

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO E  
DURABILIDADE DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS À FLEXÃO  
COM BARRAS DE GFRP SUBMETIDAS À AÇÃO  
DE SOLUÇÃO SALINA**

**Amanda Duarte Escobal Mazzú**

São Carlos  
2025

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO E  
DURABILIDADE DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS À FLEXÃO  
COM BARRAS DE GFRP SUBMETIDAS À AÇÃO  
DE SOLUÇÃO SALINA**

**Amanda Duarte Escobal Mazzú**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil

**Área de Concentração:** Estruturas e Geotecnia

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Gláucia Maria Dalfré

**Coorientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Edna Possan

São Carlos  
2025



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Amanda Duarte Escobal Mazzú, realizada em 19/05/2025.

**Comissão Julgadora:**

Profa. Dra. Gláucia Maria Dalfré (UFSCar)

Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima (UEFS)

Profa. Dra. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila Jacintho (PUCCAMP)

Profa. Dra. Claudia Maria de Oliveira Campos (UFF)

Prof. Dr. Carlos Eduardo Marmorato Gomes (UNICAMP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

*DEDICATÓRIA*

---

À Deus, aquele que é poderoso para  
fazer infinitamente mais do que posso  
pedir ou pensar. A Ele seja a glória!

## AGRADECIMENTOS

---

Agradeço primeiramente a Deus, a quem devo minha existência, minha fé, minha reverência e minha adoração. *“Tudo o que fizerem, seja em palavra seja em ação, façam-no em nome do Senhor Jesus, dando por meio dele graças a Deus Pai.”* – Colossenses 3:17.

Agradeço às minhas filhas Alice e Isis. Alice passou por mim como uma tempestade, breve e intensa. Balançou minha vida e me fez descobrir uma força que eu não sabia que tinha. Repensei muitas coisas com sua partida. Prioridades, propósito e sonhos não foram mais os mesmos. Espero um dia poder agradecê-la pessoalmente pela transformação que promoveu em mim e dizê-la o quanto a amei e ainda amo. Isis chegou como calmaria, arco-íris que veio trazer paz e alegria. Obrigada, minha filha, por me permitir sonhar novamente e me motivar a ser melhor. Que um dia você possa ler esse trabalho e saber que você foi a motivação para finalizá-lo. Eu te amo com toda a força do meu coração.

Agradeço ao meu marido Gustavo por todo o amor e apoio. Esse trabalho só foi possível porque você me ajudou a seguir em frente, me apoiou incondicionalmente. Você esteve ao meu lado desde quando eu ainda nem sonhava com a Engenharia Civil, sempre acreditou em mim. Obrigada por tantas vezes me auxiliar no laboratório, com os ensaios e atividades experimentais, e por tantas vezes mais me ajudar com palavras de incentivo. Eu te amo muito!

Agradeço aos meus pais, Valdemir e Evanilda, que investiram seu tempo e seus recursos em mim. Obrigada por acreditarem em mim, por me incentivarem a estudar, por se interessarem pela minha pesquisa, pelos conselhos e palavras de carinho, e por cuidarem da Isis, meu bem mais precioso, para que eu pudesse me dedicar ao trabalho. Obrigada, meu pai, por tantas vezes me auxiliar com as atividades experimentais. Obrigada, minha mãe, por me ajudar a ver o lado positivo de tudo. Vocês lançaram as bases para que esse trabalho fosse possível. Agradeço também aos meus irmãos, Caio e André, pelos momentos de descontração ao longo desses anos. Amo muito vocês!

Agradeço aos meus sogros, Neusa e Cláudio, por todo amor e apoio. Especialmente à minha sogra, por cuidar de mim e da minha família, estando sempre presente. Amo vocês!

Agradeço à minha orientadora Profa. Dra. Gláucia Dalfré pelo apoio, incentivo, ajuda, paciência, amizade e parceria, não apenas durante o desenvolvimento desse trabalho, mas ao longo de tantos anos em que trabalhamos juntas. Se hoje sei fazer pesquisa, devo muito a você. Agradeço também à minha coorientadora Profa. Dra. Edna Possan por todo auxílio durante o desenvolvimento desse trabalho, especialmente em relação às análises microestruturais.

Agradeço ao Laboratório de Materiais e Componentes (LMC), ao Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE), ao Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto

(NETPre) e ao Laboratório de Geotecnia (LabGeo) do Departamento de Engenharia Civil (DECiv) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), na figura de seus coordenadores Profa. Dra. Fernanda Giannotti, Prof. Dr. Guilherme Parsekian, Prof. Dr. Marcelo Ferreira e Prof. Dr. Fernando Portelina, pelo apoio na realização desse trabalho. Agradeço também ao Laboratório de Metais Amorfos e Nanocristalinos (LabNano) do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da UFSCar pela liberação do uso da balança para realização dos ensaios de teor de fibras.

Agradeço ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LMEV) da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA) e à Central Analítica Multiusuário de Medianeira (CEANMED) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pelo apoio na realização dos ensaios microestruturais.

Agradeço ao técnico do laboratório LMC José Roberto de Oliveira por todo o apoio na realização desse trabalho. Obrigada por tantas vezes me socorrer, me orientar, ensinar e apoiar na parte experimental desse trabalho. Agradeço também ao técnico do laboratório LSE Ricardo Canato pelo apoio na realização dos ensaios das vigas e barras analisadas nesse trabalho.

Agradeço aos professores que compuseram a banca de qualificação, cujas observações e sugestões contribuíram significativamente para o amadurecimento deste trabalho. Estendo minha gratidão também aos membros da banca examinadora pela leitura atenta, pelos comentários enriquecedores e pela generosidade ao compartilharem seus conhecimentos. As contribuições de todos foram fundamentais para a construção desta tese.

Agradeço aos amigos Luiz Antonio Sarti Junior, Mariana Posterli, Camila Pessoa, Fabrício Goulart e Gabriel Morgan por todo auxílio no desenvolvimento desse trabalho, sobretudo na realização dos ensaios das vigas de concreto. Nunca esquecerei os bons momentos que passamos juntos no laboratório, trabalhando, rindo e compartilhando ideias.

Agradeço aos irmãos da Igreja Presbiteriana Vila Alpes, que me acompanharam com tanto carinho e constância em oração ao longo desta jornada. Suas intercessões foram sustento nos dias difíceis e expressão do amor de Cristo em minha vida, cumprindo com fidelidade aquilo que Paulo recomenda em Romanos 15:30.

Por fim, agradeço ao Departamento de Engenharia Civil, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e à Universidade Federal de São Carlos por me tornarem Engenheira Civil, Mestra e Doutora em Engenharia Civil. Após tantos anos na UFSCar, posso afirmar que me sinto em casa. A Amanda criança que passava pela portaria da UFSCar, apontava e dizia que essa seria sua escola no futuro, não poderia imaginar o quanto cresceria, aprenderia e viveria nesse lugar. Sou infinitamente grata por tudo!

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

*EPÍGRAFE*

---

*“É melhor obter sabedoria do que ouro. É  
melhor obter entendimento do que prata.”*

Provérbios 16:16

MAZZÚ, Amanda D. E. *Análise experimental do comportamento e durabilidade de vigas de concreto armadas à flexão com barras de GFRP submetidas à ação de solução salina*. 2025. 304p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2025.

Tendo em vista os problemas enfrentados devido à corrosão das armaduras de aço em estruturas de concreto armado, frequentemente associados à ação de íons cloreto, as armaduras de Polímeros Reforçados com Fibras (*Fiber Reinforced Polymer – FRP*), materiais não metálicos com alta resistência mecânica, magneticamente inertes e com boa resistência à corrosão, têm se mostrado uma alternativa viável. Contudo, esse material também está sujeito à degradação, e sua aplicação relativamente recente em estruturas de concreto implica na carência de resultados sobre seu comportamento e durabilidade a longo prazo, especialmente no Brasil. Para antecipar esses resultados, a aplicação de protocolos de degradação acelerada, combinados a ensaios mecânicos, permitem compreender o comportamento mecânico e a durabilidade do material em ambientes de exposição durante períodos pré-definidos. O objetivo deste trabalho foi avaliar a durabilidade de vigas de concreto armadas com barras de aço e de Polímero Reforçado com Fibras de Vidro (*Glass Fiber Reinforced Polymer – GFRP*), em escala real, por meio da aplicação dos protocolos de acondicionamento acelerado do ACI 440.9R (2015). Para isso, foi finalizado o programa experimental iniciado por Mazzú (2020), no qual vigas de concreto armado foram expostas a ambiente laboratorial e imersas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas. Ensaio de flexão em três pontos foram realizados para analisar o comportamento mecânico e a durabilidade após o ciclo completo de degradação acelerada. Além disso, foi realizado um programa experimental adicional, no qual barras de GFRP, desprotegidas e protegidas por concreto, foram submetidas às mesmas condições das vigas e avaliadas por ensaios mecânicos e microestruturais para investigar a durabilidade e os mecanismos de degradação. Após 5000 horas de imersão em solução salina, as vigas com armadura de GFRP apresentaram redução de 12 % na capacidade resistente e de 13 % na rigidez, demonstrando a eficiência do protocolo aplicado para acelerar a degradação. As barras de GFRP protegidas por concreto apresentaram maior redução da resistência à tração após 10000 horas de exposição em relação às barras de GFRP desprotegidas (62,99 % e 47,85 %, respectivamente), devido à influência da alcalinidade do concreto. Contudo, o mecanismo de degradação foi o mesmo, baseado principalmente na hidrólise da matriz polimérica.

*Palavras-chave:* GFRP, concreto, durabilidade, acondicionamento acelerado, degradação.

## ABSTRACT

---

MAZZÚ, Amanda D. E. *Experimental analysis of the behavior and durability of concrete beams reinforced in flexure with GFRP bars subjected to saline solution exposure*. 2025. 304 p. Thesis (PhD in Civil Engineering) – Federal University of São Carlos, São Carlos, 2025.

Considering the problems caused by corrosion of steel reinforcement in reinforced concrete structures, often associated with the action of chloride ions, Fiber Reinforced Polymers (FRP), which are non-metallic materials with high mechanical strength, magnetically inert and with good corrosion resistance, have shown to be a viable alternative. However, this material is also subject to degradation, and its relatively recent application in concrete structures implies a lack of data regarding its long-term behavior and durability, especially in Brazil. To anticipate these results, the application of accelerated degradation protocols combined with mechanical tests allows for a better understanding of the mechanical behavior and durability of the material in exposure environments over predefined periods. The objective of this study was to evaluate the durability of full-scale concrete beams reinforced with steel and Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) bars using the accelerated conditioning protocols of ACI 440.9R (2015). The experimental program initiated by Mazzú (2020) was completed, exposing reinforced concrete beams to laboratory conditions and saline solution for 1000, 5000, and 10000 hours. Three-point bending tests were conducted to assess the mechanical behavior and durability after the complete accelerated degradation cycle. An additional experimental program was carried out in which GFRP bars, both unprotected and protected by concrete, were subjected to the same conditions as the beams and evaluated through mechanical and microstructural tests to investigate their durability and degradation mechanisms. After 5000 hours of saline immersion, the GFRP-reinforced beams showed a 12% reduction in load capacity and a 13% reduction in stiffness, demonstrating the efficiency of the applied protocol in accelerating degradation. GFRP bars protected by concrete showed greater reduction in tensile strength after 10000 hours of exposure compared to unprotected GFRP bars (62.99% and 47.85%, respectively), due to the influence of concrete alkalinity. However, the degradation mechanism was the same for both conditions, mainly based on polymer matrix hydrolysis.

**Keywords:** GFRP, concrete, durability, accelerated conditioning, degradation.

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1: <i>House of the future</i> – Anaheim, Califórnia.....	34
Figura 2: Primeira passarela de concreto da Europa com armadura de FRP.....	35
Figura 3: Desenvolvimento cronológico mundial de recomendações para projeto de estruturas de concreto com armadura de FRP.....	35
Figura 4: Fases constituintes do FRP.....	37
Figura 5: Curvas tensão-deformação de diferentes fibras.....	40
Figura 6: Representação da região de transição entre fibras e matriz.....	43
Figura 7: Processo de fabricação das barras de FRP (Pultrusão).....	44
Figura 8: Processo de Pultrusão: Fibras de vidro (a); impregnação das fibras (b); pré-conformação do produto (c) e puxadores (d).....	44
Figura 9: Diagramas tensão x deformação do aço convencional e do CFRP, AFRP, BFRP e GFRP.....	48
Figura 10: Classificação das barras de FRP de acordo com os tipos de fibra (a), de aglomerante (b) e de conformação superficial (c).....	50
Figura 11: Conformação superficial de barras de FRP: (a) enrolamento helicoidal, (b) enrolamento helicoidal com revestimento de areia, (c) indentação e (d) nervuras.....	51
Figura 12: Superfície das barras de GFRP: tipo A (a), tipo B (b) e tipo C (c).....	52
Figura 13: Comportamento de deslizamento de ligação (extremidade livre) de amostras não envelhecidas.....	52
Figura 14: Fatores que influenciam a durabilidade do FRP.....	57
Figura 15: Imagens MEV da seção transversal de barras de GFRP utilizadas como armadura em vigas submetidas a ambiente alcalino: referência (a) e 8 anos de exposição (b).....	59
Figura 16: Imagens MEV da seção longitudinal de barras de GFRP utilizadas como armadura em vigas submetidas a ambiente alcalino: referência (a) e 8 anos de exposição (b).....	59
Figura 17: Comportamento da absorção de água nas barras de GFRP.....	63
Figura 18: Aparência das barras de GFRP após imersão em solução alcalina durante 8 anos.....	68
Figura 19: Diagrama esquemático do mecanismo de degradação de barras de GFRP embebidas no concreto.....	69
Figura 20: Imagens de microscopia eletrônica de varredura realizada nas barras de GFRP após 183 dias de exposição: seção transversal (a) e seção longitudinal (b).....	70
Figura 21: Interface entre barras de GFRP e o concreto circundante das amostras de referência (a) e após 10 anos de envelhecimento natural (b).....	73
Figura 22: Curvas de força <i>versus</i> deslocamento das vigas com armadura de GFRP após 8 meses de exposição aos ambientes T1, T2 e T3.....	75
Figura 23: Curvas de momento <i>versus</i> deslocamento das vigas ensaiadas por Park, Kim e Lee (2014).....	76
Figura 24: Protocolo de condicionamento acelerado proposto pelo ACI 440.9R (2015) para barras de FRP.....	79
Figura 25: Distribuição de deformações para uma seção de concreto armado com barras de FRP.....	81
Figura 26: Exemplo de tensões na armadura para o esmagamento do concreto <i>versus</i> taxa de armadura longitudinal.....	82
Figura 27: Diagrama retangular equivalente de tensões para esmagamento do concreto ...	87
Figura 28: Diagrama equivalente de tensões para ruptura da barra de FRP.....	87
Figura 29: Diagrama retangular equivalente para tensões no concreto comprimido.....	89
Figura 30: Distribuição simplificada de tensões e deformações em seções de concreto com armadura de FRP.....	91
Figura 31: Diagrama de tensões e forças de uma estrutura de seção retangular submetida à momento fletor.....	99

Figura 32: Diagramas de deformações e tensões para o caso de ruína pela ruptura do FRP .....	102
Figura 33: Diagramas de deformações e tensões para o caso de ruína pelo esmagamento do concreto .....	103
Figura 34: Fluxograma da análise teórica .....	105
Figura 35: Fluxograma do programa experimental das vigas de concreto armado .....	110
Figura 36: Esquema estático de ensaio de flexão em três pontos (a) e seções transversais das vigas com armadura longitudinal positiva de aço (b) e de GFRP (c) – unidades em centímetros .....	111
Figura 37: Armadura de aço (a); barras de GFRP (b); amarração dos estribos nas armaduras longitudinais (c); aspecto final das armaduras (d) .....	112
Figura 38: Fôrmas poliméricas com desmoldante (a); armaduras posicionadas nas fôrmas (b); espaçadores posicionados nas armaduras (c); moldes dos corpos de prova de concreto (d); ensaio de abatimento de tronco de cone (e); lançamento do concreto (d); adensamento do concreto (g) e desmoldagem das vigas (h) .....	113
Figura 39: Localização (a) e ambiente interno ao NETPRE (b).....	114
Figura 40: Distância entre o NETPRE e a Estação climatológica da UFSCar .....	115
Figura 41: Variação mensal média da temperatura e umidade relativa no período de exposição das vigas a ambiente laboratorial .....	116
Figura 42: Local da montagem do tanque (a); tanque de acondicionamento (b); posicionamento das vigas (c) e geometria do tanque (d) – medidas em centímetros. ....	117
Figura 43: Sistema de aquecimento.....	118
Figura 44: Medida da temperatura nos quatro cantos do tanque .....	118
Figura 45: Esquema da peça rígida de aço – unidades em milímetros .....	119
Figura 46: Esquema do dispositivo de aço para apoio das vigas .....	120
Figura 47: Fixação do dispositivo na máquina de ensaios .....	120
Figura 48: Configuração de ensaio de flexão de três pontos.....	121
Figura 49: Lixamento da superfície da viga (a) e aplicação de massa plástica no ponto de aplicação de força (b) e na região de apoio da viga (c) .....	121
Figura 50: Ponto de aplicação da força na face superior da viga, a meio vão .....	122
Figura 51: (a) Marcação do centro da armadura; (b) lixamento da superfície da barra; (c) posicionamento do extensômetro; (d-e) colagem do extensômetro; (f) soldagem do fio aos terminais; (g) isolamento dos terminais do extensômetro e (h) proteção do extensômetro .....	123
Figura 52: (a) Regularização da superfície; (b) marcação do ponto de aplicação; (c) posicionamento do extensômetro; (d) colagem do extensômetro; (e) soldagem do fio aos terminais; (f) isolamento dos terminais do extensômetro .....	124
Figura 53: Posicionamento dos extensômetros (SGs) – unidades em centímetros.....	125
Figura 54: Posicionamento dos transdutores de deslocamento (LVDTs) – unidades em centímetros .....	125
Figura 55: Posicionamento dos LVDTs para aferição do deslocamento vertical (a), da rotação dos apoios (b) e do deslocamento vertical do perfil metálico (c).....	126
Figura 56: (a) Ensaio de compressão axial, (b) corpo de prova de concreto após ensaio de compressão e (c) ensaio de módulo de elasticidade .....	127
Figura 57: Ensaio de tração direta (a) e modo de ruptura das barras de aço (b).....	127
Figura 58: (a) Medição da amostra com paquímetro digital, (b) pesagem da amostra, (c-e) sistema de pesagem hidrostática e (f) pesagem hidrostática da amostra.....	128
Figura 59: Ensaio piloto de tração realizado nas amostras de GFRP: (a) ruptura do tubo de aço, (b-c) escorregamento da ancoragem.....	129
Figura 60: (a) Esquema da amostra de GFRP e (b) detalhe da ancoragem – unidades em centímetros .....	130
Figura 61: (a) Preparação da barra de GFRP e do tubo de aço; (b) preparação do material de preenchimento; (c-d) moldagem das ancoragens.....	131
Figura 62: Execução de um ensaio de tração direta em amostra de barra de GFRP .....	131

Figura 63: Equipamentos utilizados no ensaio de absorção: (a-b) estufa ventilada, (c) dessecador, (d-e) banho-maria e (f) balança analítica com precisão de 0,0001g .....	132
Figura 64: Equipamentos utilizados para a determinação do teor de fibras pelo método da combustão: (a) mufla, (b) estufa, (c) dessecador, (d) balança analítica e (e) cadinho com o resíduo de fibras.....	133
Figura 65: Fratura do corpo de prova por compressão diametral (a); corpo de prova de concreto após aspersão de solução de nitrato de prata (b); e medida da profundidade de penetração de cloretos com paquímetro digital (c) .....	135
Figura 66: Fluxograma do programa experimental das barras de GFRP .....	137
Figura 67: (a) Moldes para as amostras de GFRP protegidas submetidas a ensaio de tração e (b-c) ensaios microestruturais .....	138
Figura 68: Processo de moldagem das amostras de GFRP protegidas: (a) betoneira, (b) materiais utilizados, (c) ensaio de abatimento de tronco de cone, (d) concreto produzido, (e) moldagem das amostras a serem submetidas a ensaio de tração e (f) moldagem das amostras a serem submetidas a ensaios microestruturais .....	138
Figura 69: (a-b) Amostras concretadas e (c-d) acondicionadas em ambiente laboratorial após a desmoldagem.....	139
Figura 70: (a) Furos para passagem das amostras, (b-c) instalação das amostras protegidas e desprotegidas destinadas a ensaios de tração uniaxial, e (d) posicionamento das amostras para medida da absorção, do teor de fibras e ensaios microestruturais .....	140
Figura 71: (a) Resistência de imersão e (b) termostato digital .....	141
Figura 72: Corpos de prova de concreto após ensaios de caracterização das propriedades mecânicas.....	142
Figura 73: Ensaio de absorção: (a) estufa a 50 °C, (b) amostras de GFRP, (c) dessecador e (d) balança com precisão de 0,001 g .....	144
Figura 74: Ensaio para a determinação do teor de fibras: (a) cadinhos mais amostras, (b) cadinhos mais resíduos de fibras e (c) detalhe do resíduo de fibras .....	144
Figura 75: Determinação da razão OH/CH por meio de ensaio FTIR.....	146
Figura 76: Curva típica de fluxo de calor por temperatura e sua derivada em função do tempo por temperatura.....	148
Figura 77: Resistência à compressão do concreto em função do tempo de exposição, para ambiente laboratorial e solução salina .....	151
Figura 78: Diagrama de tensão <i>versus</i> deformação do aço .....	153
Figura 79: Diagrama de tensão <i>versus</i> deformação das barras de GFRP utilizadas como armadura nas vigas de concreto .....	155
Figura 80: (a-c) Corpo de prova com ancoragem preparada com adesivo estrutural após a ruptura; (d-e) corpo de prova com ancoragem preparada com resina epóxi após a ruptura .....	156
Figura 81: Medida da profundidade de penetração de cloretos em corpos de prova de concreto após (a) 1000, (b) 5000 e (c) 10000 horas de imersão em solução salina ...	159
Figura 82: Gráfico de força resistida pelas vigas V_LAB_GFRP_45d, V_LAB_GFRP_1000h e V_ACP_GFRP_1000h em função dos modelos [1] ACI 440.11 (2022), [2] CAN CSA S806 (2012), [3] FIB <i>Bulletin</i> 40 (2007), [4] SP 295.1325800 (2017) e [5] ABNT NBR 17196 (2025).....	161
Figura 83: Força <i>versus</i> deformação no concreto e na armadura e Força <i>versus</i> deslocamento vertical para as vigas V_LAB_S_5000h e V_LAB_GFRP_5000h .....	169
Figura 84: Esmagamento do concreto comprimido – V1_LAB_S_5000h .....	171
Figura 85: Esmagamento do concreto da viga V2_LAB_GFRP_5000h (a) e ruptura da barra de GFRP da viga V1_LAB_GFRP_5000h (b).....	171
Figura 86: Força <i>versus</i> deformação no concreto e na armadura e Força <i>versus</i> deslocamento vertical para as vigas V_LAB_S_10000h e V_LAB_GFRP_10000h ....	172
Figura 87: Esmagamento do concreto comprimido – V1_LAB_S_10000h .....	173
Figura 88: Esmagamento do concreto (a) e ruptura da barra de GFRP (b) da viga V1_LAB_GFRP_10000h .....	173

