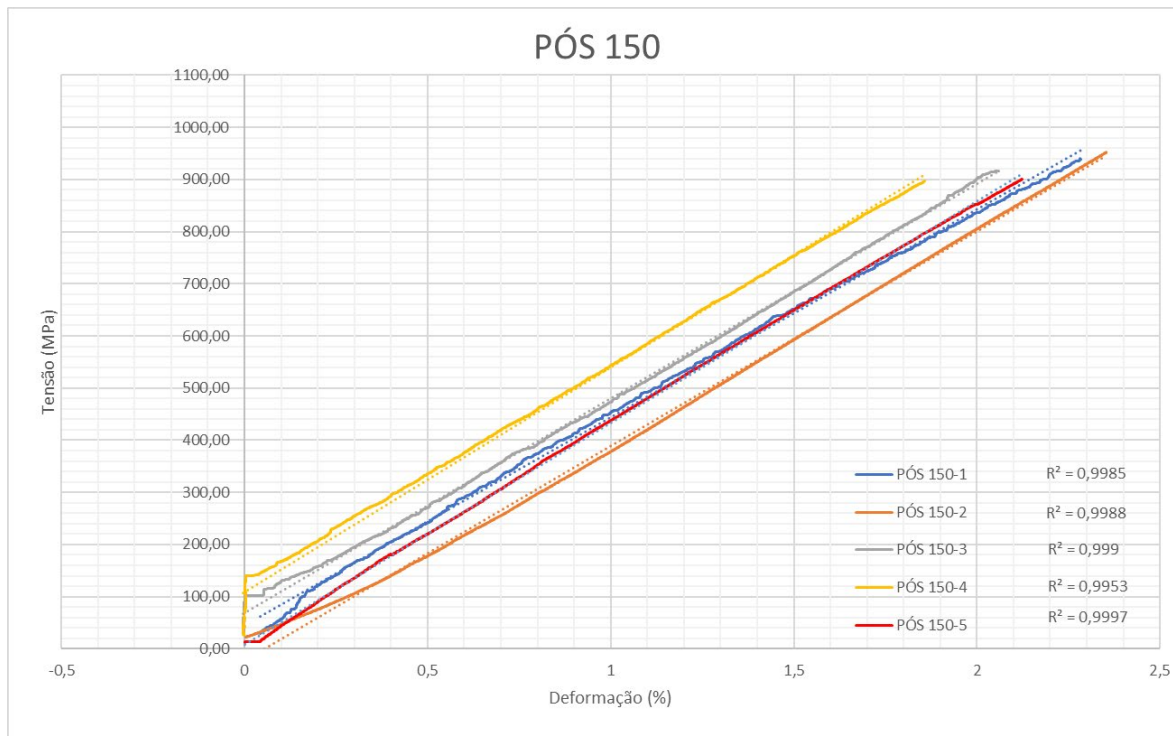


Gráfico C-12: Curva do Módulo de elasticidade (GPa)- Amostras após a exposição à temperatura de 150 °C