Figura 89: Força <i>versus</i> deformação no concreto e na armadura e Força <i>versus</i> deslocamento vertical para as vigas V_ACP_S_5000h e V_ACP_GFRP_5000h .....	174
Figura 90: Esmagamento do concreto (a) e ruptura da barra de GFRP (b) da viga V1_ACP_GFRP_5000h.....	176
Figura 91: Força <i>versus</i> deformação no concreto e Força <i>versus</i> deslocamento vertical para as vigas V_ACP_S_10000h e V_ACP_GFRP_10000h .....	177
Figura 92: Corrosão instalada na armadura de aço da viga V2_ACP_S_10000h (a-b) e produtos da corrosão aderidos no concreto circundante (c) .....	178
Figura 93: Ruptura da armadura de GFRP da viga V2_ACP_GFRP_10000h .....	178
Figura 94: Força <i>versus</i> deformação no concreto e na armadura e Força <i>versus</i> deslocamento vertical para as vigas V_LAB_S_5000h, V_LAB_GFRP_5000h, V_LAB_S_10000h e V_LAB_GFRP_10000h .....	179
Figura 95: Força <i>versus</i> deformação no concreto e na armadura e Força <i>versus</i> deslocamento vertical para as vigas V_ACP_S_5000h, V_ACP_GFRP_5000h, V_ACP_S_10000h e V_ACP_GFRP_10000h .....	181
Figura 96: Padrão de fissuras das vigas após ensaios de flexão em três pontos.....	182
Figura 97: Força <i>versus</i> deformação no concreto e na armadura e Força <i>versus</i> deslocamento vertical para as vigas V_LAB_S_5000h, V_LAB_S_10000h, V_ACP_S_5000h e V_ACP_S_10000h .....	184
Figura 98: Força <i>versus</i> deformação no concreto e na armadura e Força <i>versus</i> deslocamento vertical para as vigas V_LAB_GFRP_5000h, V_LAB_GFRP_10000h, V_ACP_GFRP_5000h e V_ACP_GFRP_10000h.....	186
Figura 99: Curvas médias (CM) de força <i>versus</i> deslocamento vertical para as vigas com armadura de aço e de GFRP de referência, mantidas em ambiente laboratorial e em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas .....	188
Figura 100: Curvas médias (CM) de força <i>versus</i> deslocamento das vigas V_LAB_S_5000h, V_LAB_S_10000h, V_ACP_S_5000h, V_ACP_S_10000h, V_LAB_GFRP_5000h, V_LAB_GFRP_10000h, V_ACP_GFRP_5000h e V_ACP_GFRP_10000h em comparação aos resultados teóricos .....	193
Figura 101: Profundidade de penetração de cloretos: (a) corpos de prova antes da aspersão de nitrato de prata e após (b) 1000 horas, (c) 5000 horas e (d) 10000 horas de imersão .....	195
Figura 102: Imperfeições na superfície das barras de GFRP sem envelhecimento .....	196
Figura 103: Modo de ruptura das amostras de GFRP submetidas à ensaio de tração uniaxial .....	202
Figura 104: Diagramas tensão <i>versus</i> deformação obtidos por meio dos ensaios de tração uniaxial nas barras de GFRP .....	204
Figura 105: Curvas médias de tensão <i>versus</i> deformação das barras de GFRP .....	205
Figura 106: Redução das propriedades mecânicas das barras de GFRP ao longo da imersão em solução salina .....	206
Figura 107: Detalhe da ruptura de uma barra de GFRP (a) desprotegida e (b) protegida após 10000 horas de imersão em solução salina .....	208
Figura 108: Superfície das amostras desprotegidas antes e após 1000, 5000 e 10000 horas de imersão em solução salina .....	208
Figura 109: Absorção de água em função da raiz quadrada do tempo de imersão das barras de GFRP em água a 23 °C e solução salina a 50 °C - ABNT NBR 17201-11 (2025) .	212
Figura 110: Seção transversal das amostras de GFRP de referência e após imersão em água a 23 °C e solução salina a 50 °C, respectivamente .....	215
Figura 111: Micrografia da seção transversal da barra de GFRP: diâmetro e distribuição das fibras de vidro na matriz polimérica (ampliação de 1000x) .....	219
Figura 112: Micrografias da seção transversal das barras de GFRP de referência e mantidas durante 1000, 5000 e 10000 horas em solução salina, na condição desprotegida .....	220
Figura 113: Micrografias da seção transversal das barras de GFRP de referência e mantidas durante 5000 e 10000 horas em solução salina, na condição protegida .....	222

Figura 114: Micrografia da seção transversal de barra de GFRP do segundo lote, na condição de referência (ampliação de 50x).....	223
Figura 115: Micrografias da interface entre o concreto e as barras de GFRP protegidas após 5000 (a-b) e 10000 horas (c-d) de imersão em solução salina (ampliação de 20x)....	223
Figura 116: Espectros FTIR das barras de GFRP de referência e imersas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas na condição desprotegida .....	224
Figura 117: Espectros FTIR das barras de GFRP de referência e imersas em solução salina durante 5000 e 10000 horas na condição protegida.....	225
Figura 118: Resultados dos ensaios DSC em barras de GFRP de referência e imersas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas na condição desprotegida.....	232
Figura 119: Resultados dos ensaios DSC em barras de GFRP de referência e imersas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas na condição protegida .....	232
Figura 120: Resultados dos ensaios TGA realizados em barras de GFRP de referência e imersas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas na condição desprotegida .....	236
Figura 121: Resultados dos ensaios TGA realizados em barras de GFRP de referência e imersas em solução salina durante 5000 e 10000 horas na condição protegida .....	236
Figura 122: Diagrama de momento fletor (DM) e esforço cortante (DV) na viga de concreto armado – unidades em centímetros .....	273
Figura 123: Diagrama retangular equivalente de tensões no concreto – ACI 318 (2019)...	293
Figura 124: Diagrama retangular equivalente de tensões no concreto – ABNT NBR 6118 (2023) .....	296
Figura 125: Gráfico de força <i>versus</i> rotação dos apoios e força <i>versus</i> deslocamento do perfil metálico para as vigas V_LAB_S_5000h e V_LAB_GFRP_5000h .....	303
Figura 126: Gráfico de força <i>versus</i> rotação dos apoios e força <i>versus</i> deslocamento do perfil metálico para as vigas V_LAB_S_10000h e V_LAB_GFRP_10000h.....	303
Figura 127: Gráfico de força <i>versus</i> rotação dos apoios e força <i>versus</i> deslocamento do perfil metálico para as vigas V_ACP_S_5000h e V_ACP_GFRP_5000h .....	304
Figura 128: Gráfico de força <i>versus</i> rotação dos apoios e força <i>versus</i> deslocamento do perfil metálico para as vigas V_ACP_S_10000h e V_ACP_GFRP_10000h .....	304

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1: Propriedades das resinas termoendurecíveis.....	39
Tabela 2: Propriedades mecânicas das fibras de carbono, vidro, aramida e basalto .....	40
Tabela 3: Tipos de fibras de vidro comercialmente disponíveis .....	41
Tabela 4: Propriedades dos principais tipos de fibras de vidro empregadas na produção do FRP.....	42
Tabela 5: Composição química dos principais tipos de fibras de vidro empregadas na produção do FRP .....	42
Tabela 6: Valores mínimos de resistência à tração de barras de FRP .....	47
Tabela 7: Valores típicos de propriedades mecânicas de barras de FRP (para frações volumétricas de fibra entre 0,5 e 0,7) em comparação ao aço convencional.....	47
Tabela 8: Densidade típica de barras de FRP .....	49
Tabela 9: Coeficiente de dilatação térmica de barras de FRP (para frações volumétricas de fibra entre 0,5 e 0,7).....	49
Tabela 10: Diâmetros e áreas nominais das barras de FRP, em função da área efetiva .....	53
Tabela 11: Propriedades requeridas e métodos de ensaios para caracterização de barras de GFRP ou BFRP (Qualificação).....	53
Tabela 12: Propriedades requeridas e métodos de ensaios para controle do produto e certificação de aceitação.....	54
Tabela 13: Classe de agressividade ambiental das estruturas de concreto com barras de FRP.....	55
Tabela 14: Qualidade do concreto a ser utilizado em função da classe de agressividade ambiental .....	55
Tabela 15: Cobrimento nominal a ser utilizado em função da classe de agressividade ambiental .....	55
Tabela 16: Limites de abertura de fissura para estruturas de concreto armado com barras de FRP versus armadura de aço.....	56
Tabela 17: Ensaios de durabilidade de FRP .....	80
Tabela 18: Fatores de redução padrão da resistência à tração para 100 anos de exposição – ambiente úmido e temperatura média anual de 10°C.....	94
Tabela 19: Termos de correção relacionados às condições de umidade, de temperatura, à vida útil desejada e ao diâmetro da barra de FRP.....	95
Tabela 20: Valores mínimos das propriedades mecânicas por tipo de FRP.....	96
Tabela 21: Valores do coeficiente de exposição por tipo de FRP .....	97
Tabela 22: Valores do coeficiente de redução da resistência à tração sob carregamentos de longa duração por tipo de FRP.....	97
Tabela 23: Fator de redução da resistência de barras de FRP em função do tipo de combinação de ações considerado .....	101
Tabela 24: Resultados experimentais médios obtidos por Mazzú (2020) para vigas com armadura de GFRP.....	106
Tabela 25: Fatores de redução da resistência do FRP e do concreto por norma.....	107
Tabela 26: Resumo do programa experimental das vigas de concreto armado .....	109
Tabela 27: Propriedades da barra de GFRP utilizada .....	110
Tabela 28: Dados climatológicos do período de exposição das vigas a ambiente laboratorial .....	115
Tabela 29: Resumo do programa experimental das barras de GFRP .....	136
Tabela 30: Resultados das propriedades mecânicas do concreto.....	150
Tabela 31: Resultados médios das propriedades mecânicas do aço .....	152
Tabela 32: Resultados do diâmetro efetivo da barra de GFRP .....	154
Tabela 33: Resultados da resistência à tração da barra de GFRP.....	155
Tabela 34: Absorção de água das barras de GFRP após 24 horas de imersão .....	156
Tabela 35: Teor de fibras das barras de GFRP.....	157
Tabela 36: Composição química das fibras de vidro (% em massa), na forma de óxidos ..	158

Tabela 37: Resultados médios da medida da profundidade de penetração de cloretos .....	158
Tabela 38: Resultados teóricos para obtidos para as vigas de Mazzú (2020) .....	160
Tabela 39: Resultados teóricos para as vigas de concreto armado com barras de aço .....	164
Tabela 40: Resultados teóricos para as vigas de concreto armado com barras de GFRP .....	164
Tabela 41: Resultados experimentais obtidos para as vigas considerando o instante de abertura da primeira fissura e de registro da força máxima .....	166
Tabela 42: Resultados experimentais obtidos para as vigas considerando o início de escoamento da armadura e do esmagamento do concreto .....	167
Tabela 43: Rigidez e ductilidade das vigas de concreto armado .....	168
Tabela 44: Resultados teóricos e experimentais obtidos para as vigas analisadas .....	191
Tabela 45: Propriedades mecânicas do concreto .....	194
Tabela 46: Profundidade de penetração de cloretos nos corpos de prova de concreto .....	195
Tabela 47: Diâmetro efetivo, área efetiva e diâmetro nominal da barra de GFRP .....	197
Tabela 48: Resultados obtidos nos ensaios de tração uniaxial das barras de GFRP de referência .....	199
Tabela 49: Resultados obtidos nos ensaios de tração uniaxial das barras de GFRP desprotegidas e protegidas mantidas em solução salina durante 1000 horas .....	199
Tabela 50: Resultados obtidos nos ensaios de tração uniaxial das barras de GFRP desprotegidas e protegidas mantidas em solução salina durante 5000 horas .....	200
Tabela 51: Resultados obtidos nos ensaios de tração uniaxial das barras de GFRP desprotegidas e protegidas mantidas em solução salina durante 10000 horas .....	200
Tabela 52: Valores médios das propriedades mecânicas das barras de GFRP para cada idade e condição de exposição .....	206
Tabela 53: Absorção das barras de GFRP imersas em água a 23 °C .....	210
Tabela 54: Absorção das barras de GFRP imersas em solução salina a 50 °C .....	210
Tabela 55: Variação entre a massa inicial e final das amostras submetidas a ensaio de absorção de água .....	213
Tabela 56: Coeficiente de difusão das barras de GFRP imersas em água a 23 °C e em solução salina a 50 °C .....	214
Tabela 57: Teor de fibras das barras de GFRP de referência .....	216
Tabela 58: Teor de fibras das barras de GFRP desprotegidas e protegidas mantidas em solução salina durante 1000 horas .....	216
Tabela 59: Teor de fibras das barras de GFRP desprotegidas e protegidas mantidas em solução salina durante 5000 horas .....	217
Tabela 60: Teor de fibras das barras de GFRP desprotegidas e protegidas mantidas em solução salina durante 10000 horas .....	217
Tabela 61: Composição química das fibras de vidro (% em massa), na forma de óxidos, para cada condição de exposição .....	218
Tabela 62: Razão OH / CH para as barras de GFRP de referência e mantidas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas nas condições desprotegida e protegida .....	225
Tabela 63: Razão C=O / anel aromático e COO <sup>-</sup> / anel aromático para as barras de GFRP de referência e mantidas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas nas condições desprotegida e protegida .....	227
Tabela 64: Índices de hidrólise para as barras de GFRP de referência e mantidas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas na condição desprotegida e protegida .....	229
Tabela 65: Temperatura de transição vítrea das barras de GFRP de referência e imersas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas nas condições desprotegida e protegida .....	233
Tabela 66: Perda de massa com o aumento da temperatura das barras de GFRP de referência e mantidas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas nas condições desprotegida e protegida .....	237
Tabela 67: Características das vigas – ACI 440.11 (2022) .....	271

Tabela 68: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_LAB_GFRP_45d, V_LAB_GFRP_1000h e V_ACP_GFRP_1000h de Mazzú (2020) utilizando-se o ACI 440.11 (2022).....	273
Tabela 69: Características das vigas – CAN CSA S806 (2012).....	274
Tabela 70: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_LAB_GFRP_45d de Mazzú (2020) utilizando-se o CAN CSA S806 (2012).....	276
Tabela 71: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_LAB_GFRP_1000h de Mazzú (2020) utilizando-se o CAN CSA S806 (2012).....	277
Tabela 72: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_ACP_GFRP_1000h de Mazzú (2020) utilizando-se o CAN CSA S806 (2012).....	277
Tabela 73: Características das vigas – FIB <i>Bulletin</i> 40 (2007).....	278
Tabela 74: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_LAB_GFRP_45d de Mazzú (2020) utilizando-se o FIB <i>Bulletin</i> 40 (2007).....	281
Tabela 75: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_LAB_GFRP_1000h de Mazzú (2020) utilizando-se o FIB <i>Bulletin</i> 40 (2007).....	282
Tabela 76: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_ACP_GFRP_1000h de Mazzú (2020) utilizando-se o FIB <i>Bulletin</i> 40 (2007).....	282
Tabela 77: Características das vigas – SP 295.1325800 (2017).....	283
Tabela 78: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_LAB_GFRP_45d de Mazzú (2020) utilizando-se o SP 295.1325800 (2017).....	286
Tabela 79: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_LAB_GFRP_1000h de Mazzú (2020) utilizando-se o SP 195.1325800 (2017).....	286
Tabela 80: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_ACP_GFRP_1000h de Mazzú (2020) utilizando-se o SP 295.1325800 (2017).....	287
Tabela 81: Características das vigas – ABNT NBR 17196 (2025).....	287
Tabela 82: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_LAB_GFRP_45d de Mazzú (2020) utilizando-se a ABNT NBR 17196 (2025).....	289
Tabela 83: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_LAB_GFRP_1000h de Mazzú (2020) utilizando-se a ABNT NBR 17196 (2025).....	290
Tabela 84: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_ACP_GFRP_1000h de Mazzú (2020) utilizando-se a ABNT NBR 17196 (2025).....	290
Tabela 85: Características das vigas – ACI 318 (2019).....	292
Tabela 86: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_LAB_S_5000h e V_ACP_S_5000h utilizando-se o ACI 318 (2019).....	294
Tabela 87: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_LAB_S_10000h e V_ACP_S_10000h utilizando-se o ACI 318 (2019).....	295
Tabela 88: Características das vigas – ABNT NBR 6118 (2023).....	296
Tabela 89: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_LAB_S_5000h e V_ACP_S_5000h utilizando-se a ABNT NBR 6118 (2023).....	298
Tabela 90: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_LAB_S_10000h e V_ACP_S_10000h utilizando-se a ABNT NBR 6118 (2023).....	299
Tabela 91: Características das vigas – ACI 440.11 (2022).....	299
Tabela 92: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_LAB_GFRP_5000h e V_ACP_GFRP_5000h utilizando-se o ACI 440.11 (2022).....	300
Tabela 93: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_LAB_GFRP_10000h e V_ACP_GFRP_10000h utilizando-se o ACI 440.11 (2022).....	300
Tabela 94: Características das vigas de concreto armado com barras de GFRP – ABNT NBR 17196 (2025).....	301
Tabela 95: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_LAB_GFRP_5000h e V_ACP_GFRP_5000h utilizando-se a ABNT NBR 17196 (2025).....	301
Tabela 96: Resultados teóricos obtidos para as vigas V_LAB_GFRP_10000h e V_ACP_GFRP_10000h utilizando-se a ABNT NBR 17196 (2025).....	302

---

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
<b>1.1 Objetivos</b>	<b>25</b>
1.1.1 Geral	25
1.1.2 Específicos	25
<b>1.2 Justificativa</b>	<b>26</b>
<b>1.3 Problema de pesquisa</b>	<b>30</b>
<b>1.4 Descrição dos capítulos</b>	<b>32</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>34</b>
<b>2.1 Considerações iniciais</b>	<b>34</b>
<b>2.2 Polímeros Reforçados com Fibras (FRP)</b>	<b>37</b>
2.2.1 Matriz polimérica	38
2.2.2 Fibras	39
2.2.2.1 Fibras de vidro	40
2.2.3 Interface matriz-fibras	43
2.2.4 Processo de produção do FRP	44
2.2.5 Características do FRP	45
2.2.5.1 Propriedades mecânicas e comportamento	46
2.2.5.2 Propriedades físicas	48
2.2.5.3 Aderência ao concreto	49
2.2.6 Requisitos exigidos para barras de FRP	52
<b>2.3 Aspectos de Durabilidade</b>	<b>54</b>
2.3.1 Durabilidade do FRP	56
2.3.1.1 Efeito da alcalinidade	57
2.3.1.2 Efeito da umidade	60
2.3.1.3 Efeito das soluções salinas	65
2.3.1.4 Durabilidade do FRP no interior do concreto	67
2.3.1.5 Envelhecimento natural de estruturas com armadura de FRP	71
2.3.2 Durabilidade de vigas com armadura de FRP	74
2.3.3 Protocolo de acondicionamento acelerado	77
<b>2.4 Comportamento mecânico de vigas com armadura de FRP</b>	<b>80</b>
<b>2.5 Modelos de Dimensionamento</b>	<b>83</b>
2.5.1 ACI 440.11 (2022)	84
2.5.1.1 Ruína governada pelo esmagamento do concreto	86
2.5.1.2 Ruína governada pela ruptura da barra de GFRP	87
2.5.2 CAN CSA S806 (2012)	88
2.5.3 FIB <i>Bulletin</i> 40 (2007)	90
2.5.3.1 Ruína pelo esmagamento do concreto	91
2.5.3.2 Ruína pela ruptura da barra de FRP	92
2.5.3.3 Consideração da exposição ambiental	93
2.5.4 SP 295.1325800 (2017)	96
2.5.4.1 Capacidade resistente de seções normais para forças últimas	98
2.5.5 ABNT NBR 17196 (2025)	100
2.5.5.1 Ruptura da barra de FRP	102
2.5.5.2 Esmagamento do concreto	102
<b>2.6 Considerações finais</b>	<b>103</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>104</b>
<b>3.1 Análise teórica</b>	<b>104</b>

3.1.1	Estudo dos modelos de dimensionamento	105
3.1.2	Previsão da capacidade resistente	107
<b>3.2</b>	<b>Análise experimental – Vigas</b>	<b>108</b>
3.2.1	Vigas de concreto armado com barras de aço e de GFRP	108
3.2.1.1	Moldagem	111
3.2.1.2	Ambientes de exposição	113
3.2.1.3	Ensaio de flexão em três pontos	119
3.2.1.4	Instrumentação	122
3.2.2	Corpos de prova	126
3.2.2.1	Concreto	126
3.2.2.2	Aço	127
3.2.2.3	GFRP	128
3.2.2.3.1	Determinação do diâmetro efetivo	128
3.2.2.3.2	Determinação das propriedades mecânicas	129
3.2.2.3.3	Absorção de água	132
3.2.2.3.4	Teor de fibras	133
3.2.2.3.5	Composição química da fibra de vidro	134
3.2.2.4	Profundidade de penetração de cloretos	134
<b>3.3</b>	<b>Análise experimental – Barras de GFRP</b>	<b>135</b>
3.3.1	Moldagem da proteção de concreto	137
3.3.2	Ambiente de exposição	139
3.3.3	Ensaio em corpos de prova de concreto	141
3.3.3.1	Caracterização das propriedades mecânicas	142
3.3.3.2	Determinação da profundidade de penetração de cloretos	142
3.3.4	Ensaio em corpos de prova de GFRP	142
3.3.4.1	Determinação do diâmetro efetivo	142
3.3.4.2	Ensaio de tração	143
3.3.4.3	Absorção de água	143
3.3.4.4	Teor de fibras	144
3.3.4.5	Composição química das fibras de vidro	144
3.3.5	Ensaio microestruturais	145
3.3.5.1	MEV	145
3.3.5.2	FTIR	145
3.3.5.3	TGA	147
3.3.5.4	DSC	147
<b>3.4</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>148</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>149</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise experimental das vigas – Caracterização dos materiais</b>	<b>149</b>
4.1.1	Concreto	149
4.1.2	Aço	152
4.1.3	GFRP	153
4.1.3.1	Diâmetro efetivo	153
4.1.3.2	Propriedades mecânicas	154
4.1.3.3	Absorção de água após 24 horas de imersão	156
4.1.3.4	Teor de fibras	157
4.1.3.5	Composição química das fibras de vidro	157
4.1.4	Profundidade de penetração de cloretos	158
<b>4.2</b>	<b>Análise teórica</b>	<b>159</b>
4.2.1	Estudo dos modelos de dimensionamento	159
4.2.2	Previsão da capacidade resistente	163
<b>4.3</b>	<b>Análise experimental das vigas – Ensaio de flexão em três pontos</b>	<b>165</b>
4.3.1	Exposição de 5000 horas a ambiente laboratorial	168

4.3.2	Exposição de 10000 horas a ambiente laboratorial	171
4.3.3	Exposição de 5000 horas a solução salina	174
4.3.4	Exposição de 10000 horas a solução salina	176
4.3.5	Comparação entre vigas com armadura de aço e de GFRP	179
4.3.6	Comparação entre ambientes de exposição	183
4.3.7	Comparação com os resultados de Mazzú (2020)	187
4.3.8	Comparação com modelos normativos	190
<b>4.4</b>	<b>Análise experimental das barras de GFRP</b>	<b>194</b>
4.4.1	Concreto	194
4.4.1.1	Propriedades mecânicas	194
4.4.1.2	Profundidade de penetração de cloretos	195
4.4.2	GFRP	196
4.4.2.1	Diâmetro efetivo	197
4.4.2.2	Tração uniaxial	199
4.4.2.3	Absorção	209
4.4.2.4	Teor de fibras	215
4.4.2.5	Composição química das fibras de vidro	218
4.4.3	Análise microestrutural	218
4.4.3.1	MEV	219
4.4.3.2	FTIR	224
4.4.3.3	DSC	231
4.4.3.4	TGA	235
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>240</b>
5.1	Conclusões	240
5.2	Sugestões de trabalhos futuros	245
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>248</b>
	<b>APÊNDICE A</b>	<b>271</b>
A.1	ACI 440.11 (2022)	271
A.2	CAN CSA S806 (2012)	274
A.3	FIB <i>Bulletin</i> 40 (2007)	277
A.4	SP 295.1325800 (2017)	283
A.5	ABNT NBR 17196 (2025)	287
	<b>APÊNDICE B</b>	<b>292</b>
B.1	Vigas com armadura de aço – ACI 318 (2019)	292
B.2	Vigas com armadura de aço – ABNT NBR 6118 (2023)	295
B.3	Vigas com armadura de GFRP – ACI 440.11 (2022)	299
B.4	Vigas com armadura de GFRP – ABNT NBR 17196 (2025)	301
	<b>APÊNDICE C</b>	<b>303</b>
C.1	Ambiente Laboratorial	303
C.2	Solução salina	304

# 1. INTRODUÇÃO

Apesar de seu potencial em apresentar vida útil superior a 50 anos, as convencionais estruturas de concreto armado podem sofrer deterioração precoce por volta de 10 a 15 anos devido à corrosão das armaduras, exigindo intervenção corretiva significativa (Grochoski; Helene, 2008). Segundo Mazzú (2020), erros de projeto e execução, falta de acompanhamento e manutenções preventivas, bem como a desconsideração da agressividade do ambiente no momento do projeto são problemas encontrados e que impactam diretamente na durabilidade da estrutura. De acordo com Felix *et al.* (2018), a gestão da durabilidade da infraestrutura civil envolve expressivos gastos e requer que decisões difíceis sejam tomadas para o estabelecimento de prioridades de manutenção, reabilitação e substituição.

Segundo Oliveira *et al.* (2007), os custos de manutenção das estruturas podem ultrapassar 40% do custo de execução de uma obra, além de serem observadas perdas com reabilitação de obras deterioradas que atingem entre 1,25 % e 3,5 % do PIB de países em desenvolvimento, considerando-se apenas a corrosão das armaduras. Grochoski e Helene (2008) afirmam que deficiências no conhecimento dos materiais, na concepção, projeto, construção e manutenção das estruturas podem acarretar grande perdas diretas e indiretas para a sociedade, uma vez que os custos sociais e econômicos indiretos são de mais difícil avaliação, não constam nas estatísticas e em alguns casos são irressarcíveis.

Quando utilizado como armadura no interior do concreto, o aço é protegido contra a corrosão tanto pela barreira física do concreto quanto pela barreira química proporcionada pela sua alta alcalinidade (Hollaway, 2003; FIB *Bulletin* 40, 2007; ACI 440.1R, 2015; Alkhraisha, Abed, 2023). Contudo, em matrizes fissuradas, ambientes agressivos ou quando a alcalinidade do concreto é neutralizada, a armadura de aço pode sofrer corrosão, levando ao destacamento da camada de cobrimento de concreto. Os códigos de dimensionamento recomendam espessuras mínimas de cobrimento de concreto, além de apresentarem outras medidas para controle da abertura de fissuras e redução da permeabilidade do concreto, a fim de garantir a vida útil de 50 anos. Apesar disto, o ataque de agentes ambientais é muitas vezes inevitável e em algum momento as propriedades alcalinas do cobrimento de concreto acabam reduzidas, podendo levar à processos corrosivos da armadura (FIB *Bulletin* 40, 2007).

Além disso, desafios atuais no campo da Engenharia Civil, tais como a escassez de água doce e o esgotamento da areia de rios (Xiong *et al.*, 2022), resultam na necessidade de se encontrar matérias primas alternativas que garantam o desenvolvimento sustentável,

dentre as quais destaca-se o uso de água e areia do mar (Wang *et al.*, 2022), dando origem ao “*seawater-sea sand concrete*” – SWSSC (concreto com água e areia do mar, em língua inglesa). Segundo Khatibmasjedi *et al.* (2020), a água doce é um recurso finito e sua substituição por água do mar na produção do concreto pode ser vantajosa, especialmente em regiões como o Oriente Médio nas quais a água doce pode ser escassa. Entretanto, a utilização de água ou areia do mar não é recomendada pela maioria dos códigos de construção devido à potencial corrosão da armadura de aço (Ghorab, Hilal, Kishar, 1989; Younis *et al.*, 2018). A presença de íons cloreto em excesso no SWSSC acelera a corrosão eletroquímica das barras de aço, desencadeando problemas relacionados à durabilidade da estrutura de concreto com armadura de aço (Xiao *et al.*, 2017; Lu *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2023; Pan *et al.*, 2023).

Nesse sentido, o estudo de novos materiais e sistemas construtivos se faz necessário. Assim, a aplicação de armaduras não metálicas de FRP (*Fiber Reinforced Polymer* – Polímero Reforçado com Fibras) como alternativa à utilização do aço carbono pode ser vantajosa devido à boa resistência à corrosão deste material, a qual é uma de suas principais características.

De acordo com o ACI 440.9R (2015), o FRP é um material compósito formado pela combinação de um material de reforço (fibras) e uma matriz polimérica (resina). Os tipos de fibras mais utilizados são as fibras de carbono, vidro, aramida e basalto, originando o CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer* – Polímero Reforçado com Fibras de Carbono), GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer* – Polímero Reforçado com Fibras de Vidro), AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymer* – Polímero Reforçado com Fibras de Aramida) e BFRP (*Basalt Fiber Reinforced Polymer* – Polímero Reforçado com Fibras de Basalto). Dentre os tipos de FRP, as armaduras de GFRP tem atraído maior atenção devido à sua disponibilidade, relação custo-benefício e respeito ao meio ambiente (Gooranorimi, Nanni, 2017; Arczewska, Polak, Penlidis, 2021; Al-Khafaji *et al.*, 2021; Ifrahim, Sangi, Ahmad, 2023).

O FRP é um material que apresenta excelente resistência à corrosão, alta resistência à tração, neutralidade magnética e leveza, características que podem propiciar maior segurança e vida útil (Chen *et al.*, 2007; Robert *et al.*, 2010; Issa, Metwally, Elzeiny, 2011; Hassan *et al.*, 2016; Solyom, Di Benedetti, Guadagnini, 2020; Wu *et al.*, 2021; Manalo *et al.*, 2022). Contudo, existem algumas condições que afetam a durabilidade do FRP, entre as quais se destacam a umidade (abrangendo a presença de água ou soluções salinas), soluções químicas, ambientes alcalinos, temperaturas extremas ou ciclos térmicos, gelo e degelo, fadiga e radiação ultravioleta (ACI 440.9R, 2015; Wu *et al.*, 2023). Em comparação com outros ambientes, o meio alcalino é considerado o mais agressivo para barras de GFRP, devido à presença de íons OH<sup>-</sup> livres que reagem com a matriz polimérica por meio da hidrólise, acelerando a penetração de moléculas de água na matriz por osmose e danificando a interface

entre fibras e matriz (Zhu *et al.*, 2011; Al-Salloum *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2015). Nas barras de GFRP, os íons  $\text{OH}^-$  podem também reagir com o  $\text{SiO}_2$  das fibras de vidro, provocando perda das propriedades mecânicas e comprometendo o desempenho do material em razão da degradação química (Kuttner *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2017a; Wu *et al.*, 2022b). A solução contida nos poros do concreto é alcalina, com pH entre 12,5 e 13,5, podendo acelerar significativamente a degradação das barras de GFRP quando utilizadas como armadura (Wu *et al.*, 2023). Assim, tendo em vista que o uso de barras de GFRP como armadura em estruturas de concreto se destaca devido às suas excelentes propriedades, qualquer deterioração das barras afeta negativamente a durabilidade da estrutura. Por esse motivo, é importante compreender de forma abrangente os mecanismos de degradação das barras de GFRP sob condições de serviço (Wang *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2023). Entretanto, de acordo com He, Dai e Yang (2017), a escassez de dados sobre o desempenho a longo prazo de estruturas reais de concreto com armadura de FRP é o maior obstáculo para a aceitação mais ampla deste tipo de material em aplicações de engenharia.

O desempenho de materiais ou estruturas em serviço sob condições de envelhecimento natural pode ser avaliado por monitoramento por meio de ensaios não destrutivos ou pela análise física de componentes retirados de serviço (Thomason, Xypolias, 2023). A investigação laboratorial do envelhecimento ambiental sob condições normais pode durar muitos anos, e os prazos podem ir além da duração de muitos estudos acadêmicos (Thomason, 1995; Mourad *et al.*, 2019; Idrisi, Mourad e Sherif, 2021). Uma das maneiras de identificar e avaliar as vulnerabilidades no comportamento dos FRPs a longo prazo é a aplicação de protocolos de acondicionamento acelerado, nos quais a temperatura é utilizada como agente acelerador. Muitos pesquisadores realizaram ensaios de envelhecimento acelerado, utilizando diferentes tipos de barras de GFRP sob variadas condições de exposição (Robert, Cousin, Benmokrane, 2009; Robert *et al.*, 2010; Almusallam *et al.*, 2012; Robert, Benmokrane, 2013; Al-Salloum *et al.*, 2013; Gooranorimi *et al.*, 2017; He, Dai, Yang, 2017; Benmokrane *et al.*, 2017a; Fergani *et al.*, 2018; Lu *et al.*, 2020; Jia *et al.*, 2020; Khatibmasjedi *et al.*, 2020; Manalo *et al.*, 2020b; Morales *et al.*, 2021; Lu, Yang, He, 2021; Emparanza *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2022b; Wang *et al.*, 2023; Sun *et al.*, 2023; Lu *et al.*, 2023; Sun *et al.*, 2024; Al-Zahrani, 2024; Wang *et al.*, 2024). Segundo Almusallam e Al-Salloum (2006), ensaios acelerados são necessários para avaliar o desempenho de serviço esperado de barras individuais de GFRP bem como de vigas de concreto armadas com essas barras.

O ACI 440.9R (2015) apresenta procedimentos para que a durabilidade do FRP seja avaliada utilizando-se protocolos de acondicionamento acelerado (*Accelerated Conditioning Protocols* – ACPs) combinados com ensaios padronizados para a caracterização das propriedades mecânicas. Tais procedimentos são uma descrição do ambiente e das tensões que devem ser impostas a amostras de barras de FRP durante o período de

acondicionamento. Assim, o ACI 440.9R (2015) descreve procedimentos para fabricação e preparação das amostras de barras de FRP, protocolos de acondicionamento acelerado e ensaios mecânicos para a determinação das propriedades das amostras.

De forma geral, os ensaios acelerados recomendados para a avaliação da durabilidade de barras de FRP, tais como os protocolos do ACI 440.9R (2015) e da ABNT NBR 17201-12 (2024), são realizados em amostras de barras de FRP e não consideram a interação com o concreto circundante. Em situações reais, a armadura de FRP não estará diretamente exposta à agressividade do ambiente, uma vez que permanece imersa no concreto. Quando barras de GFRP são aplicadas como armadura, essas permanecem incorporadas em um ambiente cimentício que pode ser agressivo para as fibras de vidro devido ao alto nível de pH da solução contida em seus poros e à presença de íons alcalinos (Robert, Cousin, Benmokrane, 2009). Assim, é necessário explorar a durabilidade de barras de GFRP no interior do concreto, especialmente quando expostas a condições agressivas (Almusallam *et al.*, 2012; Robert, Benmokrane, 2013; Silva, Fonseca, Biscaia, 2014).

Segundo Wang *et al.* (2023), estudos a respeito da durabilidade de barras de FRP e vigas armadas com barras de FRP têm sido conduzidos separadamente, resultando na incapacidade de se estabelecer uma correlação entre a degradação das barras de FRP e das vigas com armadura de FRP. Wang *et al.* (2023) submetem barras de GFRP revestidas com uma camada de concreto do tipo SWSSC e vigas de concreto do tipo SWSSC armadas com barras de GFRP ao envelhecimento acelerado por meio de ciclos de molhagem e secagem em solução de NaCl com concentração de 3,5 %. Os autores propuseram um modelo de correção que considera a deterioração das barras de GFRP para estimar a resistência residual à flexão das vigas expostas ao ambiente rico em cloretos. Os resultados obtidos indicaram que uma degradação de 36 % na resistência das barras de GFRP levaria a uma redução de 15 % na resistência à flexão das vigas condicionadas. A ABNT NBR 17196 (2025) menciona que a avaliação do desempenho do componente ou sistema estrutural em relação à durabilidade, visando assegurar sua vida útil, pode ser realizada por meio de ensaios acelerados conduzidos por laboratórios acreditados, de maneira a se obter parâmetros qualitativos.

Nesse sentido, é de grande importância a realização de ensaios de envelhecimento acelerado não apenas em barras de GFRP, mas no elemento estrutural como um todo. Nesta pesquisa foi aplicado o protocolo de acondicionamento acelerado do ACI 440.9R (2015), originalmente proposto para amostras de barras de GFRP, em vigas de concreto armadas com barras de aço e de GFRP em escala real. Assim, tais vigas foram submetidas à degradação acelerada pela ação de solução salina, com o objetivo de se analisar, comparativamente, seu comportamento mecânico e sua durabilidade. Após a aplicação do protocolo de acondicionamento acelerado, as vigas foram submetidas a ensaios de flexão em

três pontos para a determinação de sua capacidade resistente, deslocamento vertical e deformações no concreto, aço e GFRP. Este trabalho dá continuidade ao estudo iniciado por Mazzú (2020), no qual foram avaliadas as vigas de referência e vigas após 1000 horas de imersão em solução salina. Nesta pesquisa, foram avaliadas as vigas após 5000 e 10000 horas de imersão em solução salina, aprofundando-se a análise dos efeitos da degradação sobre o desempenho estrutural. Desta forma, pretendeu-se avaliar a viabilidade da aplicação de uma metodologia proposta para amostras de barras, utilizando-a na análise da durabilidade de elementos de concreto com armadura de FRP.

Posteriormente, neste trabalho, foi investigada também a degradação das barras de GFRP em si, submetidas ao mesmo protocolo de acondicionamento acelerado aplicado às vigas e, em seguida, a ensaios de tração axial. Foram realizados, ainda, ensaios microestruturais nas barras de GFRP para analisar os mecanismos de degradação quando expostas à solução salina.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 GERAL**

Este trabalho apresentou como objetivo geral avaliar a durabilidade de vigas de concreto armadas com barras de aço e de GFRP, em escala real, por meio da aplicação do protocolo de acondicionamento acelerado do ACI 440.9R (2015), considerando-se a imersão em solução salina.

### **1.1.2 ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos foram:

- Analisar as abordagens para consideração da durabilidade a longo prazo de armaduras de FRP de modelos para o dimensionamento de vigas de concreto com armadura de FRP (ACI 440.11, 2022; FIB *Bulletin* 40, 2007; SP 295.1325800, 2017; CAN CSA S806, 2012; e ABNT NBR 17196, 2025), comparando resultados teóricos aos dados experimentais de Mazzú (2020);
- Avaliar e comparar o comportamento mecânico e a durabilidade das vigas de concreto com armadura de aço e de GFRP, após exposição à solução salina por 5000 e 10000 horas, aplicando-se o protocolo de acondicionamento acelerado do ACI 440.9R (2015);
- Comparar os resultados experimentais obtidos neste trabalho aos resultados prévios obtidos por Mazzú (2020), relativos às vigas de concreto com armadura de aço e de GFRP na condição de referência e após 1000 horas de imersão em solução salina;

- Confrontar os resultados experimentais com os cálculos teóricos baseados nas prescrições das normas ACI 318 (2019) e ABNT NBR 6118 (2023) para vigas com armadura de aço, e ACI 440.11 (2022) e ABNT NBR 17196 (2025) para as vigas com armadura de GFRP;
- Avaliar o comportamento mecânico e a durabilidade da barra de GFRP, bem como a influência do cobrimento de concreto, após imersão em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas, aplicando-se o protocolo de condicionamento acelerado do ACI 440,9R (2015);
- Comparar as propriedades mecânicas e físico-químicas das barras de GFRP aos requisitos das normas ABNT NBR 17201, partes 1 a 12 (2025);
- Identificar os mecanismos de degradação da barra de GFRP por meio de ensaios microestruturais (MEV, FTIR, TGA e DSC); e
- Avaliar criticamente a aplicação do protocolo de condicionamento acelerado do ACI 440.9R (2015) em elementos estruturais e em barras isoladas de GFRP.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A corrosão das armaduras de aço, sobretudo devido ao ataque de cloretos, é uma das principais causas da deterioração de estruturas de concreto armado (Neville, 1995; Park, Kim, Lee, 2014; Lu *et al.*, 2017). Conforme afirma Head *et al.* (2015), no ano de 1997 a Lei de Eficiência do Transporte Intermodal de Superfície (ISTEA – *Intermodal Surface Transportation Efficiency Act*) gastou 2,5 bilhões de dólares com o *Highway Bridge Replacement Program* (Programa de Substituição de Pontes Rodoviárias), sendo a maioria dos fundos destinada à substituição ou reabilitação de tabuleiros de pontes que foram deteriorados por problemas de corrosão das armaduras. Os autores ainda afirmam que das cerca de 600.000 pontes dos Estados Unidos, mais de 25% são classificadas como estruturalmente deficientes e funcionalmente obsoletas, sendo necessários cerca de 9,4 bilhões de dólares por 20 anos para repará-las. Segundo Abdelkarim *et al.* (2019), estatísticas indicam que 85 % das falhas em pontes no mundo, entre 1980 e 2012, ocorreram na América do Norte, sendo 5 % dessas falhas causadas pela corrosão do aço.

Um estudo realizado em 2016 pela Associação Nacional de Engenheiros de Corrosão (NACE – *National Association of Corrosion Engineers*) estimou que o impacto da corrosão das barras de aço utilizadas em estruturas de concreto armado na economia global era de cerca de 2,5 trilhões de dólares, tendo como principal causa a desativação de emergência de estruturas. Assim, Accornero *et al.* (2023) destacam a necessidade de manutenção, adaptação ou, eventualmente, reconstrução a partir do zero da rede de infraestruturas.

Com relação ao Brasil, segundo Oliveira, Greco e Bittencourt (2019), em um inventário realizado pelo DNIT em 2017 (Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes), 66%

dos danos observados nas 4725 pontes registradas estão associados à corrosão das armaduras de aço carbono e à degradação do concreto. A corrosão das armaduras de aço em estruturas de concreto armado resulta no destacamento da camada de cobrimento de concreto, causando, conseqüentemente, a redução da vida útil e incorrendo em grandes custos de manutenção e reparação (Alonso *et al.*, 1998; Bilcik, Holly, 2013).

De acordo com Wu *et al.* (2022a), a redução da seção transversal das barras de aço devido à corrosão resulta no aumento de tensões até que o limite de resistência do material seja excedido e a barra sofra ruptura. Além disso, segundo Wu *et al.* (2023), o volume da barra de aço pode aumentar entre 3 e 5 vezes devido ao volume dos produtos da corrosão, incrementando as tensões radiais entre a barra de aço e o concreto. Assim, quando a componente da tensão radial na direção da tensão de tração no concreto exceder a tensão de tração última do concreto, este apresentará fissuração e destacamento, reduzindo significativamente a capacidade resistente da estrutura de concreto (Al-Hammoud, Soudki, Topper, 2010; Lu, Yang, He, 2021). Desta forma, a resolução do problema da corrosão das armaduras de aço em ambientes agressivos pode garantir a capacidade resistente e a durabilidade das estruturas de concreto (Wu *et al.*, 2023).

Segundo Head *et al.* (2015), ao longo do tempo foram desenvolvidas novas técnicas e materiais com vistas a minimizar os problemas relacionados à corrosão das armaduras de aço, tais como a utilização de barras revestidas com epóxi, armaduras e cordoalhas de aço galvanizadas, armaduras revestidas com uma combinação de zinco e epóxi, armaduras de aço inoxidável ou apenas revestidas com aço inoxidável e a utilização das armaduras de FRP.

A aplicação de armaduras de FRP apresenta vantagens como resistência à corrosão, elevada resistência à tração, baixo peso e transparência a campos eletromagnéticos (Emparanza *et al.*, 2018; Morales *et al.*, 2021). Gonçalves (2013) afirma que as barras de GFRP apresentam uma densidade entre 1,25 e 2,10 g/cm<sup>3</sup>, sendo aproximadamente 25% da densidade das barras de aço convencionais (7,90 g/cm<sup>3</sup>). Assim, a leveza das barras de GFRP resulta em menores custos associados ao seu transporte, manuseio e instalação (Manalo *et al.*, 2020a).