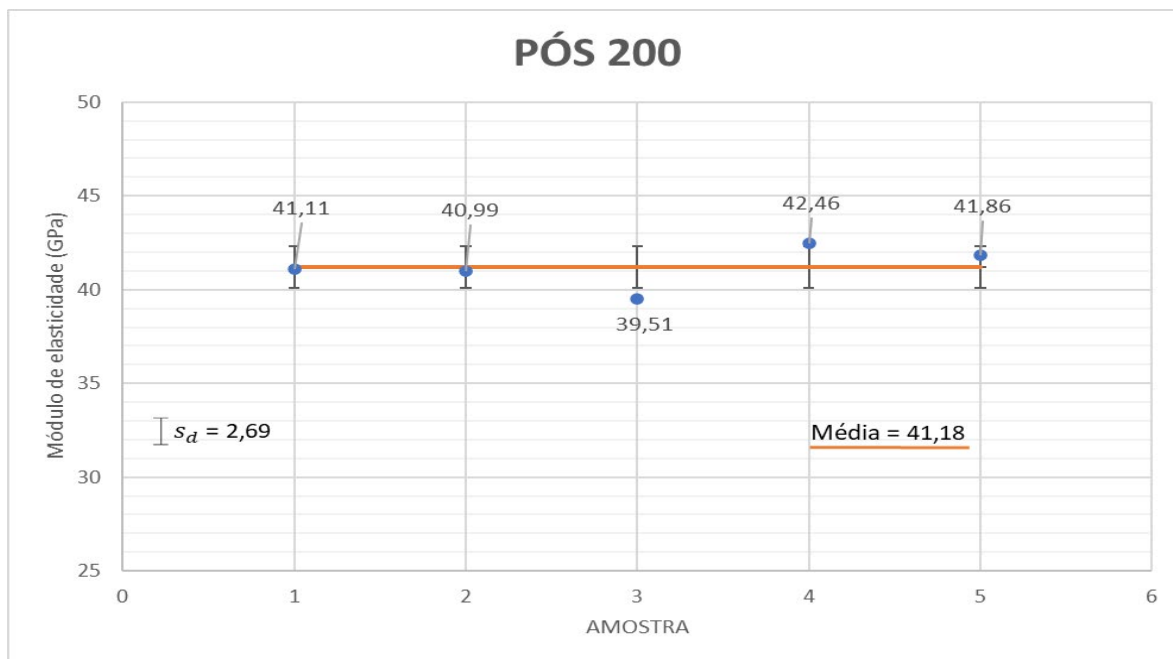


Gráfico C-13: Módulo de elasticidade (GPa)- Amostras após a exposição à temperatura de 200 °C



Gráfico C-14: Curva do Módulo de elasticidade (GPa)- Amostras após a exposição à temperatura de 200 °C

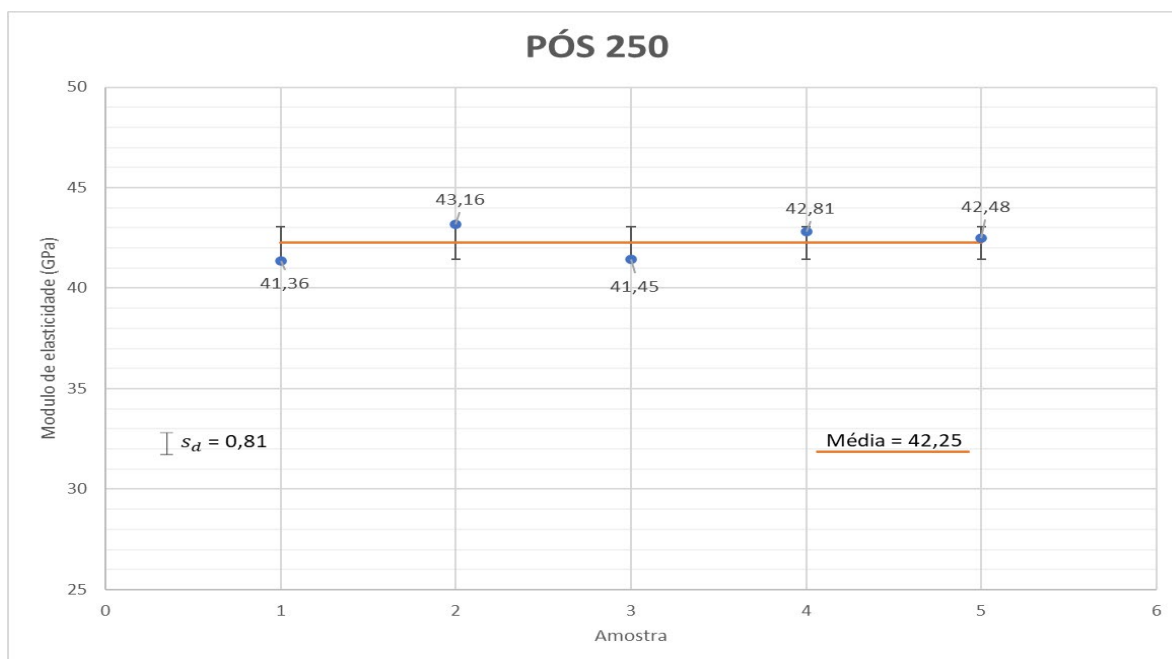


Gráfico C-15: Módulo de elasticidade (GPa)- Amostras após a exposição à temperatura de 250 °C