Além disso, as barras de FRP apresentam uma pegada de carbono menor do que as barras de aço convencionais, as quais requerem a utilização de altas temperaturas para sua produção (Pearson *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2023). Katz (2004) realizou um estudo no qual comparou os impactos ambientais de pavimentos com armadura de aço e de FRP, concluindo que a utilização do FRP como armadura resulta em impacto ambiental significativamente inferior quando comparada à utilização do aço. Ozcoban (2017) comparou as emissões de CO<sub>2</sub> e consumo energético de uma ponte de concreto armado com aço e uma ponte de concreto armado com barras de FRP e observou que o uso de FRP resulta em 50 % menos CO<sub>2</sub> e 59 % menos energia incorporada em todas as fases da avaliação de seu ciclo de vida,

tendo como base uma previsão de vida útil igual para as duas pontes analisadas. Duarte *et al.* (2021) realizaram um estudo de caso no qual compararam a emissão de CO<sub>2</sub> e o consumo energético de vigas de concreto armado com barras de aço e vigas de concreto armado com barras de GFRP e BFRP. Os autores observaram que, em virtude de seu menor peso, as vigas armadas com FRP apresentaram melhor desempenho ambiental, com reduções de 67,70 % e 75,63 % nas emissões de CO<sub>2</sub> para as armaduras de GFRP e BFRP, respectivamente, em relação ao aço. Os autores observaram ainda um consumo energético para a produção das barras de GFRP 64,31 % inferior ao do aço. Dessa forma, a utilização de barras de GFRP como armadura no campo da engenharia civil pode reduzir o uso de aço e emissões de carbono, bem como melhorar a vida útil de serviço de estruturas de concreto em ambientes agressivos (Bank, Gentry, Barkatt, 1995; Yang *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2021).

De acordo com o ACI 440.9R (2015), se corretamente projetados e fabricados, os FRPs podem prover uma vida útil mais longa e menores custos de manutenção do que quando aplicadas armaduras de aço convencional nas estruturas de concreto armado. Segundo Al-Zahrani (2024), pesquisas e investigações de campo revelam que as barras de GFRP aplicadas como armadura em estruturas de concreto apresentam um desempenho satisfatório da durabilidade a longo prazo, especialmente em estruturas expostas a condições ambientais severas, como o contato com a água do mar (Wang *et al.*, 2017a; Wang *et al.*, 2017b; Empananza *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018b; Khatibmasjedi, Nanni, 2018; Morales *et al.*, 2021). Contudo, a utilização do GFRP como armadura em estruturas de concreto armado é recente quando comparada à utilização de armadura de aço convencional. Assim, os dados disponíveis a respeito de seu desempenho a longo prazo não são expressivos para a garantia de vida útil com confiança pelos projetistas de estruturas, sobretudo no Brasil, onde o uso deste tipo de material é ainda mais recente. A análise do desempenho à longo prazo do FRP é necessária para uma aceitação e aplicação mais ampla por parte de engenheiros e agências de normatização (Al-Zahrani, 2024). Desta forma, é importante que as vulnerabilidades relacionadas à durabilidade do material sejam identificadas e que medidas preventivas sejam tomadas, de maneira a se garantir um desempenho satisfatório a longo prazo.

O ACI 440.9R (2015) propõe protocolos de acondicionamento acelerado que devem ser aplicados a amostras de FRP durante períodos pré-definidos, os quais, em combinação com ensaios mecânicos, permitem avaliar a durabilidade do material. Tais protocolos, no entanto, são voltados à caracterização de amostras de FRP isoladas, e não de elementos estruturais com armadura de FRP. As condições adotadas nesses ensaios, como a exposição a soluções altamente alcalinas ou salinas, têm o objetivo de simular ambientes agressivos, como aqueles associados ao interior do concreto ou a meios marinhos, mas tendem a ser mais severas do que o envelhecimento natural, especialmente considerando as condições

reais de serviço das barras embutidas em concreto (Debaiky *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2007; El-Hassan, El-Maaddawy, 2019; Tu, Xie, Gao, 2020).

Chen *et al.* (2007) analisaram a durabilidade de barras de GFRP expostas, diretamente e no interior do concreto, à envelhecimento acelerado. Os autores observaram que após sua exposição a uma solução que simula o conteúdo presente nos poros do concreto, a 60 °C, durante 2 meses, as barras de GFRP diretamente expostas apresentaram uma retenção da resistência à tração de 52 %, enquanto as barras protegidas por concreto e expostas às mesmas condições, durante 3 meses, apresentaram retenção da resistência à tração de 61 %. Portanto, os autores concluíram que o envelhecimento acelerado é mais agressivo para as barras de GFRP diretamente expostas do que quando estas encontram-se no interior do concreto. Assim, aplicando os procedimentos de envelhecimento acelerado em elementos estruturais em escala real com armadura de FRP, os resultados obtidos são mais próximos da realidade encontrada em campo (Morales *et al.*, 2021).

Além disso, segundo Emparanza *et al.* (2022), as soluções agressivas, a duração da exposição e a temperatura aplicada variam significativamente nos estudos sobre a durabilidade do FRP que utilizam a técnica de envelhecimento acelerado. A maioria dos estudos condicionam barras de FRP durante menos de um ano, com temperatura variando principalmente entre 23 °C e 60 °C. A imersão em soluções alcalinas ou embutimento em diferentes tipos de concreto são as condições de exposição predominantes, seguidas das soluções salinas que simulam a água do mar. D'Antino, Pisani e Poggi (2018) coletaram 356 resultados de ensaios de tração em barras de GFRP na literatura e realizaram uma análise comparativa sobre o efeito de diferentes condições de exposição (soluções alcalinas, soluções salinas e água), com períodos e temperaturas de exposição diversos, na resistência residual das barras de GFRP. Fatores como a fração volumétrica de fibras na barra, o tipo de matriz polimérica e o modo de falha também foram considerados. Segundo Lu, Yang e He (2021), tal análise comparativa apresentou resultados contraditórios e tendências incompatíveis. D'Antino, Pisani e Poggi (2018) observaram diferenças significativas nas metodologias, procedimentos e interpretação dos resultados e explicam que a dispersão dos resultados pode ser devida à tais variações. Duo *et al.* (2021) explicam que resultados presentes na literatura algumas vezes se contradizem para uma mesma condição. Por exemplo, Kim *et al.* (2008) obtiveram retenção de resistência à tração de 70,4 % após 1440 horas de exposição à solução alcalina a 40 °C, enquanto Won *et al.* (2008) obtiveram retenção de 95,2 % para barra de GFRP fabricada com o mesmo tipo de fibra, resina e diâmetro utilizando o mesmo tempo, temperatura e pH de exposição. D'Antino, Pisani e Poggi (2018) advertem que é urgentemente necessária uma padronização dos procedimentos experimentais, de tal forma que a eficácia, a confiabilidade da configuração dos ensaios e a aplicação de condições ambientais que reproduzam corretamente as condições reais de

campo, sem a introdução de fontes adicionais de degradação, sejam garantidas. Ainda, segundo os autores, as discrepâncias observadas sugerem a necessidade de novos estudos envolvendo elementos de concreto armados com barras de GFRP e expostos a condições agressivas, visando obter estimativas mais confiáveis sobre a durabilidade do compósito.

Diante desse cenário, este trabalho propôs uma abordagem inédita ao aplicar os protocolos de acondicionamento acelerado recomendados pelo ACI 440.9R (2015) diretamente em elementos estruturais em escala real, e não apenas nas barras de GFRP isoladas, considerando-se a imersão em solução salina. Embora alguns estudos tenham realizado o acondicionamento acelerado de elementos estruturais, os ensaios costumam ser realizados em amostras de barras extraídas dos elementos após o envelhecimento (Almusallam, Al-Salloum, 2006; Davalos, Chen, Ray, 2011; Khatibmasjedi *et al.*, 2020), o que pode não refletir integralmente os efeitos das condições de exposição sobre o desempenho global da estrutura. Assim, a hipótese levantada neste trabalho é que a aplicação direta dos protocolos de acondicionamento em vigas de concreto armado permite avaliar de maneira mais realista o impacto da exposição agressiva sobre o desempenho mecânico do sistema como um todo, considerando-se a interação entre o concreto e a armadura ao longo do tempo. Com isso, buscou-se contribuir com o avanço do conhecimento a respeito da aplicação do GFRP como armadura em estruturas de concreto armado, ampliando as possibilidades de aplicação segura do material, tendo em vista o comportamento estrutural e a durabilidade em longo prazo.

Considerando a elaboração das primeiras normas técnicas brasileiras a respeito da utilização e caracterização de armaduras de FRP, espera-se contribuir também com o conhecimento acerca do material produzido na indústria brasileira, bem como com o estabelecimento de procedimentos que permitam obter e analisar, de forma acelerada, o comportamento mecânico de elementos de concreto com armadura de FRP.

### **1.3 PROBLEMA DE PESQUISA**

De acordo com o ACI Committee 440 (2008), os FRPs permitem a concepção de sistemas mais resistentes à agressividade do meio ambiente quando comparados a materiais tradicionais como o concreto e o aço, podendo resultar em soluções mais duráveis e econômicas. O ACI 440.9R (2015) menciona que quando bem projetado, fabricado e instalado, o FRP se configura como um material sustentável e durável para as estruturas de concreto.

Segundo a ABNT NBR 6118 (2023), a despassivação da armadura de aço pode acontecer devido à ação do CO<sub>2</sub> e devido à ação de cloretos. No contexto do Brasil, grande parte das grandes cidades localizam-se em regiões litorâneas, as quais apresentam maiores índices de corrosão nas armaduras metálicas pela ação do ambiente agressivo, apresentando

potencial para a aplicação de armaduras de FRP (Mazzú, 2020). O uso de FRP em estruturas de concreto com propósitos anti-corrosão encontra aplicações em estruturas em ambientes marinhos, estruturas enterradas, plantas industriais e lugares onde a boa qualidade do concreto não possa ser assegurada (FIB *Bulletin* 40, 2007).

Os FRPs começaram a ser mais utilizados como armaduras em estruturas de concreto armado nos anos 80 e quase todas as estruturas deste tipo foram concebidas para terem uma vida útil de mais de 40 anos, assim, os dados a respeito de seu desempenho a longo prazo são limitados (ACI 440.9R, 2015; Gajdosová *et al.*, 2020; Morales *et al.*, 2021), sobretudo no Brasil, onde este tipo de material não é comumente utilizado.

Ainda que não sofram corrosão, como no caso das armaduras de aço, de acordo com o ACI 440.9R (2015) as armaduras de GFRP sofrem degradação principalmente pela ação da umidade e da alcalinidade. Desta maneira, é necessário avaliar a durabilidade do FRP quando aplicado como armadura em elementos de concreto submetidos a ambientes agressivos, identificando-se suas vulnerabilidades e garantindo-se o aproveitamento de suas potencialidades com segurança.

A durabilidade do FRP no interior do concreto tem sido predominantemente medida por meio de ensaios acelerados nos quais amostras são expostas a ambientes mais agressivos do que os normalmente encontrados na realidade, sendo utilizados os dados obtidos para extrapolar estimativas de seu comportamento a longo prazo (FIB *Bulletin* 40, 2007). De acordo com Al-Zahrani (2024), a imersão direta, a qual envolve a completa submersão de amostras em soluções que buscam simular as condições reais impostas, é a técnica de envelhecimento acelerado mais adotada. No entanto, essa técnica expõe as amostras a ambientes de condicionamento agressivos que levam a reações químicas mais rápidas e intensas com o material, em comparação com a exposição *in situ*. Essa diferença nas condições de exposição pode resultar em mecanismos de envelhecimento distintos entre a imersão direta e cenários de exposição *in situ*. Ainda assim, a técnica de imersão direta é geralmente recomendada e seguida por pesquisadores que trabalham com a durabilidade do FRP. As alterações mecânicas na resistência à tração, cisalhamento interlaminar, aderência e módulo de elasticidade são os melhores indicadores indiretos da durabilidade da armadura de FRP, as quais podem ser complementadas pelo estudo das propriedades físicas e microestruturais do material (FIB *Bulletin* 40, 2007).

Sen, Mullins e Salem (2002) mostraram que barras de GFRP fabricadas com resina do tipo vinil éster e fibras de vidro do tipo E expostas a uma solução alcalina sofreram redução de 70 % em sua resistência à tração após 9 meses. Davalos, Chen e Ray (2011), determinaram, com base em um modelo de previsão, que barras de GFRP fabricadas com resina do tipo vinil éster e fibras de vidro do tipo E retêm apenas 38 % de sua resistência à tração após 50 anos de exposição em concreto saturado e carregado, mantido a 10 °C. Tais

resultados poderiam sugerir que barras de GFRP não são adequadas para serem aplicadas como armadura no interior do concreto. Em contrapartida, alguns pesquisadores indicam que barras de GFRP apresentam deterioração física insignificante, mesmo após exposição acelerada a soluções alcalinas e salinas (Benmokrane *et al.*, 2017a; Benmokrane *et al.*, 2017c). Modelos de previsão utilizados por vários pesquisadores sugerem que as barras de GFRP podem manter a maior parte de sua resistência mesmo após 100 anos de serviço (Benmokrane *et al.*, 2002; Karbhari *et al.*, 2003; Nkurunziza *et al.*, 2005). Essas aparentes contradições e inconsistências nos resultados de ensaios acelerados podem estar relacionadas à falta de informações adequadas sobre os materiais utilizados, às diferentes geometrias e técnicas de fabricação adotadas, bem como à qualidade dos materiais utilizados (Karbhari, 2007).

Apesar de já existirem normas e recomendações técnicas nacionais e internacionais que apresentem parâmetros orientativos para o uso do FRP em projetos estruturais, como o ACI 440.11 (2022) e ABNT NBR 17196 (2025), os dados disponíveis ainda são limitados ou conservadores, especialmente no que se refere ao desempenho a longo prazo em condições reais de serviço. Embora tais documentos forneçam diretrizes fundamentais para o dimensionamento e aplicação de armaduras de FRP, a ausência de consenso internacional quanto aos métodos de ensaio para avaliação da durabilidade, a variabilidade nos processos produtivos dos materiais compósitos, a diversidade de fibras e resinas disponíveis no mercado, e a escassez de dados provenientes de estruturas monitoradas em campo dificultam a formulação de recomendações mais precisas e amplamente aplicáveis. Dessa forma, ainda é necessário avançar na padronização e validação de métodos de ensaio, de modo que a comunidade científica internacional possa recomendar, com maior confiança, procedimentos representativos e reproduzíveis que subsidiem de forma segura e eficaz o projeto de estruturas com FRP.

#### **1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS**

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução ao tema, incluindo o objeto de estudo, a problemática abordada, motivação da pesquisa, os objetivos propostos e a estrutura da tese. O segundo capítulo traz a revisão bibliográfica, com informações sobre o FRP, suas fases constituintes, processo de fabricação, propriedades físicas e mecânicas, aspectos relacionados à durabilidade e aplicações em vigas de concreto armado, além da descrição de procedimentos de dimensionamento segundo normas americanas, canadenses, europeias, russas e brasileiras. O terceiro capítulo descreve a metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho, contemplando as análises teóricas e experimentais realizadas com vigas de concreto e barras de GFRP. Os resultados obtidos e as respectivas discussões são apresentados no quarto capítulo. Por fim,

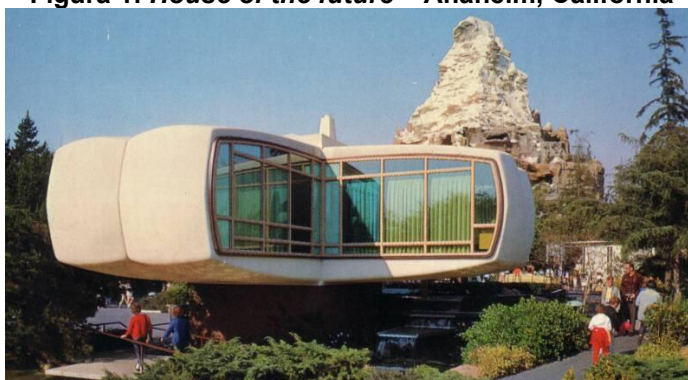
o quinto capítulo reúne as conclusões do estudo e sugestões para trabalhos futuros. Ao final, são apresentados as referências bibliográficas consultadas e os Apêndices, que reúnem informações complementares ao conteúdo desenvolvido.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A expansão da utilização do FRP na indústria da construção civil se deu após a 2ª Guerra Mundial, nos anos 40, segundo o ACI 440.1R (2015). Anteriormente, o FRP era mais utilizado na indústria da defesa, especificamente em aplicações aeroespaciais e navais devido à sua alta relação resistência-peso e sua inerente resistência aos efeitos corrosivos do clima, névoa salina e do mar (ACI 440.R, 2007). Tais benefícios dos compósitos de FRP, especialmente os relacionados à resistência à corrosão, promoveram sua utilização em outros setores. Assim, desde o início dos anos 50, o FRP tem sido muito utilizado em equipamentos de processamento químico, papel e celulose, energia, tratamento de resíduos, refino de metal e em outras indústrias de manufatura (ACI 440.R, 2007). De acordo com Tavares (2006), a primeira aplicação deste material em estruturas de concreto se deu por volta dos anos 50, com algumas pesquisas nos EUA nos anos 60 e na Europa e Japão nos anos 70. Segundo Dalfré e Parsekian (2022), foi desenvolvida a *House of the future*, a qual ficou aberta para visitação entre 1957 e 1967 no *Tomorrowland* da Disneylândia, em Anaheim na Califórnia (Figura 1). Esta construção, na qual foram utilizados 30000 quilos de poliéster reforçado com fibra de vidro sob a forma de painéis-sanduíche, tapetes e mobiliário, foi idealizada pela Monsanto e o MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) para demonstrar a versatilidade do uso dos plásticos modernos.

**Figura 1: *House of the future* – Anaheim, Califórnia**



Fonte: Dalfré (2007)

Nos anos 80, houve o ressurgimento do interesse neste material quando novos desenvolvimentos foram motivados pelo uso de armaduras de FRP em estruturas de concreto

que possuíam requisitos de desempenho especiais, como propriedades não magnéticas ou sua aplicação em áreas sujeitas a ataques químicos severos (ACI 440.R, 2007).

Segundo o FIB *Bulletin* 40 (2007), em 1996 o projeto EUROCRETE executou no Reino Unido a primeira passarela de concreto com armadura totalmente composta por FRP (Figura 2).

**Figura 2: Primeira passarela de concreto da Europa com armadura de FRP**



Fonte: FIB *Bulletin* 40 (2007)

Uma linha cronológica do desenvolvimento de algumas recomendações de projeto é apresentada na Figura 3. Segundo o FIB *Bulletin* 40 (2007), os pioneiros das recomendações de projeto de estruturas de concreto com armadura de FRP foram os japoneses em 1996, os quais forneceram a base para as diretrizes e códigos subsequentes.

**Figura 3: Desenvolvimento cronológico mundial de recomendações para projeto de estruturas de concreto com armadura de FRP**

1818	1849	1887	1904
A Instituição de Engenheiros Civis ( <i>Institution of Civil Engineers</i> ) foi fundada no Reino Unido	Invenção do concreto armado	A Sociedade Canadense de Engenharia Civil (CSCE - <i>Canadian Society for Civil Engineering</i> ) foi fundada	O Instituto Americano de Concreto (ACI - <i>American Concrete Institute</i> ) foi fundado
1910	1941	1953	1964
O primeiro código de construção do ACI foi publicado	A primeira edição do ACI 318 foi publicada	O Comitê Euro-Internacional do Concreto (CEB - <i>Comité Euro-International du Béton</i> ) foi fundado	A primeira recomendação internacional do CEB foi publicada
1970s	1987	1991	1992
Uso do FRP em estruturas de concreto armado	A Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis (JSCE - <i>Japan Society of Civil Engineers</i> ) estabeleceu um comitê sobre materiais reforçados com fibras contínuas O comitê técnico sobre FRP do CSCE foi estabelecido	CSCE publicou um relatório sobre FRPs O ACI fundou o Comitê 440 sobre FRP para reforço interno e externo do concreto O Projeto BRITE-EURAM foi iniciado	O JSCE publicou um relatório sobre o Estado da Arte de materiais reforçados com fibras contínuas

Figura 3: Continuação...

1993	1996	1997	1998
O Projeto Europeu EUROCRETE foi iniciado	TG9.3 da Federação Internacional para Concreto Estrutural ( <i>fib - International Federation for Structural Concrete</i> ) foi fundado JSCE publicou um conjunto de recomendações de projeto de estruturas de concreto armado com FRP EUROCRETE publicou um conjunto de recomendações de projeto de estruturas de concreto armado com FRP	Fundação e início das atividades do TMR (Treinamento e Mobilidade de Pesquisadores - <i>Training and Mobility of Researches</i> ) Network ConFibreCrete	CSCE publicou um conjunto de recomendações de projeto de pontes de concreto armado com FRP
1999	2000	2001	2002
A Instituição de Engenheiros Estruturais ( <i>Institution of Structural Engineers</i> ) publicou um conjunto de recomendações de projeto de estruturas de concreto armado com FRP O Código Nacional Sueco ( <i>Swedish National Code</i> ) de estruturas de concreto armado com FRP foi publicado	A Sociedade do Concreto ( <i>Concrete Society</i> ) publicou o relatório técnico TR55 para reforço externo de estruturas de concreto com FRP <i>fib</i> publicou o boletim 10 sobre colagem de reforço externo (um capítulo dedicado à aderência de barras de FRP)	<i>fib</i> publicou o boletim 14 sobre reforço externo de estruturas de concreto com FRP ISIS Canadá publicou uma série de manuais para uso interno e externo de barras de FRP pretendidas Comitê ACI 440 publicou a primeira versão da recomendação de projeto de estruturas de concreto armado com FRP (440.1R)	Comitê ACI 440 publicou a primeira versão da recomendação de projeto de estruturas de concreto com reforço externo de FRP (440.2R) CUR Construções & Infraestrutura ( <i>Building &amp; Infrastructure</i> ) publicou um conjunto de recomendações de projeto de estruturas de concreto armado com FRP (Países Baixos)
2004	2006	2007	2012
O Conselho Nacional de Pesquisa (CNR - <i>National Research Council</i> ) publicou a recomendação Italiana de projeto de estruturas de concreto com reforço externo de FRP (CNR-DT 200/2004)	O CNR publicou a recomendação Italiana de projeto de estruturas de concreto armado com FRP (CNR-DT 203/2006)	<i>fib</i> publicou o boletim 40 sobre a utilização de barras de FRP como armadura em estruturas de concreto	A Associação Canadense de Padronizações (CSA - <i>Canadian Standard Association</i> ) publicou a recomendação de projeto e construção de estruturas de concreto com armadura de FRP
2015	2017	2021	2022
Comitê ACI 440 publicou a versão vigente da recomendação de projeto de estruturas de concreto armado com FRP (440.1R) Instalação do Comitê Técnico IBRACON/ABECE CT 303 no Brasil para uso de FRP em estruturas de concreto armado	Publicação da recomendação Russa para projeto de estruturas de concreto armado com FRP	CT 303 publicou a Prática Recomendada IBRACON/ABECE para projeto de estruturas de concreto com armadura de FRP	Comitê ACI 440 publicou o ACI 440.11, o qual direciona a utilização de barras de GFRP como armadura em aplicações de concreto estrutural Elaboração das primeiras NBR (normas brasileiras), no âmbito da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), para a utilização de barras de FRP
2025	Publicação da ABNT NBR 17196 (CB 002) para o projeto de estruturas de concreto com armadura de FRP Publicação da ABNT NBR 17201 (CEE 193) para a caracterização de barras de FRP		

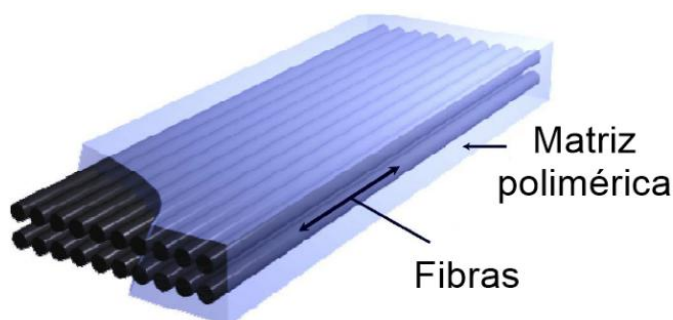
Fonte: Adaptado de FIB *Bulletin* 40 (2007)

No ano de 2022, o *American Concrete Institute* (Instituto Americano do Concreto) publicou o ACI 440.11 (2022). De acordo com Myers *et al.* (2023), esse é o primeiro código de construção abrangente que cobre o uso de barras de GFRP em aplicações de concreto estrutural, abordando sistemas estruturais, membros e conexões, incluindo concreto moldado *in loco*, pré-moldado, não protendido, e construção de concreto composto (*composite concrete construction*). No Brasil, em 2015 o Comitê Técnico IBRACON/ABECE CT 303 foi instalado e em 2021 publicou a primeira recomendação nacional sobre o uso de armaduras de FRP em estruturas de concreto armado, a Prática Recomendada CT 303 (2021). Em 2022, tiveram início as reuniões da Comissão de Estudos de Estruturas de Concreto Reforçado Com Fibras (CEE-002:124.026, do Comitê Brasileiro da Construção Civil (ABNT/CB-002) e da Comissão de Estudo Especial de Materiais Não Convencionais para Reforço de Estruturas de Concreto (ABNT/CEE 193) para a elaboração das primeiras NBRs (normas brasileiras) a respeito do uso de barras de GFRP e BFRP em estruturas de concreto. Recentemente, foram publicadas as normas ABNT NBR 17196 (2025) para o projeto de estruturas de concreto armado com barras de FRP e ABNT NBR 17201 (2025), dividida em 12 partes, para a especificação e caracterização das barras de FRP produzidas na indústria brasileira.

## 2.2 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS (FRP)

Segundo Callister Jr e Rethwisch (2012), um material compósito é um material multifásico que apresenta a melhor combinação possível das fases que o constituem, o que é denominado de princípio da ação combinada. Desta forma, um material compósito é um material multifásico feito artificialmente, com fases constituintes quimicamente diferentes e separadas por uma interface distinta. O FRP é um material compósito formado por fibras embebidas em uma matriz polimérica, sendo as fibras responsáveis por promover a resistência e a rigidez do compósito e a matriz responsável por ligar e proteger as fibras, além de promover a transferência de tensões entre as fibras (ACI 440.R, 2007). A Figura 4 apresenta um esquema da composição de um FRP.

**Figura 4: Fases constituintes do FRP**



Fonte: Adaptado de ISIS (2006) *apud* Oliveira (2019)

### 2.2.1 MATRIZ POLIMÉRICA

Uma das funções da matriz polimérica é promover a ligação entre as fibras, atuando na distribuição dos esforços. Esta ligação é de extrema importância para maximizar a transmissão de esforços de uma matriz de baixa resistência para as fibras resistentes, sendo a resistência do compósito dependente desta ligação. Outra função da matriz é proteger as fibras contra danos superficiais provenientes da abrasão mecânica ou reações químicas com o ambiente que a circunda, fatores que podem causar defeitos superficiais que podem levar a falhas do compósito (Callister Jr, Rethwisch, 2012).

Segundo Dalfré e Parsekian (2022), a matriz polimérica pode ser do tipo termorrígida (epóxi, fenol, poliéster, poliuretano e silicone) ou termoplástica (polietileno, poliestireno ou metacrilato de polimetila). As matrizes do tipo termoplásticas são mais resistentes a impactos e microfissuração, embora sejam mais viscosas e quando aquecidas podem ser repentinamente fundidas. Por outro lado, as matrizes do tipo termorrígidas (ou termoendurecíveis) apresentam endurecimento irreversível, ou seja, apresentam degradação quando submetidas a elevadas temperaturas visto que não se fundem quando aquecidas.

As matrizes poliméricas utilizadas para a fabricação de barras de FRP são do tipo termoendurecíveis, disponíveis em uma forma parcialmente polimerizada, e são líquidas ou pastosas à temperatura ambiente (Amran *et al.*, 2018). Assim, misturando-se o reagente adequado, estas matrizes polimerizam e se tornam um material sólido vítreo, formando uma estrutura tridimensional rígida que, uma vez endurecida, não pode ser remodelada pela aplicação de calor ou pressão (Hollaway, 2010). As resinas mais utilizadas como matriz polimérica são as resinas do tipo epóxi, poliéster e éster vinílico (Sawpan, Mamun, Holdsworth, 2014). As resinas do tipo poliéster e éster vinílico são mais baratas do que as resinas do tipo epóxi, entretanto, as resinas do tipo epóxi apresentam melhores propriedades mecânicas e maior resistência à umidade, bem como maior durabilidade (Callister Jr, Rethwisch, 2012; Dalfré, Parsekian, 2022). As resinas do tipo vinil éster são amplamente utilizadas em componentes estruturais para aplicação nos setores marítimo, em alto-mar e de infraestrutura civil (Thomason, Xypolias, 2023). Embora a resina éster vinílico possua propriedades mecânicas inferiores em comparação a uma resina epóxi de alto desempenho, seu ciclo de fabricação em tempo reduzido, facilidade de processabilidade, baixo custo e níveis adequados de desempenho mecânico frequentemente a tornam uma alternativa atraente (Zhong, Zhou, 1999; Karbhari, Zhang, 2003; Benmokrane *et al.*, 2017a). A ABNT NBR 17201-1 (2025) não recomenda a utilização de matriz polimérica composta por poliéster, apenas epóxi e vinil éster.

A Tabela 1 apresenta algumas propriedades físicas e mecânicas dos tipos de resina mais utilizadas.

**Tabela 1: Propriedades das resinas termoendurecíveis**

Propriedade	Resina		
	Poliéster	Éster vinílica	Epóxi
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,1 – 1,4	1,1 – 1,3	1,2 – 1,3
Temperatura de transição vítrea (°C)	100,0	110,0	120,0
Resistência à tração (MPa)	34,5 – 103,5	73,0 – 81,0	55,0 – 130,0
Módulo de Elasticidade (MPa)	2,1 – 3,4	3,0 – 3,3	2,8 – 4,1
Alongamento (%)	2,5	6,0	8,0

Fonte: Adaptado de Benmokrane *et al.* (2017a) e ISIS (2007)

Segundo Wu *et al.* (2023), é de grande importância a seleção apropriada do tipo de matriz a ser utilizada na produção do FRP, considerando-se o ambiente e a aplicação do material. A estrutura da matriz é mais propensa à danos causados por agentes agressivos presentes no ambiente circundante, logo, é considerada a parte mais vulnerável do FRP (Wang *et al.*, 2017a).

Tendo em vista que o poliéster contém mais grupos éster em sua composição, quando comparado ao vinil éster ou ao epóxi, este geralmente sofre mais degradação sob mesmas condições ambientais e, conseqüentemente, a taxa de degradação das propriedades mecânicas do FRP produzido com este tipo de matriz polimérica é maior (Benmokrane *et al.*, 2017b). De acordo com Chen *et al.* (2007), a durabilidade da matriz do tipo vinil éster em ambientes alcalinos ou ácidos fica entre a resina epóxi e o poliéster, sendo este o tipo de matriz mais utilizada para a produção das barras de GFRP uma vez que apresenta boa resistência e economia no caso de ambientes com ataques químicos (Tannous, Saadatmanesh, 1999; Karbhari *et al.*, 2003). Benmokrane *et al.* (2017b, 2017c) estudaram a degradação das propriedades mecânicas de barras de GFRP com matriz do tipo vinil éster expostas à solução alcalina por longo período, observando que estas barras podem reter quase na totalidade sua resistência à tração e rigidez originais.

A matriz polimérica do tipo epóxi não contém grupos éster, logo, dificilmente apresenta reação a ambientes agressivos a longo prazo. Dessa forma, esse é o melhor material para a matriz polimérica, com a melhor resistência à corrosão e aderência, contudo, seu custo é elevado (Nkurunziza *et al.*, 2005; Sheng-Ping, Jiang, 2012).

### 2.2.2 FIBRAS

Para sua utilização em materiais compósitos, é necessário que as fibras apresentem elevado módulo de elasticidade e resistência à tração, alongamento conveniente na ruptura por tração, estabilidade das propriedades durante sua fabricação e manuseio, diâmetro e superfície uniformes, alta tenacidade, durabilidade, disponibilidade em formas adequadas e custo aceitável. Tais características são importantes para garantir a eficiência das fibras quando empregadas como reforço (FIB *Bulletin* 40, 2007).

As fibras mais utilizadas para a produção do FRP são as de carbono, vidro, aramida e basalto (FIB *Bulletin* 90, 2019; Wu *et al.*, 2023), cujos valores de propriedades mecânicas são apresentados na Tabela 2 e curvas tensão-deformação são apresentadas na Figura 5.

Segundo Gay *et al.* (2003) e Gibson (1994) as fibras de carbono e aramida são anisotrópicas, com diferentes valores para suas propriedades mecânicas e térmicas nas direções principais, enquanto as fibras de vidro e basalto são isotrópicas.

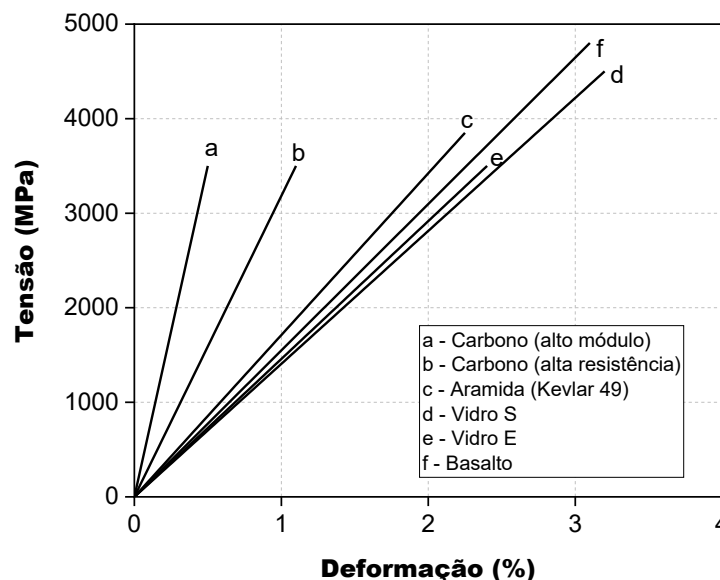
As fibras de vidro encontram-se bastante difundidas na engenharia civil, tendo em vista a excelente relação qualidade/preço (Moura, 2021), e são o alvo de estudo deste trabalho.

**Tabela 2: Propriedades mecânicas das fibras de carbono, vidro, aramida e basalto**

Material		Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação última (%)
Carbono	Alta resistência	215 – 235	3500 – 4800	1,4 – 2,0
	Ultra alta resistência	215 – 235	4800 – 6000	2,0 – 2,3
	Alto módulo	350 – 500	2500 – 3100	0,5 – 0,9
	Ultra alto módulo	500 – 700	2100 – 2400	0,2 – 0,4
Vidro	E	70	1900 – 3000	3,0 – 4,5
	S	85 – 90	3500 – 4800	4,5 – 5,5
Aramida	Baixo módulo	70 – 80	3500 - 4100	4,3 – 5,0
	Alto módulo	115 – 130	3500 – 4000	2,5 – 3,5
Basalto		80 – 90	2500 – 3200	3,0 – 3,5

Fonte: Adaptado de FIB *Bulletin* 90 (2019)

**Figura 5: Curvas tensão-deformação de diferentes fibras**



Fonte: Adaptado de FIB *Bulletin* 40 (2007)

### 2.2.2.1 Fibras de vidro

Segundo Callister Jr e Rethwisch (2012), o vidro é um material bastante utilizado uma vez que é estirado com facilidade em fibras de alta resistência a partir de seu estado fundido.

É um material bastante disponível e, quando embebido na forma de fibras em uma matriz polimérica, produz um compósito com alta resistência e útil em ambientes corrosivos devido à sua inércia química.

A utilização das fibras de vidro em compósitos é vantajosa para a indústria da construção civil devido à sua excelente relação qualidade/preço e elevada resistência à tração. Estas fibras ainda apresentam excelente isolamento térmico e expansão térmica similar à do aço (Martynova, Cebula, 2018). De acordo com Figueira (2016) e Silva (2002), as fibras de vidro combinam custo relativamente baixo, alta resistência mecânica e bom desempenho quando submetidas a esforços dinâmicos, entretanto, apresentam baixo módulo de elasticidade e baixa resistência à umidade e ambientes alcalinos, além de serem suscetíveis à ruptura por fluência.

Segundo Martynova e Cebula (2018), as fibras de vidro podem ser identificadas de acordo com suas propriedades e podem ser confeccionadas a partir de misturas baseadas em sílica e adições de óxidos de cálcio, boro, sódio, ferro e alumínio (Carneiro, Teixeira, 2008). A Tabela 3 apresenta alguns dos tipos de fibras de vidro disponíveis comercialmente. A designação A se refere ao alto teor de metais alcalinos, vidro de cal e sódio, E se refere às fibras de vidro com baixa condutividade elétrica, C à alta resistência química, R e S àquelas com alta resistência, AR à alta resistência aos álcalis e ECR à alta resistência em ambientes ácidos.

**Tabela 3: Tipos de fibras de vidro comercialmente disponíveis**

Tipo de vidro	Ano de Invenção	Principal atributo e indicações gerais	Resistência mecânica	Preço	Inventor
A	1938	Isolante; alto conteúdo de álcali	Baixa	\$	Owens Corning
E	1939	Boas propriedades elétricas; para fins gerais	Moderada	\$	Owens Corning
C	1943	Resistente à corrosão; resistência química	Baixa	\$	Owens Corning
R	1965	Alta resistência mecânica	Alta	\$\$	Saint-Gobain
S	1965	Alta resistência mecânica	Muito alta	\$\$\$	Owens Corning
AR	1974	Álcali-resistente	Baixa	\$\$	Owens Corning
ECR	1980	Resistente à corrosão; para uso em ambientes ácidos	Moderada	\$	Owens Corning

Fonte: Adaptado de Owens Corning (2011)

As fibras de vidro do tipo E contêm grandes quantidades de ácido bórico e aluminatos e apresentam baixa resistência à alcalinidade. As fibras de vidro do tipo S são mais resistentes e rígidas do que as fibras do tipo E, mas ainda apresentam baixa resistência à alcalinidade. Para melhorar a resistência à alcalinidade das fibras de vidro, uma quantidade considerável de zircônio é adicionada, originando as fibras do tipo AR, as quais apresentam propriedades mecânicas similares às fibras do tipo E (FIB *Bulletin* 90, 2019). Segundo Tannous e Saadatmanesh (1999), as fibras de vidro do tipo AR apresentam excelente durabilidade,

sendo adequadas para o uso em concretos com alcalinidade elevada ou ambientes com alta alcalinidade. Na Tabela 4 e Tabela 5 constam as propriedades e as composições químicas, respectivamente, dos principais tipos de fibras de vidro utilizadas na produção das barras de FRP. As fibras de vidro são compostas por uma variedade de óxidos, sendo o óxido de silício o componente predominante em sua composição. De acordo com Moura (2021), o silício desempenha um papel essencial na resistência mecânica das fibras, contudo, contribui para sua maior fragilidade e pode reagir com grupos OH<sup>-</sup> presentes na matriz cimentícia.

**Tabela 4: Propriedades dos principais tipos de fibras de vidro empregadas na produção do FRP**

Propriedade	Tipos de fibra de vidro		
	E	ECR	AR
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	2540,0	2660,0	2600,0
Resistência à tração (MPa)	3100,0	3100,0	3100,0
Módulo de elasticidade (GPa)	76,0	80,0	72,0
Deformação na ruptura (%)	4,5	4,5	2,0
Coefficiente de expansão térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	4,9	5,9	7,5

Fonte: Adaptado de Martynova e Cebula (2018)

**Tabela 5: Composição química dos principais tipos de fibras de vidro empregadas na produção do FRP**

Óxido	Tipos de fibra de vidro		
	E	ECR	AR
SiO <sub>2</sub>	52,0	58,2	58,3
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,0	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,0	11,6	0,2
CaO	21,0	21,7	-
MgO	0,4	2,0	-
ZnO	-	2,9	-
TiO <sub>2</sub>	-	2,5	-
ZrO <sub>2</sub>	0,2	0,0	18,1
Na <sub>2</sub> O	0,0	1,0	13,0
K <sub>2</sub> O	0,0	0,2	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2	0,1	-
F	0,2	-	-

Fonte: Adaptado de Martynova e Cebula (2018)

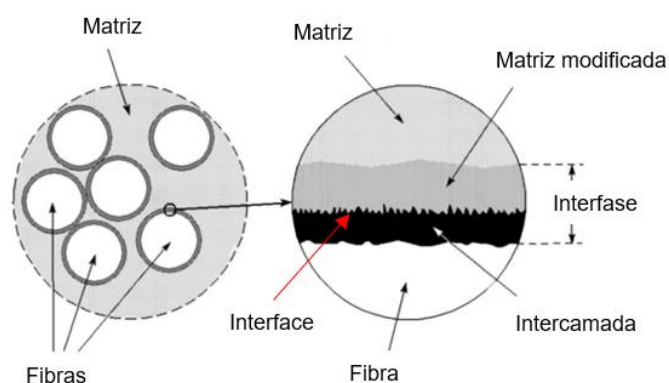
As características superficiais das fibras de vidro são de extrema importância, tendo em vista que o atrito ou a abrasão da superfície pode causar pequenos defeitos superficiais que podem impactar de forma negativa suas propriedades de tração. Ainda, a exposição da superfície das fibras de vidro à atmosfera, ainda que por curtos períodos, causa a formação de uma camada superficial enfraquecida que interfere na ligação entre as fibras e a matriz. Por este motivo, ao serem estiradas, as fibras de vidro são geralmente revestidas com uma fina camada de uma substância protetora contra danos e interações com o ambiente, a qual é removida antes da fabricação do compósito e substituída por um agente de acoplamento ou de acabamento responsável por produzir uma ligação química entre as fibras e a matriz (Callister Jr, Rethwisch, 2012).

### 2.2.3 INTERFACE MATRIZ-FIBRAS

Segundo Faza e Gangarao (1993), a região de transição entre as fibras de vidro e a matriz polimérica, denominada interface, é anisotrópica e apresenta uma variação gradual de propriedades, sendo responsável pela transferência de esforços mecânicos da matriz para as fibras. A estabilidade dessa interface ao longo da vida útil do GFRP é crucial, pois uma adesão deficiente entre as fases pode desencadear falhas, comprometendo o desempenho estrutural do material. A capacidade de transferência de tensões na região da interface matriz-fibras desempenha um papel crucial na otimização e durabilidade a longo prazo do GFRP (Thomason, 1995; Sethi, Ray, 2015; Idrisi, Mourad, Sherif, 2021). Segundo Thomason e Xypolias (2023), a condição da interface pode definir a confiabilidade e, portanto, a durabilidade de materiais compósitos durante sua vida útil.

A interface entre as fibras de vidro e a matriz polimérica é caracterizada como uma região tridimensional não homogênea de contato, com uma espessura de aproximadamente 100 a 300 nm, que envolve a área de contato (interface) e uma faixa que se estende tanto para as fibras quanto para a matriz (interfase), conforme pode ser visto na Figura 6 (Ray, Rathore, 2014; Yu *et al.*, 2021).

**Figura 6: Representação da região de transição entre fibras e matriz**



Fonte: Adaptado de Ray e Rathore (2014)

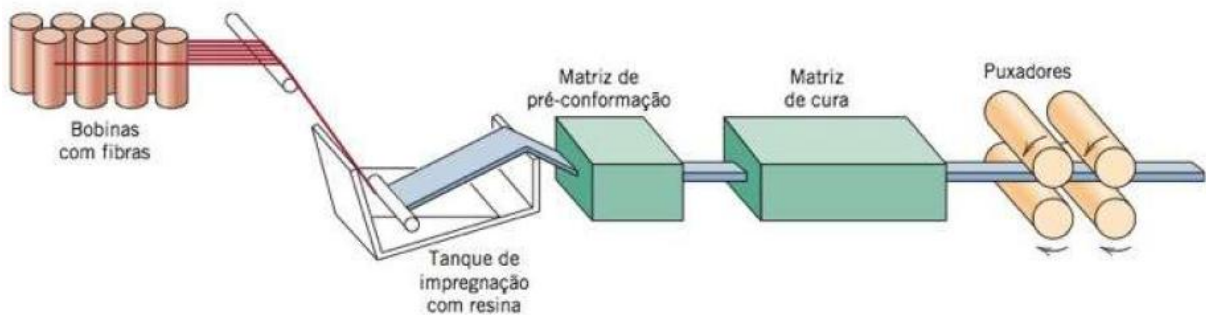
De acordo com Moura (2021), a capacidade de espalhamento de uma resina sobre a superfície das fibras é denominada molhabilidade. Logo, o contato adequado entre as fibras e a matriz requer que a matriz apresente as condições necessárias para molhar as fibras de vidro no momento da produção do FRP. Um contato adequado entre as fibras e a matriz produz forças intermoleculares, com formação de ligações químicas entre os componentes. A contração da matriz polimérica durante sua cura, no caso dos termofixos, ou sua solidificação é um dos fatores que favorece a interação interfacial, proporcionando a aproximação entre as superfícies e aumentando a interação intermolecular ou interatômica.

No caso de não existirem ligações intermoleculares fortes ou ligações químicas interatômicas, a aderência entre os componentes depende exclusivamente do o ancoramento físico (Moura, 2021).