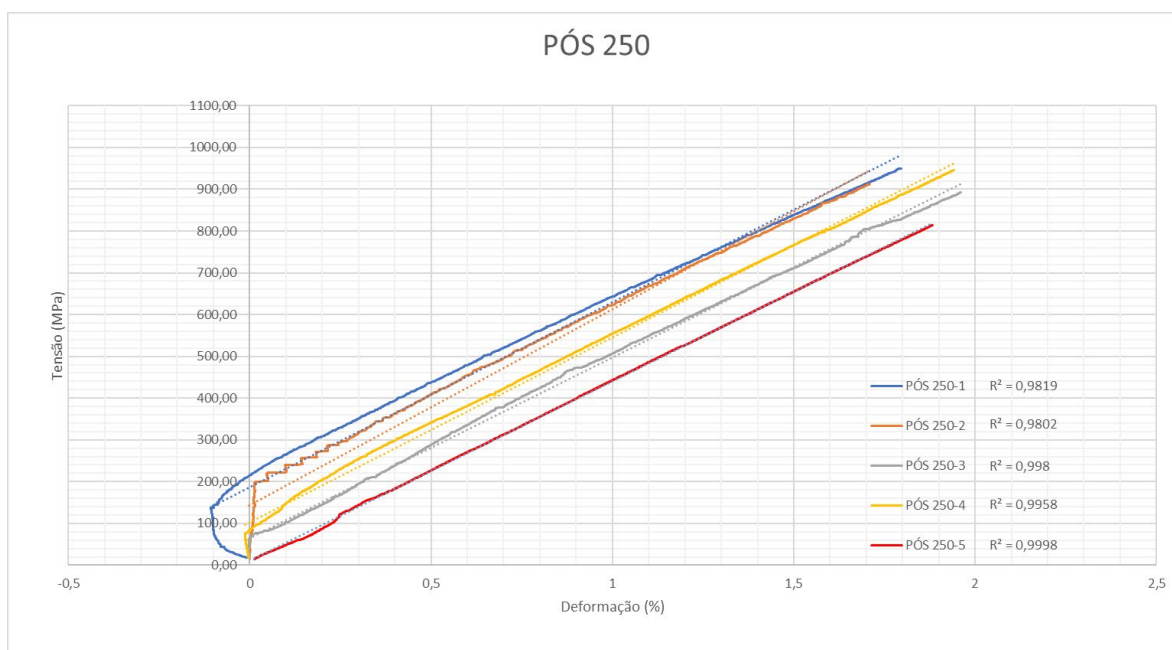


Gráfico C-16: Curva do Módulo de elasticidade (GPa)- Amostras após a exposição à temperatura de 250 °C