#### 2.2.4 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO FRP

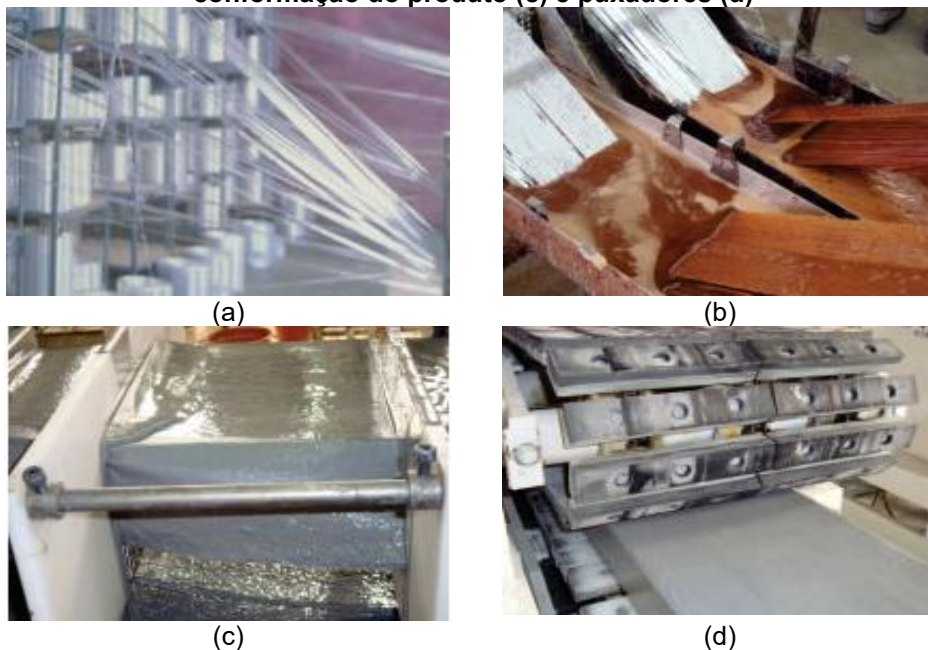
Segundo Callister Jr e Rethwisch (2012), para a fabricação de polímeros reforçados com fibras contínuas, as fibras devem estar uniformemente distribuídas na matriz polimérica e orientadas virtualmente na mesma direção, sendo normalmente utilizado um processo contínuo e facilmente automatizado, denominado Pultrusão. Este processo, apresentado na Figura 7 e Figura 8, apresenta alta taxa de produção e é economicamente eficiente, sendo utilizado para a produção de componentes com comprimentos contínuos e formas constantes tais como barras, tubos e vigas.

**Figura 7: Processo de fabricação das barras de FRP (Pultrusão)**



Fonte: Callister Jr e Rethwisch (2012)

**Figura 8: Processo de Pultrusão: Fibras de vidro (a); impregnação das fibras (b); pré-conformação do produto (c) e puxadores (d)**



Fonte: Stratus (2020)

Por meio do processo de Pultrusão são produzidas barras com seção transversal constante e comprimento limitado apenas pelo tipo de transporte e o tamanho do galpão da fábrica (Mazzú, 2020). Durante o processo de produção, feixes soltos e não torcidos de fibras contínuas, estirados conjuntamente na forma de fios paralelos, são impregnados na matriz polimérica e, então, puxados através de um molde de aço responsável pela pré-conformação da forma desejada, estabelecendo a razão resina/fibra desejada. Posteriormente, as fibras pré-conformadas passam por um molde de cura responsável por consolidar a forma final da peça, o qual é aquecido para iniciar a cura da matriz polimérica. Na sequência, o material curado é tracionado por puxadores, os quais determinam a velocidade da produção (Callister Jr, Rethwisch, 2012).

As barras de FRP não são tão padronizadas na indústria quando comparadas ao aço, assim, suas propriedades variam de fabricante a fabricante (Feeser, Brown, 2005). De acordo com o FIB *Bulletin* 40 (2007), o FRP é um material que apresenta propriedades bastante diversas que podem ser alteradas por meio de qualquer modificação na fase de produção. A existência de diferentes tipos de fibra que podem ser combinadas com diferentes tipos de matriz polimérica em diversas frações volumétricas para obter barras com geometrias e tratamentos superficiais variados, resulta no fato de que as designações AFRP, GFRP, CFRP e BFRP não estão relacionadas a um produto único, mas a uma gama de produtos com propriedades diversas. Segundo Emparanza *et al.* (2018), o mercado das barras de FRP é diverso, uma vez que diferentes fabricantes produzem barras com diferentes combinações de matérias-primas (fibras e resinas), seções transversais (redonda, oval, quadrática, entre outras) e acabamentos superficiais (revestimento com areia, enrolamento helicoidal, mossas, entre outras). Diferentemente das barras de aço convencionais, cujas principais propriedades físicas e mecânicas seguem limites normativos bem estabelecidos, as barras de FRP apresentam uma variabilidade de desempenho. Essa variabilidade representa um desafio adicional à elaboração de recomendações de projeto padronizadas, mas também constitui um campo específico de estudo, com diretrizes voltadas à consideração estatística das propriedades mecânicas e à definição de fatores de segurança apropriados. Dessa forma, torna-se essencial que, no momento do projeto de estruturas com esse tipo de armadura, sejam especificadas cuidadosamente as propriedades mínimas exigidas, garantindo que barras com desempenho compatível sejam utilizadas na execução.

### **2.2.5 CARACTERÍSTICAS DO FRP**

Segundo o FIB *Bulletin* 40 (2007), a aplicação de barras de FRP como armadura em estruturas de concreto é influenciada, principalmente, por suas propriedades físicas e mecânicas. As barras de FRP podem ser projetadas e produzidas para atingir requisitos específicos de uma aplicação particular, alterando-se os tipos de fibra e matriz, bem como

suas frações volumétricas, a orientação das fibras e o processo produtivo. Fatores como efeitos dimensionais e o controle de qualidade durante a produção também são importantes para a determinação das características das barras de FRP.

De acordo com o ACI 440.1R (2015), a escolha das fibras e resina, a orientação das fibras, as dimensões, o controle de qualidade da produção, a temperatura, umidade e o tipo e duração do carregamento são aspectos que influenciam as propriedades do FRP.

Tendo em vista que as fibras utilizadas são contínuas e alinhadas, o FRP é um material anisotrópico, ou seja, suas propriedades dependem da direção na qual são medidas (Callister Jr, Rethwisch, 2012).

### 2.2.5.1 Propriedades mecânicas e comportamento

Assumindo-se que a ligação interfacial entre a fibra e a matriz é eficiente ao ponto de suas deformações serem iguais (isodeformação), a força suportada pelo FRP pode ser dada pela soma das forças suportadas pelas fibras (contínuas e orientadas) e da matriz (Callister Jr, Rethwisch, 2012). Assim, conhecidas as taxas volumétricas e as propriedades mecânicas das fibras e da matriz, as propriedades mecânicas do FRP ( $f_{FRP}$  - resistência à tração e  $E_{FRP}$  - módulo de elasticidade) podem ser estimadas utilizando-se a regra das misturas, conforme as Equações 1 e 2. Nas Equações 1 e 2,  $f_{fib}$  e  $f_{mat}$  são as resistências à tração da fibra e da matriz, respectivamente,  $E_{fib}$  e  $E_{mat}$  são os módulos de elasticidade da fibra e da matriz, respectivamente, e  $V_{fib}$  e  $V_{mat}$  são as taxas volumétricas da fibra e da matriz, respectivamente. Conforme o FIB *Bulletin* 35 (2006), a soma das taxas volumétricas da fibra e da matriz deve ser igual a 1. Ressalta-se que as propriedades obtidas com o uso das Equações 1 e 2 referem-se à direção longitudinal do FRP.

$$f_{FRP} \cong f_{fib} \cdot V_{fib} + f_{mat} \cdot V_{mat} \quad (1)$$

$$E_{FRP} \cong E_{fib} \cdot V_{fib} + E_{mat} \cdot V_{mat} \quad (2)$$

Segundo Callister Jr e Rethwisch (2012), a resposta mecânica do FRP depende dos comportamentos tensão-deformação das fases fibra e matriz, das frações volumétricas das fases e da direção de aplicação de carregamento. Geralmente a proporção volumétrica de fibras varia entre 50 % e 70 % do volume total em laminados de FRP e entre 25 % e 35 % do volume total em compósitos de FRP moldados *in situ*, como no caso de sistemas de reforço de FRP externamente aderidos à estrutura de concreto (ISIS, 2006).

Apesar do uso da regra das misturas permitir a estimativa das propriedades mecânicas do FRP, é recomendada a realização de ensaios experimentais para a determinação das propriedades reais do material, uma vez que fatores como o diâmetro, distribuição e

paralelismo das fibras, defeitos locais e a interface fibra-matriz podem influenciar o comportamento do FRP (Dalfré, Parsekian, 2022).

O ACI 440.6M (2017) apresenta valores de resistência à tração de barras de GFRP e CFRP que devem ser garantidos para a certificação do produto por parte do fabricante, tal como apresentado na Tabela 6. Na Tabela 6, os valores mínimos da resistência à tração de barras de CFRP com designação a partir de 22 não estão disponíveis, pois, segundo o ACI 440.6M (2017) tais barras não são comercialmente disponíveis. É possível notar que os valores de resistência à tração diminuem com o aumento do diâmetro, uma vez que as tensões se desenvolvem ao longo do diâmetro das barras.

**Tabela 6: Valores mínimos de resistência à tração de barras de FRP**

Designação	Valores mínimos de resistência à tração (MPa)	
	GFRP	CFRP
6	760	1450
10	760	1310
13	690	1170
16	655	1100
19	620	1100
22	586	-
25	550	-
29	517	-
32	480	-

Fonte: ACI 440.6M (2017)

Quando submetidas à tração, as barras de FRP não apresentam comportamento plástico (escoamento) antes da ruptura, sendo caracterizadas por comportamento tensão-deformação elástico linear até a ruptura. A Tabela 7 apresenta algumas propriedades típicas de barras de FRP e do aço convencional.

**Tabela 7: Valores típicos de propriedades mecânicas de barras de FRP (para frações volumétricas de fibra entre 0,5 e 0,7) em comparação ao aço convencional**

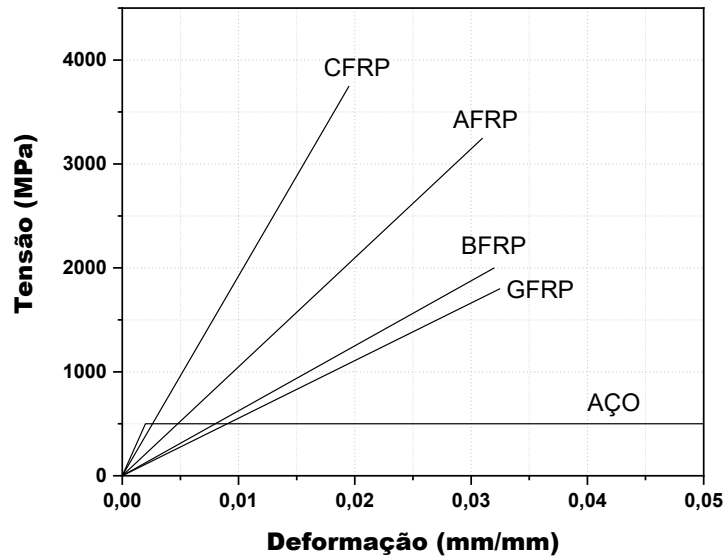
Propriedades	Tipo de barra			
	Aço	GFRP	CFRP	AFRP
Tensão de escoamento nominal (MPa)	276 a 517	-	-	-
Resistência à tração (MPa)	483 a 1600	483 a 690	600 a 3690	1720 a 2540
Módulo de elasticidade (GPa)	200	35 a 51	120 a 580	41 a 125
Deformação de escoamento (%)	0,14 a 0,25	-	-	-
Deformação de ruptura (%)	6 a 12	1,2 a 3,1	0,5 a 1,7	1,9 a 4,4

Fonte: ACI 440.1R (2015)

As barras de FRP atingem a resistência última sem patamar de escoamento, possuem comportamento linear até a ruptura e são anisotrópicas, apresentando alta resistência à tração apenas na direção das fibras (ACI 440.1R, 2015). Assim, com relação ao seu comportamento tensão – deformação, as barras de FRP não apresentam ductilidade, uma vez que rompem de maneira frágil após atingirem sua resistência máxima (Nanni, 1993; Alsayed, Al-Salloum, Almussallam, 2000; Nanni, De Luca, Zadeh, 2014).

Dalfré e Parsekian (2022) afirmam que as fibras (que possuem comportamento elástico linear até a ruptura) são as principais responsáveis pela resistência do FRP, uma vez que possuem módulo de elasticidade e resistência muito superiores aos da matriz polimérica. A Figura 9 apresenta diagramas de tensão *versus* deformação do aço convencional em comparação ao CFRP, AFRP, BFRP e GFRP.

**Figura 9: Diagramas tensão x deformação do aço convencional e do CFRP, AFRP, BFRP e GFRP**



Fonte: Adaptado de *FIB Bulletin* 90 (2019)

De acordo com a Prática Recomendada CT 303 (2021), com relação à compressão, o comportamento das barras de FRP também pode ser considerado elástico linear, com módulo de elasticidade igual ao de tração. Uma vez que a matriz polimérica é a responsável pela prevenção da flambagem das barras comprimidas, as propriedades à compressão são mais dependentes das propriedades da matriz. Esta recomendação técnica aponta como referência uma resistência característica à compressão de 300 MPa, independentemente da classificação da barra considerada. Contudo, a ABNT NBR 17196 (2025) preconiza que a resposta à compressão longitudinal das barras de FRP seja desprezada.

### 2.2.5.2 Propriedades físicas

A densidade do FRP ( $\rho_{FRP}$ ) é um parâmetro que também pode ser estimado por meio da regra das misturas, tal como apresentado na Equação 3, desde que conhecidas as densidades da fibra ( $\rho_{fib}$ ) e da matriz ( $\rho_{mat}$ ).

$$\rho_{FRP} \cong \rho_{fib} \cdot V_{fib} + \rho_{mat} \cdot V_{mat} \quad (3)$$

A Tabela 8 apresenta a densidade típica de algumas barras de FRP, em comparação à densidade do aço. Segundo Dalfré e Parsekian (2022), as barras de FRP apresentam densidade entre um sexto a um quarto da densidade do aço convencional, e, desta forma, o menor peso deste tipo de material impacta em menores custos de transporte e maior facilidade de manuseio em obra. A ABNT NBR 17196 (2025) apresenta densidades iguais a 2,2 g/cm<sup>3</sup> e 2,4 g/cm<sup>3</sup> para barras de GFRP e BFRP, respectivamente.

**Tabela 8: Densidade típica de barras de FRP**  
**Densidade típica de barras de FRP (g/cm<sup>3</sup>)**

Aço	GFRP	CFRP	AFRP
7,90	1,25 a 2,10	1,50 a 1,60	1,25 a 1,40

Fonte: ACI 440.1R (2015)

Com relação ao coeficiente de dilatação térmica das barras de FRP, este é dependente dos tipos de fibra e matriz utilizados, bem como de sua fração volumétrica (FIB *Bulletin* 40, 2007). Segundo o ACI 440.1R (2015), estes coeficientes variam em função das direções transversal e longitudinal, tendo em vista a anisotropia das barras, sendo o coeficiente de dilatação térmica longitudinal dependente das propriedades das fibras e o coeficiente de dilatação térmica transversal dependente das propriedades da matriz. A Tabela 9 apresenta os valores dos coeficientes de dilatação térmica de alguns tipos de barra, sendo os valores negativos indicativos de contração com o aumento da temperatura e expansão com a diminuição da temperatura. A ABNT NBR 17196 (2025) apresenta coeficientes de dilatação térmica longitudinal e transversal iguais a  $8,0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  e  $22,0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, para barras de GFRP e BFRP.

**Tabela 9: Coeficiente de dilatação térmica de barras de FRP (para frações volumétricas de fibra entre 0,5 e 0,7)**

Direção	Coeficientes de dilatação térmica ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )		
	GFRP	CFRP	AFRP
Longitudinal	6,0 a 10,0	-9,0 a 0,0	-6,0 a -2,0
Transversal	21,0 a 23,0	74,0 a 104,0	60,0 a 80,0

Fonte: ACI 440.1R (2015)

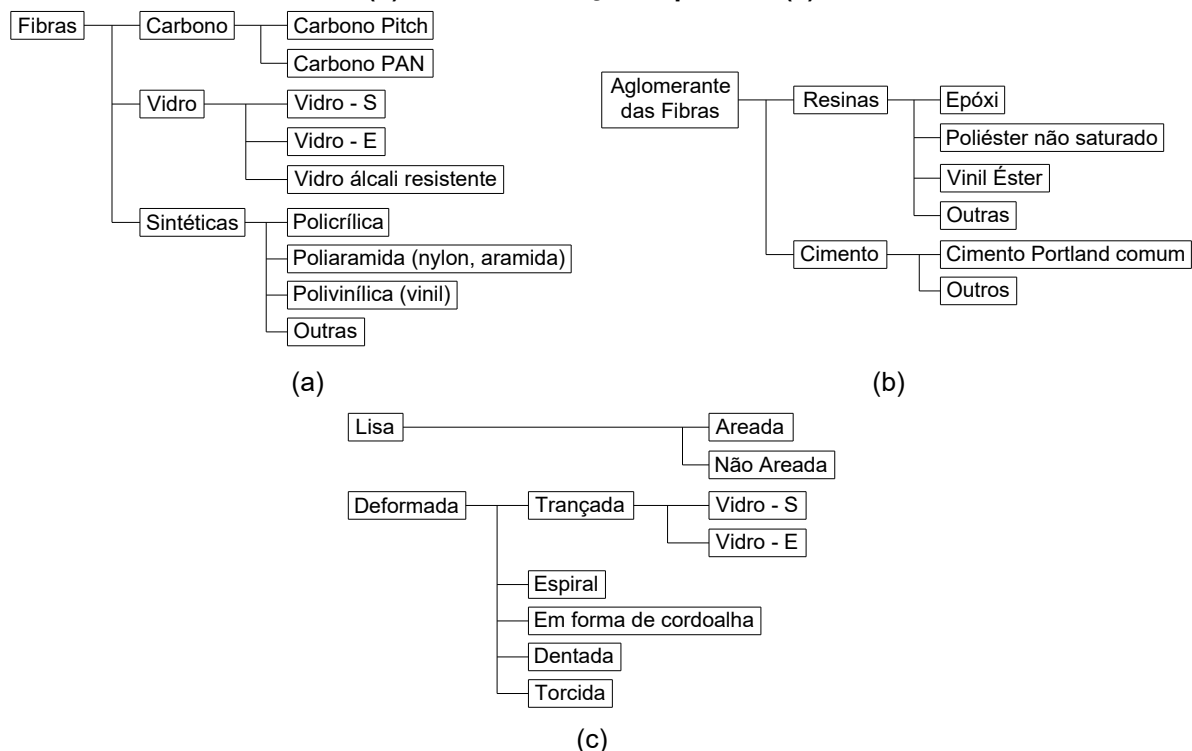
### 2.2.5.3 Aderência ao concreto

Tendo em vista a baixa aderência entre o concreto e o FRP, as barras devem possuir conformação ou revestimento superficial capaz de promover a aderência, podendo apresentar entalhes superficiais, fios enrolados helicoidalmente ou impregnação externa de epóxi e areia (Prática Recomendada CT 303, 2021). De acordo com a ABNT NBR 17196 (2025), a resistência de aderência entre a barra de FRP e o concreto é determinada a partir do produto entre quatros coeficientes, relacionados ao tipo de conformação superficial ( $\eta_1$ ), às condições de aderência ( $\eta_2$ ), ao diâmetro da barra ( $\eta_3$ ) e ao tipo de fibra utilizada ( $\eta_4$ ), além da resistência

à tração do concreto. O coeficiente  $\eta_1$  assume valor igual a 1,5 para barras com revestimento de areia, 1,3 para barras com fios enrolados em espiral ou nervuras superficiais, e 0,7 para barras com reentrâncias ao longo do comprimento. O coeficiente  $\eta_2$  é igual a 1,0 para barras em condição de boa aderência, e 0,7 para barras em condição de má aderência (barras horizontais ou inclinadas em até  $45^\circ$  em relação à horizontal que, durante a concretagem, estiveram sobre camada de mais de 30 cm de concreto fresco). O coeficiente  $\eta_3$  vale 1,0 para barras com diâmetro inferior a 20 mm, e 0,8 para barras com diâmetro superior a 20 mm. Por fim, o coeficiente  $\eta_4$  assume valor igual a 1,0 para barras de GFRP ou BFRP.

Tavares (2006) classifica as barras de FRP em função do tipo de fibra e resina utilizada e em função da conformação superficial, como apresentado na Figura 10.

**Figura 10: Classificação das barras de FRP de acordo com os tipos de fibra (a), de aglomerante (b) e de conformação superficial (c)**

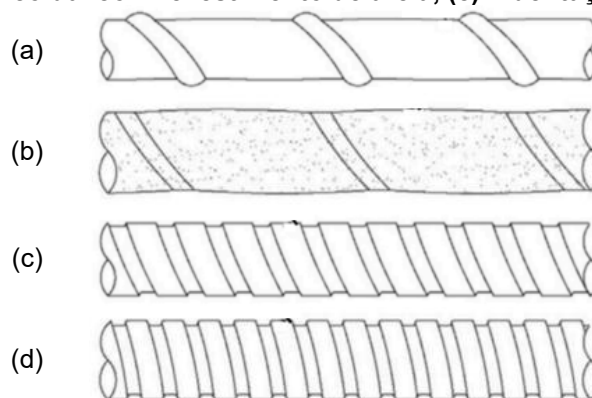


Fonte: Adaptado de Tavares (2006)

Segundo Baena *et al.* (2009) e D'Antino, Pisani e Poggi (2018), a configuração geométrica das barras e o acabamento superficial são fatores que impactam diretamente na aderência entre as barras de FRP e o concreto circundante. A qualidade da aderência entre as barras de FRP e o concreto é garantida pelo acabamento superficial da barra, sendo que o mecanismo de ligação é governado pela interação mecânica, adesão química e forças de atrito entre os materiais (Empananza *et al.*, 2018) e depende, além do acabamento superficial, do diâmetro nominal das barras, do cobrimento de concreto, do comprimento de aderência e

da resistência do concreto (Kotynia, Szczech, Kaszubska, 2017). A Figura 11 apresenta alguns tipos de conformação superficial, caracterizados por enrolamento helicoidal com fibras, com ou sem revestimento adicional de areia, ou por deformações como nervuras ou indentações, sem o envolvimento helicoidal com fibras, com ou sem revestimento de areia. Os tipos mais comuns de conformação superficial são o enrolamento helicoidal com fibras e o revestimento de areia (Mohamed, Al Hawat, Keshawarz, 2021).

**Figura 11: Conformação superficial de barras de FRP: (a) enrolamento helicoidal, (b) enrolamento helicoidal com revestimento de areia, (c) indentações e (d) nervuras**



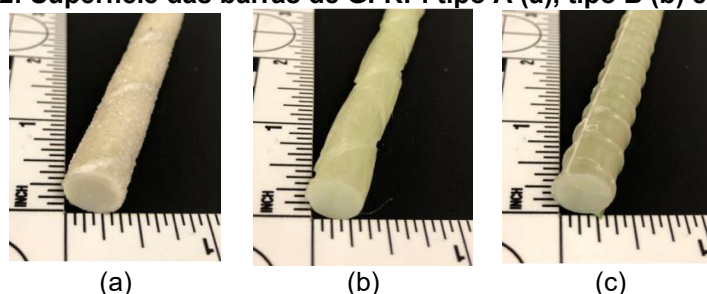
Fonte: Adaptado de Mohamed, Al Hawat e Keshawarz (2021)

Segundo Pan *et al.* (2023), o desempenho de estruturas de concreto armadas com barras de GFRP depende da aderência entre as barras e o concreto, sendo este comportamento de aderência diferente do observado em estruturas de concreto com armadura de aço. A ruptura do concreto próximo às barras de aço causa a ruptura da interface aço-concreto (Hu *et al.*, 2020). Em contrapartida, a ruptura por cisalhamento da superfície externa das barras de GFRP leva à ruptura da interface entre o GFRP e o concreto com resistência à compressão superior à 30 MPa (Altalmas, El Refai, Abed, 2015). Por outro lado, El-Nemr *et al.* (2018) afirmam que a conformação superficial da barra não tem efeito sobre a resistência à flexão e no comportamento de deflexão de elementos de concreto armados com barras de GFRP.

Empananza *et al.* (2018) estudaram o comportamento de aderência de barras de GFRP por meio de ensaios de arrancamento (*pull-out*) realizados em barras de GFRP com diâmetro de 10 mm e três diferentes tipos de revestimento, sendo o tipo A com superfície revestida com areia, o tipo B com enrolamento helicoidal e o tipo C com moedas análogas às utilizadas no aço convencional, conforme apresentado na Figura 12. O concreto utilizado apresentou resistência à compressão de 37,20 MPa e as barras de GFRP dos tipos A, B e C apresentaram resistência à compressão e módulo de elasticidade de 826,00 MPa, 550,20 MPa e 804,62 MPa e 45,37 GPa, 50,68 GPa e 51,37 GPa, respectivamente. A Figura 13 apresenta as curvas de tensão de aderência em função do deslizamento obtidas por Empananza *et al.*

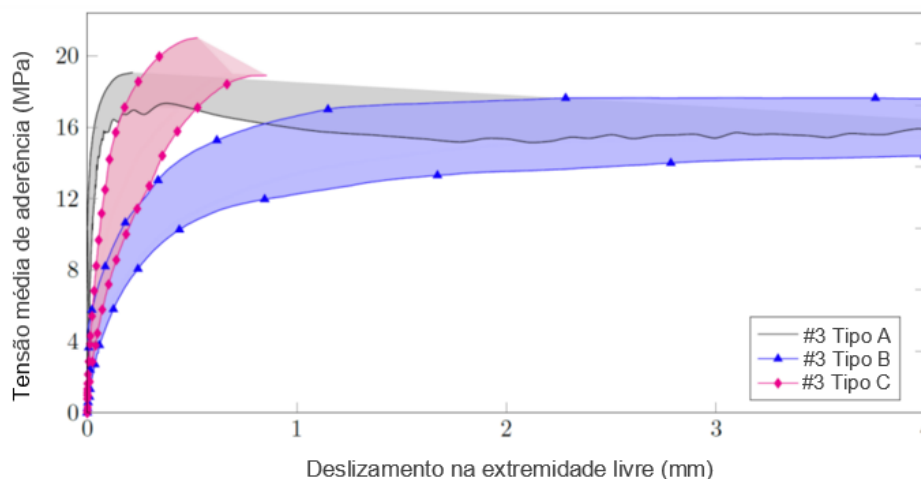
(2018). No caso das barras do tipo C, o comportamento tensão-deslizamento se aproxima ao do aço convencional, uma vez que as mostras garantem a eficácia da aderência entre a barra e o concreto, e, desta forma, após o trecho elástico linear inicial, a barra de GFRP apresenta um pico de tensão seguido de ruptura frágil. Por outro lado, no caso das barras do tipo A e B, após o trecho elástico linear inicial observa-se um patamar pseudo-plástico que representa o deslizamento da barra no interior do concreto ao invés do comportamento plástico do material. Assim, de forma geral, no caso de aderência perfeita entre a barra de GFRP e a matriz de concreto, uma lei constitutiva elástica e perfeitamente frágil é descrita. Por outro lado, quando o nível de aderência entre a barra e o concreto é baixo, observa-se um comportamento dúctil devido ao arrancamento da barra do interior da matriz de concreto (Accornero *et al.*, 2023).

**Figura 12: Superfície das barras de GFRP: tipo A (a), tipo B (b) e tipo C (c)**



Fonte: Empanza *et al.* (2018)

**Figura 13: Comportamento de deslizamento de ligação (extremidade livre) de amostras não envelhecidas**



Fonte: Adaptado de Empanza *et al.* (2018)

## 2.2.6 REQUISITOS EXIGIDOS PARA BARRAS DE FRP

Foi lançada no Brasil, recentemente, a ABNT NBR 17201 (2025), a qual é dividida em 12 partes e apresenta requisitos para a especificação e a classificação de barras de FRP, englobando barras de GFRP e BFRP, destinadas à utilização como armadura em estruturas de concreto. Segundo a ABNT NBR 17201-1 (2025), as barras devem ser produzidas com resinas termorrígidas e apresentar teor de fibras de, no mínimo, 75 %. Para a definição do

diâmetro nominal, as barras devem ter seu diâmetro efetivo e área efetiva determinados de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 17201-2 (2025) e devem apresentar as dimensões que constam na Tabela 10. Ressalta-se que diâmetro nominal é o valor utilizado para a classificação da seção transversal da barra de FRP e diâmetro efetivo é o valor utilizado nos cálculos necessários para a determinação das propriedades mecânicas da barra.

**Tabela 10: Diâmetros e áreas nominais das barras de FRP, em função da área efetiva**

Diâmetro nominal (mm)	Área da seção nominal (mm <sup>2</sup> )	Limites de área efetiva da seção transversal (mm <sup>2</sup> )	
		Mínimo	Máximo
4	12,6	11,8	17,7
5	19,6	18,5	25,4
6	28,3	26,6	45,2
8	50,3	47,2	70,7
10	78,5	73,8	101,8
12	113,1	106,3	138,5
14	153,9	144,7	181,0
16	201,1	189,0	229,0
18	254,5	239,2	282,7
20	314,2	295,3	342,1
22	380,1	357,3	441,8
25	490,9	461,4	554,2
28	615,7	578,8	723,8
32	804,2	756,0	910,0

Fonte: ABNT NBR 17201-1 (2025)

A ABNT NBR 17201-1 (2025) ainda apresenta os métodos de ensaio e os requisitos presentes na Tabela 11 para a caracterização das barras FRP. Além disso, encontram-se na Tabela 12 os requisitos e métodos de ensaio para controle do produto e certificação por parte do fabricante, cujos ensaios devem ser repetidos para cada lote produzido.

**Tabela 11: Propriedades requeridas e métodos de ensaios para caracterização de barras de GFRP ou BFRP (Qualificação)**

Propriedades	Valores característicos	Método de ensaio
Temperatura de transição vítrea (°C)	≥ 100	ABNT NBR 17201-8 (2025)
Grau de cura (%)	≥ 95	ABNT NBR 17201-9 (2025)
Dimensão efetiva da seção transversal	Tabela 10	ABNT NBR 17201-2 (2025)
Resistência à tração* (MPa)	≥ 800	ABNT NBR 17201-3 (2025)
Módulo de elasticidade (GPa)	≥ 45	ABNT NBR 17201-3 (2025)
Deformação à tração (%)	≥ 1,1	ABNT NBR 17201-3 (2025)
Resistência de aderência da barra ao concreto* (MPa)	≥ 12	ABNT NBR 17201-6 (2025)
Resistência ao esforço cortante* (MPa)	≥ 150	ABNT NBR 17201-4 (2025)
Resistência após exposição ao meio alcalino	≥ 80 % da resistência à tração inicial	ABNT NBR 17201-12 (2025)
Absorção por saturação (%)	≤ 1,0	ABNT NBR 17201-11 (2025)
Resistência à tração em regiões de dobra* (MPa)	≥ 60 % da resistência à tração mínima requerida para a barra	ABNT NBR 17201-7 (2025)

\* Valor característico fornecido pelo fabricante deve ser menor ou igual à média menos três desvios padrão das amostras ensaiadas de acordo com o método especificado

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 17201-1 (2025)

**Tabela 12: Propriedades requeridas e métodos de ensaios para controle do produto e certificação de aceitação**

Propriedades	Valores característicos	Método de ensaio
Porcentagem de fibras em massa na composição da barra (%)	$\geq 75$	ABNT NBR 17201-10 (2025)
Dimensão efetiva da seção transversal	Tabela 10	ABNT NBR 17201-2 (2025)
Resistência à tração (MPa)	$\geq 800$	ABNT NBR 17201-3 (2025)
Módulo de elasticidade (GPa)	$\geq 45$	ABNT NBR 17201-3 (2025)
Deformação à tração (%)	$\geq 1,1$	ABNT NBR 17201-3 (2025)
Absorção por saturação em 24h (%)	$\leq 0,25$	ABNT NBR 17201-11 (2025)
Resistência ao cisalhamento horizontal aparente (MPa)	$\geq 50$	ABNT NBR 17201-5 (2025)

Fonte: ABNT NBR 17201-1 (2025)

De acordo com a Norma, os ensaios para a caracterização da barra de FRP devem ser realizados sempre que existam mudanças nos materiais ou processo de produção, ou no caso de um novo produto estar em produção. Além disso, deve ser realizada inspeção visual para verificar a presença de defeitos como fraturas, descascamentos, fragmentação e escorrimento de resina, ocorrências que podem comprometer o desempenho do material.

A ABNT NBR 17201-1 (2025) recomenda que, até sua utilização, as barras sejam armazenadas em local coberto, fresco, arejado, em temperatura ambiente (15 a 25 °C) e protegidas da radiação UV e umidade.

### 2.3 ASPECTOS DE DURABILIDADE

De acordo com Wu *et al.* (2023), as barras de FRP apresentam excelente resistência à corrosão, mesmo quando imersas em ambiente com alta concentração de cloretos. Chen *et al.* (2007), Benmokrane *et al.* (2017b) e Jia *et al.* (2020) realizaram estudos sobre esse assunto e concordam que ambientes ricos em cloretos têm pouco impacto nas propriedades mecânicas das barras de FRP. Todavia, apesar de não sofrer corrosão como o aço convencional, o FRP pode sofrer degradação em ambientes agressivos, os quais são divididos, principalmente, em ambientes alcalinos, ambientes com a presença de água, ambientes ácidos e ambientes salinos. Assim, entender a durabilidade de barras de GFRP em função das fibras de vidro e da matriz polimérica é essencial para o projeto de elementos de concreto armados com barras de GFRP, garantindo a vida útil e a segurança (Almusallam, Al-Salloum, 2006).

A ABNT NBR 17196 (2025) estabelece classes de agressividade ambiental que devem ser consideradas no projeto de estruturas de concreto armado com barras de FRP, conforme apresentado na Tabela 13. A norma também define requisitos mínimos relacionados à qualidade do concreto e ao cobrimento nominal, de acordo com a classe de agressividade, para os casos em que não há ensaios acelerados que comprovem a durabilidade da solução adotada (Tabela 14 e Tabela 15). Além disso, a norma permite a redução de 5 mm no

cobrimento nominal quando for utilizada uma classe de concreto superior à exigida pela Tabela 14.

A ABNT NBR 17196 (2025) também estabelece limites para a abertura de fissuras ( $w_{m\acute{a}x}$ ) em estruturas de concreto armadas exclusivamente com barras de FRP, conforme a Tabela 16. Nos casos em que haja a presença de barras de aço na estrutura, os limites de abertura de fissuras ( $w_k$ ) devem seguir os critérios da ABNT NBR 6118 (2023). Nessa situação, os valores de referência para  $w_k$  são definidos de acordo com as classes de agressividade ambiental I, II, III e IV (fraca, moderada, forte e muito forte, respectivamente) da ABNT NBR 6118 (2023), conforme também apresentado na Tabela 16.

**Tabela 13: Classe de agressividade ambiental das estruturas de concreto com barras de FRP**

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
CAA-FRP-I	Fraca	- Estruturas em ambiente urbano ou rural sem contato permanente com água.	Pequeno
CAA-FRP-II	Moderada	- Estruturas em contato permanente com água com teor baixo a moderado de sulfatos. - Estruturas em ambiente marinho ou em contato permanente com água do mar. Estruturas em contato com solo com concentração baixa a moderada de sulfatos.	Moderado
CAA-FRP-III	Forte	- Estruturas em contato permanente com água com alto teor de sulfatos. - Estruturas em contato com solo contaminado com produtos químicos ou com alta concentração de sulfatos. - Ambientes quimicamente agressivos como tanques industriais.	Grande

Fonte: ABNT NBR 17196 (2025)

**Tabela 14: Qualidade do concreto a ser utilizado em função da classe de agressividade ambiental**

Classe de agressividade ambiental	Relação a/c	Classe do concreto (ABNT NBR 8953, 2015)
CAA-FRP-I	$\leq 0,60$	$\geq C20$
CAA-FRP-II	$\leq 0,50$	$\geq C30$
CAA-FRP-III	$\leq 0,40$	$\geq C45$

Fonte: ABNT NBR 17196 (2025)

**Tabela 15: Cobrimento nominal a ser utilizado em função da classe de agressividade ambiental**

Classe de agressividade ambiental	Cobrimento nominal de vigas, pilares e paredes (mm)	Cobrimento nominal de lajes (mm)
CAA-FRP-I	30	20
CAA-FRP-II	40	40
CAA-FRP-III	55	55

Fonte: ABNT NBR 17196 (2025)

**Tabela 16: Limites de abertura de fissura para estruturas de concreto armado com barras de FRP versus armadura de aço**

Armadura de FRP		Armadura de aço	
Classe de agressividade ambiental	$w_{máx}$ (mm)	Classe de agressividade ambiental	$w_k$ (mm)
CAA-FRP-I	0,7	CAA-I	$\leq 0,4$
CAA-FRP-II	0,6	CAA-II e CAA-III	$\leq 0,3$
CAA-FRP-III	0,5	CAA-IV	$\leq 0,2$

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 17196 (2025) e ABNT NBR 6118 (2023)

### 2.3.1 DURABILIDADE DO FRP

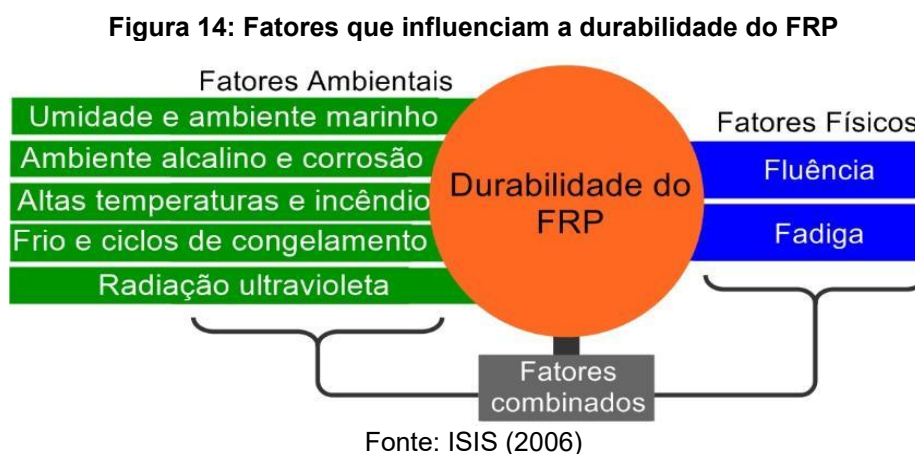
Os agentes agressivos que afetam a durabilidade de armaduras de FRP são diferentes dos que afetam a durabilidade de armaduras de aço. Segundo o FIB *Bulletin* 40 (2007), são três os componentes do FRP que influenciam em suas propriedades a longo prazo: a matriz polimérica, as fibras e a interface fibra/matriz. Cada um destes componentes pode ser suscetível ao ataque de diferentes ambientes agressivos, mas, ainda assim, devem continuar a funcionar plenamente ao longo da vida útil do FRP.

A matriz polimérica atua como barreira contra à ação do ambiente externo, protegendo as fibras e a interface da degradação. Entretanto, fatores externos como a natureza do ambiente (pH e presença de agentes iônicos agressivos), tensões no FRP, temperatura, a condição do FRP (extremidades cortadas e danos à matriz) e a qualidade do FRP (acabamento superficial, vazios e homogeneidade da resina) podem influenciar a efetividade desta proteção. A efetividade da resina depende da continuidade da sua superfície, ou seja, extremidades cortadas e fibras expostas podem ser problemáticas do ponto de vista da durabilidade. Nestas regiões expostas os agentes agressivos são absorvidos e disseminados por todo o FRP, colocando as fibras, matriz e a interface sobre o ataque direto do ambiente circundante (FIB *Bulletin* 40, 2007).

Assim, a qualidade do FRP em termos de durabilidade depende de vários fatores relacionados, principalmente, com o tipo e qualidade dos constituintes, tais como a homogeneidade da superfície da matriz polimérica (envolvimento completo das fibras pela resina), a ausência de fissuras e vazios, o grau de cura da resina (se o processo de produção não é controlado corretamente a resina pode ser não ser suficiente para prover a proteção necessária) e o desempenho da interface fibra/matriz (seleção incorreta do tipo de fibra e resina ou problemas na produção podem levar à uma interface propícia ao ataque de agentes agressivos). A chave para garantir a durabilidade da matriz polimérica é a seleção de uma resina inerentemente capaz de resistir à ação de álcalis e cloretos, suficientemente resistente à microfissuras e à penetração de agentes agressivos, facilmente processável para minimizar variações em sua qualidade e compatível à fibra a ser utilizada para garantir a aderência fibras/matriz (Ceroni *et al.*, 2006; FIB *Bulletin* 40, 2007; El-Hassan, El-Maaddawy, 2019).

Segundo a Prática Recomendada CT 303 (2021), o projeto de estruturas com armadura de FRP deve assegurar a manutenção das condições de segurança ao longo de uma vida útil previamente definida, considerando as condições de uso e manutenção previstas. A ABNT NBR 17196 (2025), por sua vez, define que o projeto deve contemplar ou mitigar os efeitos dos mecanismos de deterioração do concreto, do aço e do próprio FRP, de modo a atender os requisitos de durabilidade. No caso do concreto, devem ser considerados mecanismos como lixiviação, expansão por sulfatos, reação álcali-agregado e formação de etringita tardia, conforme orienta a ABNT NBR 6118 (2023). Para o aço, quando presente na estrutura, a norma também exige a consideração da despassivação decorrente da carbonatação ou da ação de íons cloreto, conforme a ABNT NBR 6118 (2023). Quanto às barras de FRP, a ABNT NBR 17196 (2025) estipula que a possível deterioração das propriedades por absorção de água seja prevista por meio da aplicação de um fator ambiental de redução. Além disso, exige-se que a resistência do material em meio alcalino seja comprovada a partir de ensaio acelerado.

Micelli e Nanni (2004) afirmam que a durabilidade de barras de FRP pode ser afetada por fatores ambientais ou físicos, bem como pelo seu efeito combinado, tal como apresentado na Figura 14.



### 2.3.1.1 Efeito da alcalinidade

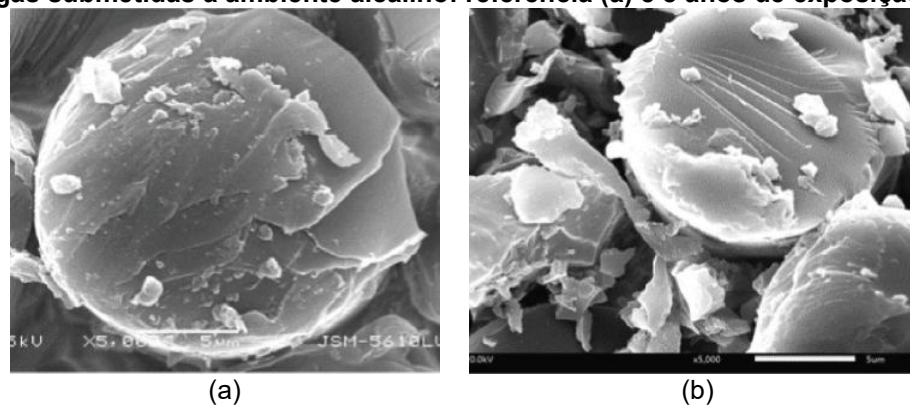
Segundo Zhu *et al.* (2011), o ambiente alcalino é o mais severo para barras de GFRP. A taxa de degradação da matriz polimérica na região superficial de barras de GFRP em um ambiente alcalino é maior do que em outros tipos de ambientes corrosivos, especialmente para matrizes do tipo poliéster (WU *et al.*, 2023). A degradação das barras de GFRP em soluções alcalinas resulta da degradação das fibras de vidro, da matriz polimérica e da interface matriz-fibras (Yu *et al.*, 2021). Essa degradação é causada pela ação dos íons OH<sup>-</sup> livres no ambiente alcalino, os quais se difundem na matriz polimérica, reagindo com o éster das resinas e formando álcool e sal de ácido carboxílico numa reação chamada hidrólise (Zhu

*et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2015). Por este motivo, a penetração de moléculas de água da solução na matriz polimérica é acelerada, resultando na deterioração da ligação entre as fibras e a matriz na interface (Al-Salloum *et al.*, 2013). Desta maneira, as resinas mais afetadas pela ação da alcalinidade são as resinas poliéster e éster vinílico, enquanto a resina do tipo epóxi é pouco afetada pela hidrólise. Nas barras de GFRP, o OH<sup>-</sup> reagirá ainda com o SiO<sub>2</sub> das fibras de vidro, rompendo as ligações de sílica e gerando SiO<sub>5/2</sub><sup>-</sup> e SiO<sub>5/2</sub>H. O novo produto SiO<sub>5/2</sub><sup>-</sup> também reagirá com o OH<sup>-</sup>, gerando água e H<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, impactando as propriedades mecânicas das fibras de vidro e resultando na perda de peso e resistência do compósito (Kuttner *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2017a; Arabi, Molez, Rangeard, 2018; Wu *et al.*, 2022b).