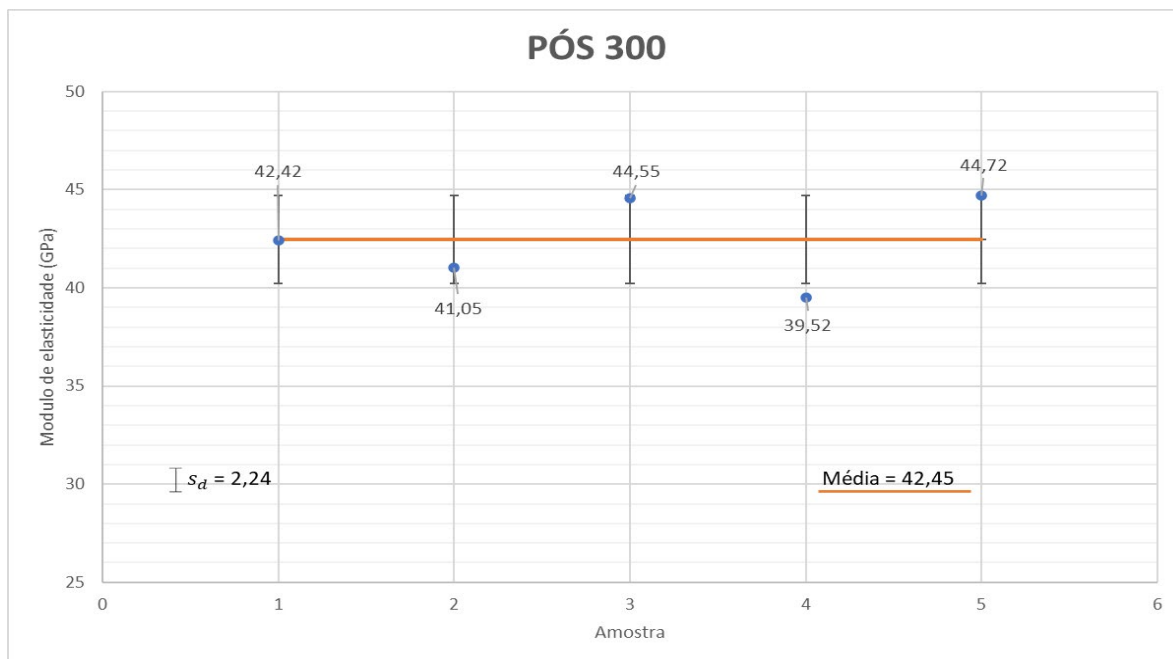


Gráfico C-17: Módulo de elasticidade (GPa)- Amostras após a exposição à temperatura de 300 °C

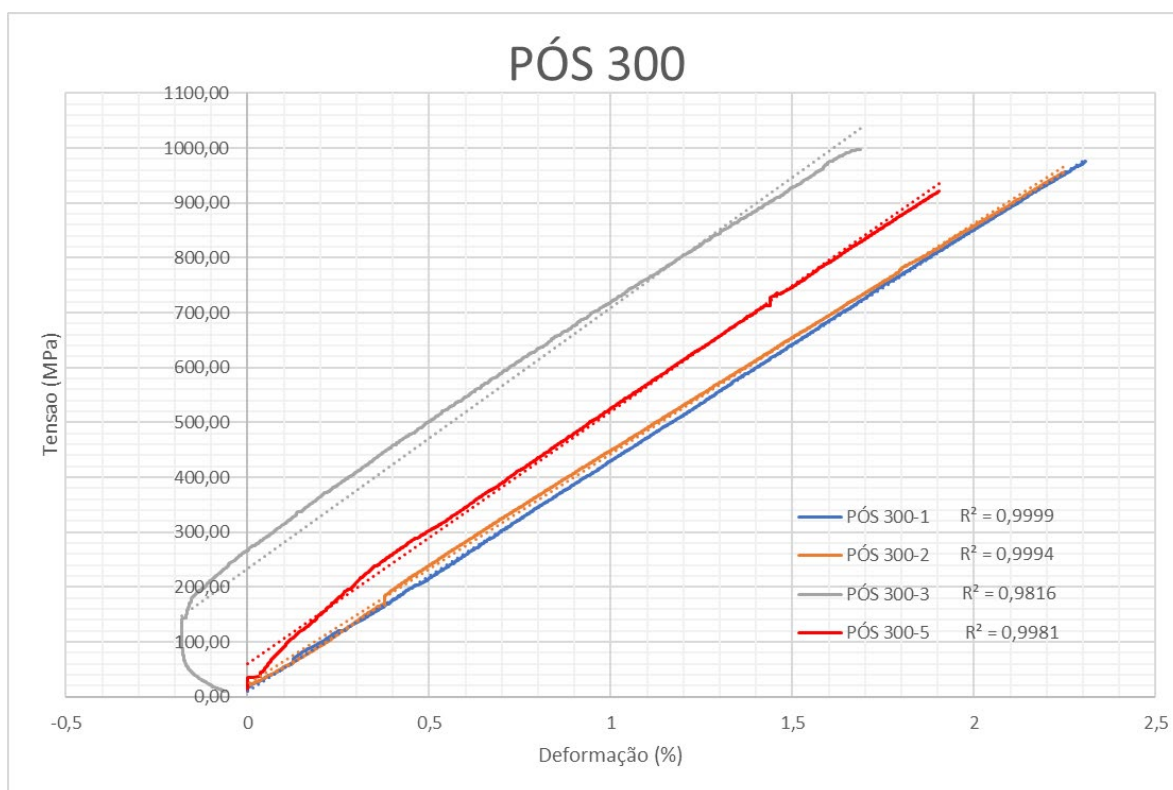


Gráfico C-18: Curva do Módulo de elasticidade (GPa)- Amostras após a exposição à temperatura de 300 °C

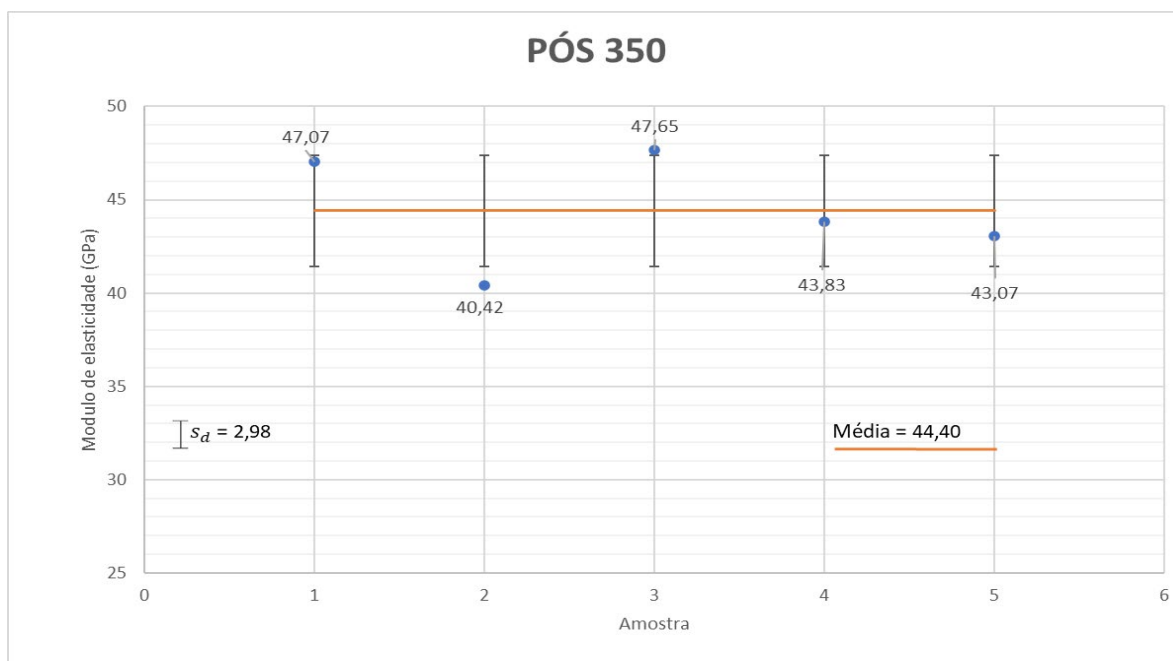


Gráfico C-19: Módulo de elasticidade (GPa)- Amostras após a exposição à temperatura de 350 °C



Gráfico C-20: Curva do Módulo de elasticidade (GPa)- Amostras após a exposição à temperatura de 350 °C