A Figura 15 e Figura 16 apresentam imagens captadas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV – *Scanning Electron Microscopy*) na seção transversal e longitudinal, respectivamente, de barras de GFRP utilizadas como armadura em vigas de concreto imersas em solução alcalina durante 8 anos (Wu *et al.*, 2022b). Conforme pode ser visto na Figura 15a, ao redor das fibras de vidro a matriz das barras de GFRP de referência apresenta boa integridade, com poucos fragmentos espalhados. Após 8 anos de exposição à solução alcalina, observa-se que a matriz ao redor das fibras de vidro encontra-se hidrolisada, com muitos fragmentos dispersos (Figura 15b). Esse fato indica que a reação entre a matriz e os íons OH<sup>-</sup> livres aumenta após a imersão a longo prazo em ambiente alcalino, levando à degradação da matriz. A fórmula da reação química encontra-se na Equação 4 (Gaur, Miller, 1989; Miller, Gaur, Hirt, 1991; Wei, Cao, Song, 2010; Wang *et al.*, 2017a; Wu *et al.*, 2022b). Em relação à Figura 16a, pode ser visto que a superfície das fibras de vidro das barras de GFRP de referência encontra-se sem traços óbvios de degradação e o preenchimento de matriz está completo. Após 8 anos de exposição à solução alcalina (Figura 16b), a superfície das fibras de vidro apresenta entalhes e o preenchimento de matriz encontra-se decomposto. O SiO<sub>2</sub> nas fibras de vidro é propenso à reação química com os íons OH<sup>-</sup> livres, promovendo a degradação da fibra. O produto dessa reação passará ainda por uma reação de hidratação com os íons OH<sup>-</sup> excedentes, aumentando ainda mais o grau de degradação da fibra. As fórmulas das reações químicas encontram-se nas Equações 5 e 6 (Madhukar, Drzal, 1991; Rosselli, Santare, 1997; Young *et al.*, 2012; Ryou *et al.*, 2013; Kuttner *et al.*, 2013).

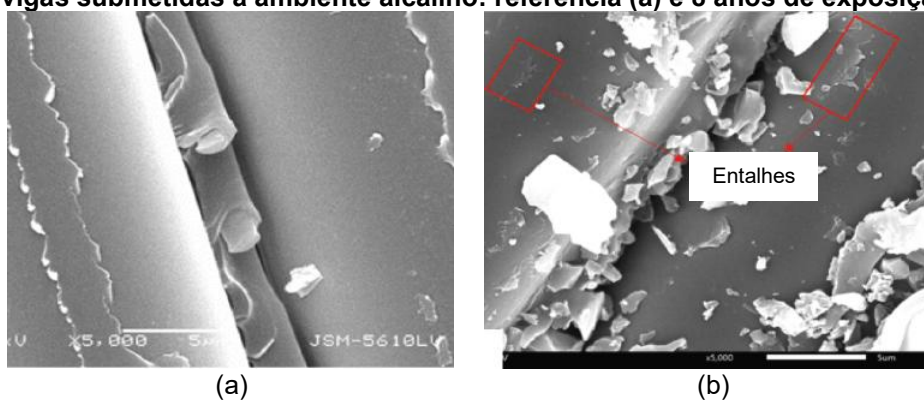


**Figura 15: Imagens MEV da seção transversal de barras de GFRP utilizadas como armadura em vigas submetidas a ambiente alcalino: referência (a) e 8 anos de exposição (b)**



Fonte: Wu *et al.* (2022b)

**Figura 16: Imagens MEV da seção longitudinal de barras de GFRP utilizadas como armadura em vigas submetidas a ambiente alcalino: referência (a) e 8 anos de exposição (b)**



Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2022b)

Segundo o ACI 440.1R (2015), os resultados de resistência à tração e rigidez de barras de GFRP submetidas a soluções alcalinas podem variar significativamente dependendo do método de ensaio, pH e composição química da solução utilizada, temperatura e a presença ou não de tensões, sendo que altas temperaturas e longos tempos de exposição são os fatores que mais afetam os resultados. A pesquisa de Wang *et al.* (2017) mostrou que o pH de um ambiente alcalino tem grande impacto na permeabilidade das moléculas de água na matriz polimérica do FRP. Sob mesmas condições, aumentando o pH do ambiente de 12,7 para 13,4, a taxa de absorção de umidade das barras de GFRP aumenta cerca de 4 vezes.

Vários autores avaliaram a durabilidade de diferentes barras de GFRP submetidas a soluções alcalinas, tais como Kamal e Boulfiza (2011), Sawpan, Mamun e Holdsworth (2014), Fergani *et al.* (2018) e Spagnuolo *et al.* (2021).

Kamal e Boulfiza (2011) submeteram barras de GFRP fabricadas com fibra de vidro do tipo E e matriz éster vinílica a diferentes soluções alcalinas e temperaturas, e observaram alterações na microestrutura das barras apenas em temperaturas maiores que 75 °C, as quais foram atribuídas ao descolamento entre fibras e matriz. Fergani *et al.* (2018), observaram reduções de resistência à tração da ordem de 30% após 270 dias de exposição de barras de

GFRP produzidas com fibra de vidro do tipo E e resina éster vinílica à solução alcalina a 50 °C, devido ao descolamento entre fibras e matriz e à dissolução das fibras de vidro. Sawpan, Mamun e Holdsworth (2014) submeteram barras de GFRP a um ambiente alcalino, com pH igual a 13 e temperatura de 60 °C. Após a imersão durante 120 dias, a taxa de retenção da resistência à tração das barras de GFRP foi de 75,17 %. Spagnuolo *et al.* (2021) imergiram barras de GFRP com diâmetros de 10, 14 e 18 mm em solução alcalina (pH = 12,8) a 60 °C durante 90 dias, as quais foram posteriormente submetidas a ensaios de tração. Os resultados obtidos mostraram que a taxa de retenção da resistência à tração aumentou gradualmente com o aumento do diâmetro da barra, sendo obtidos valores de 93,35 %, 97,97 % e 100 %, respectivamente.

Benmokrane *et al.* (2017a) submeteram barras de GFRP com matriz polimérica composta por resinas do tipo poliéster, vinil éster e epóxi a ambiente alcalino com temperatura de 60 °C durante 5000 horas e observaram que as propriedades físicas e mecânicas das barras de GFRP com resina do tipo vinil éster e epóxi apresentaram menores reduções em relação às barras de GFRP com resina do tipo poliéster. Segundo Chen *et al.* (2007), os íons hidroxila (OH<sup>-</sup>) livres e as moléculas de água se difundem nas barras de GFRP e produzem uma reação química com o grupo éster na matriz polimérica, resultando na degradação das barras. Desta forma, a resina do tipo poliéster apresenta maior quantidade de grupos éster e apresenta degradação mais significativa.

### **2.3.1.2 Efeito da umidade**

Segundo Yu *et al.* (2021), a difusão de água é um fator chave na degradação das propriedades mecânicas de barras de GFRP. Em soluções aquosas, a entrada de moléculas de água na matriz polimérica se dá por meio do processo de osmose (Wu *et al.*, 2023). Esse ingresso impacta a estrutura da matriz polimérica e causa a degradação da ligação entre as fibras e a matriz. Entre as fibras, a matriz e a interface matriz-fibras das barras de GFRP, a interface é parte mais vulnerável à deterioração (Benmokrane *et al.*, 2017a; Davalos, Chen, Ray, 2011). Em geral, a habilidade do FRP resistir ao ingresso de moléculas de água é determinada por meio de ensaios de absorção de umidade (Manalo *et al.*, 2020b). Quanto maior a absorção de umidade pelas barras de FRP, maior será a degradação do desempenho da interface fibras-matriz (Manalo *et al.*, 2020b; Duo *et al.*, 2021). Os processos típicos de degradação da interface incluem fissuras osmóticas na matriz, descolamento interfacial e delaminação (Chen *et al.*, 2007).

A umidade é transmitida radialmente por ação capilar na matriz polimérica até atingir as fibras de vidro, as quais podem ser degradadas devido a reações químicas entre as moléculas de água, íons hidroxila e óxido de silício (Won *et al.*, 2012; Moura, 2021).

A absorção de água está associada à plasticização da matriz polimérica, fenômeno no qual tensões internas são induzidas pela separação das cadeias moleculares da matriz e que apresenta efeitos deletérios no módulo de elasticidade da matriz (Weitsman, 2012; Ray, Rathore, 2014). Com a absorção de água a matriz polimérica apresenta inchamento, aumentando de volume e provocando o surgimento de microfissuras em direção ao interior da barra de FRP, bem como o descolamento entre fibras e matriz (Won *et al.*, 2012).

De acordo com Rifai *et al.* (2020), a difusão de umidade pela matriz polimérica pode também provocar a reação de hidrólise dos grupos éster da matriz, impactando significativamente as propriedades mecânicas do compósito (AFGC, 2023). Nkurunziza *et al.* (2005) explicam que a ação da água causa a lixiviação dos álcalis encontrados nas fibras de vidro, formando íons  $\text{OH}^-$  na solução aquosa. Consequentemente, os íons hidroxila agora presentes na solução provocam a hidrólise da matriz e a dissolução da sílica das fibras de vidro, degradando o GFRP (Nkurunziza *et al.*, 2005; AFGC, 2023). Esse fenômeno justifica o fato do ambiente alcalino ser mais agressivos do que a água para as barras de GFRP no período inicial da exposição, sendo que, ao longo do tempo os ambientes se tornam semelhantemente agressivos ao GFRP devido à produção de íons hidroxila com o progresso das reações químicas entre a água e as fibras de vidro (Nkurunziza *et al.*, 2005). Os efeitos associados à ocorrência de plasticização ou hidrólise da matriz pela ação das moléculas de água absorvidas pela barra de FRP são significativos para temperaturas em serviço superiores a 60 °C e desprezíveis para temperaturas de serviço abaixo de 40 °C (ACI 440.1R, 2015; Wu *et al.*, 2023).

Assim, de maneira geral, a matriz pode ser danificada por fissuração e microfissuração devido à expansão volumétrica durante a absorção de umidade, enquanto sua rigidez pode ser reduzida pela plasticização. Um mecanismo subsequente da degradação resulta da quebra das cadeias poliméricas desencadeada pela hidrólise e pela lixiviação de materiais de baixo peso molecular da resina, podendo causar danos adicionais à matriz (Ashbee, Frank, Wyatt, 1967; Ashbee, Wyatt, 1969; Abeysinghe *et al.*, 1982). Uma matriz polimérica formada por vinil éster, que contém muito menos unidades éster em comparação com o poliéster, é menos suscetível à deterioração por íons hidroxila do que uma matriz de poliéster (Robert e Benmokrane, 2013).

El-Hassan e El-Maaddawy (2019) afirmam que a ocorrência de reação de hidrólise aumentará acentuadamente quando a taxa de absorção de umidade exceder 1 % em barras de GFRP fabricadas com resina éster vinílica ou 2 % em barras de GFRP fabricadas com resina epóxi. Em geral, em barras de GFRP, a reação de hidrólise aumentará a proporção interna dos grupos OH. Em contraste, o número dos grupos CH não mudará durante a hidrólise a longo prazo das barras. Dessa forma, as alterações na razão OH/CH podem ser

utilizadas para avaliar o grau da reação de hidrólise, e, quanto maior o grau da reação de hidrólise, maior o grau de degradação da matriz e das fibras (Wu *et al.*, 2023).

Debaiky *et al.* (2006) observaram que, em barras de GFRP fabricadas com resina éster vinílica, quando a taxa de absorção de umidade passou de 0,37 % a 0,57 %, a razão OH/CH aumentou de 1,05 a 1,45, perfazendo um aumento de 38,10 %. Da mesma forma, Montaigu *et al.* (2013) e Benmokrane *et al.* (2017c) avaliaram a taxa de absorção de umidade e a razão OH/CH de barras de GFRP fabricadas com resina éster vinílica. Montaigu *et al.* (2013) observaram que, com o aumento da taxa de absorção de umidade de 1,59 % para 1,63 %, a razão OH/CH aumentou 81,3 %, passando de 0,48 a 0,87. Benmokrane *et al.* (2017c) obtiveram um aumento de 94,9 % na razão OH/CH, a qual passou de 0,59 a 1,15 quando a taxa de absorção de umidade passou de 0,10 % a 1,50 %. El-Hassan *et al.* (2017) avaliaram a taxa de absorção de umidade e a razão OH/CH em barras de GFRP fabricadas com resina epóxi. Com o aumento da taxa de absorção de umidade de 0,10 % para 2,54 %, os autores observaram aumento de 1,07 para 1,27 na razão OH/CH, perfazendo um aumento de 18,7 %.

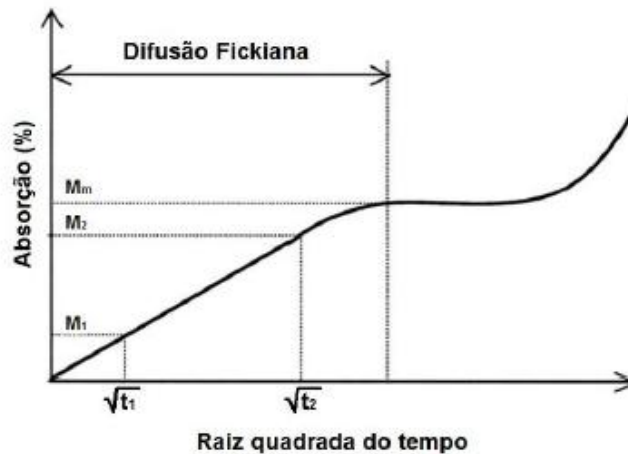
Além das reduções nas propriedades mecânicas do compósito, a absorção de água atua ainda na redução da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) da matriz, a partir da qual o material passa do estado rígido e sólido frágil ao estado plástico viscoso e fluido, podendo ser atingida redução de até 75 % (EUROCOMP, 1996). Segundo o ISIS (2006), na presença de umidade os materiais poliméricos experimentam o amolecimento, resultando em perdas em suas propriedades mecânicas.

A degradação das propriedades mecânicas das barras de GFRP expostas a condições agressivas afeta o comportamento de transporte das moléculas de água (Yu *et al.*, 2021). No estágio inicial de exposição, as moléculas de água se difundem na matriz polimérica e a difusão da água predomina, resultando no amolecimento da matriz (Hong, Xian, Li, 2018). A extensão desse amolecimento da matriz depende da umidade relativa, da temperatura ambiente e da estrutura da matriz polimérica. Com o aumento do tempo de exposição, a permeação de água se torna dominante. A hidrólise e a fissuração da matriz polimérica, bem como o descolamento na interface fibra-matriz ocorrem gradualmente.

O comportamento de difusão da água em barras de GFRP é caracterizado pelo aumento linear da quantidade de água absorvida até o momento em que se atinge a saturação, ponto a partir do qual a absorção passa a ser constante e volta a aumentar à medida que a água penetra nas microfissuras induzidas pela degradação da matriz (Won *et al.*, 2012). De acordo com o ISIS (2006), enquanto a taxa de absorção da umidade por parte da matriz polimérica diminui, observa-se aumento da perda de resistência e rigidez do compósito ao longo do tempo. A Figura 17 apresenta o comportamento de difusão de água no interior da barra de GFRP, o qual normalmente segue a Lei de Fick até que se atinja a saturação e a formação de um patamar seja observada. Na Figura 17,  $M_m$  é o valor de

absorção de saturação, e  $M_1$  e  $M_2$  são os valores de absorção de água para os tempos  $t_1$  e  $t_2$ , respectivamente. A partir do valor de saturação, de acordo com Moura, Ribeiro e Lima (2021), a absorção de água praticamente cessa. Entretanto, em algumas situações a concentração de umidade de equilíbrio não é atingida e absorção de umidade continua a ocorrer, sem que a cinética da Lei de Fick seja seguida. Este comportamento normalmente é atribuído à degradação ou fissuração da matriz polimérica (Micelli, Nanni, 2004; Won *et al.*, 2012).

**Figura 17: Comportamento da absorção de água nas barras de GFRP**



Fonte: Moura (2021)

Assim, segundo Wu *et al.* (2023), o ensaio de absorção de umidade pode ser utilizado para analisar a resistência das barras de FRP à penetração de moléculas de água na matriz polimérica quando exposta a ambientes agressivos. Dessa forma, quanto maior a absorção de umidade, pior a resistência.

Entre os diversos modelos propostos para determinar a difusão de água, o modelo Fickiano unidimensional se destaca devido à sua simplicidade (Moura, 2021), conforme apresentado na Equação 7, na qual  $c$  é a concentração,  $t$  é o tempo,  $x$  é a direção da difusão e  $D$  é o coeficiente de difusão na direção  $x$ . De acordo com Wang *et al.* (2016), a absorção de água em função do tempo ( $M_t$ ) pode ser determinada com o uso da Equação 8, na qual  $M_m$  é a absorção de saturação e  $h$  é a espessura da amostra, tomada como o diâmetro da barra de GFRP. O coeficiente de difusão ( $D$ ) é obtido no trecho linear da curva de absorção (Figura 17) e pode ser calculado de acordo com a Equação 9 (Won *et al.*, 2012), na qual  $M_1$  e  $M_2$  correspondem a absorção de água nos tempos  $t_1$  e  $t_2$ , respectivamente.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (7)$$

$$M_t = M_m \left\{ 1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2 \cdot n + 1)^2} \cdot \exp \left[ -\frac{D \cdot t}{h^2} \cdot \pi^2 \cdot (2 \cdot n + 1)^2 \right] \right\} \quad (8)$$

$$D = \frac{\pi}{16} \cdot \left[ \frac{h \cdot (M_2 - M_1)}{M_m \cdot (\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1})} \right]^2 \quad (9)$$

Segundo a Prática Recomendada CT 303 (2021) as resinas do tipo éster vinílicas apresentam maior resistência ao ingresso de umidade, e, portanto, são capazes de propiciar maior proteção às fibras. Bemmokrane *et al.* (2017b) avaliaram a absorção de umidade de barras de GFRP com três tipos diferentes de matriz submetidas à solução alcalina com pH de 12,8. Os resultados mostraram que as barras de GFRP compostas de matriz epóxi tem a maior resistência ao ingresso de moléculas de água, seguidas das barras de GFRP com matriz do tipo éster vinílica e poliéster.

Em comparação a soluções salinas e alcalinas, a absorção de umidade em barras de FRP submetidas a soluções aquosas é mais significativa (Duo *et al.*, 2021). Contudo, a influência de um ambiente aquoso sobre a durabilidade a longo prazo de barras de FRP é menor que a influência de um ambiente alcalino, mas é mais significativa do que a influência de uma solução salina, conforme demonstrado nos estudos de Kim *et al.* (2008) e Lu *et al.* (2020). Manalo *et al.* (2020b) estudaram a absorção de umidade de barras de GFRP submetidas a solução alcalina, salina e aquosa à 80 °C, obtendo taxas máximas de absorção de umidade iguais a 0,22 %, 0,15 % e 0,18 %, respectivamente. Dessa forma, os autores observaram que a solução alcalina impactou mais significativamente a taxa de absorção de umidade das barras de GFRP, seguida da solução aquosa. Pan e Yan (2021) imergiram barras de GFRP com diâmetro de 8 mm e superfície com enrolamento helicoidal em soluções alcalinas a 20, 40 e 60 °C durante 4 a 110 dias. Após 110 dias de imersão na solução com temperatura de 40 °C, os autores obtiveram taxa de absorção de umidade de 1,88 %.

De acordo com El-Hassan *et al.* (2017), a absorção de umidade por parte das barras de FRP não é afetada somente pelo tipo de ambiente, mas também sofre incremento com o aumento da porosidade interna das barras e da temperatura do ambiente. Moura, Ribeiro e Lima (2021), avaliaram o comportamento da absorção de água de barras de GFRP com matriz polimérica composta por poliéster e vinil éster quando imersas em solução alcalina a 23 °C e 60 °C, observando que as curvas de absorção apresentaram comportamento tipicamente Fickiano, com difusão linear no período inicial, independentemente da temperatura e do tipo de matriz. Após atingir a saturação, os autores observaram que as curvas de absorção de umidade se diferenciaram em função da temperatura da solução, sendo que as barras de GFRP mantidas em solução alcalina a 60 °C continuaram a absorver água. Yu *et al.* (2021) avaliaram a absorção de água de barras de GFRP produzidas com resina epóxi imersas em água destilada à 21 °C, 40 °C e 60 °C. Tais autores notaram que a taxa de absorção é proporcional ao aumento da temperatura, uma vez que há o relaxamento da estrutura do

polímero e o aumento de energia das moléculas de água, causando o aceleração da difusão.

A absorção de umidade também sofre influência do comprimento da barra de FRP, tal como mostraram Starkova, Aniskevich e Sevchenko (2021), os quais avaliaram a absorção de umidade a longo prazo de barras de GFRP em solução salina. Os autores observaram que a absorção de umidade diminui com o aumento do comprimento.

### **2.3.1.3 Efeito das soluções salinas**

Uma das justificativas para o uso de armaduras de FRP é devido à corrosão das armaduras de aço em ambientes agressivos. Segundo a Prática Recomendada CT 303 (2021), essa justificativa é válida uma vez que a presença de cloretos tem pouca influência no comportamento mecânico do FRP. Contudo, quando imerso em solução salina o FRP absorve umidade e fica sujeito à degradação por hidrólise, plasticização e inchamento.

Segundo Al-Salloum *et al.* (2013), comparadas com soluções aquosas e ambientes alcalinos, as soluções salinas têm menor influência sobre as barras de FRP. Nesse sentido, os autores realizaram um estudo no qual imergiram barras de GFRP em solução salina, aquosa e alcalina a 50 °C durante 540 dias, obtendo taxas de retenção da resistência à tração das barras iguais a 87,20 %, 75,52 % e 75,95 %, respectivamente. Os autores explicam que o sal presente nas soluções salinas forma uma película na superfície das barras de GFRP, prevenindo a entrada das moléculas de água no interior da matriz e atenuando a degradação na interface matriz-fibras. Kim *et al.* (2008) realizou um programa experimental no qual avaliou a resistência à tração de barras de GFRP imersas em solução alcalina, aquosa e salina à 80 °C, durante 60 dias. Os resultados obtidos mostraram que a taxa de retenção da resistência à tração das barras de GFRP imersas em solução alcalina foi 15 % e 20,3 % inferior do que a taxa de retenção da resistência à tração das barras de GFRP imersas em solução aquosa e salina, respectivamente.

De modo geral, os estudos que empregam ensaios acelerados com solução salina utilizam NaCl em concentração igual ou próxima de 3,5 %, por ser este um teor representativo da salinidade média da água do mar (Soares, 2021; Rezende, 2022; United States Geological Survey, 2023).

Robert e Benmokrane (2013) submeteram barras de GFRP com diâmetro de 12,7 mm envoltas por concreto à solução salina (NaCl) com concentração de 3 % e temperaturas de 23 °C, 40 °C e 50 °C durante 60, 120, 210 e 365 dias. Os autores submeteram, ainda, barras de GFRP envoltas por concreto à solução salina (NaCl) com concentração de 3 % e à água potável, ambas a 70 °C, durante 120 dias. Os resultados obtidos pelos autores não revelaram diferenças significativas quanto à durabilidade das barras de GFRP envoltas por concreto quando imersas em água potável ou solução salina e atestaram a boa durabilidade a longo

prazo das barras de GFRP expostas à solução salina. Observou-se que a resistência à tração das barras de GFRP diminuiu com o aumento do tempo de imersão e que a temperatura da solução claramente afetou a redução da resistência à tração, devido ao aumento da taxa de difusão da solução e à aceleração da reação química de degradação com a temperatura, levando a uma maior taxa de absorção da solução para o mesmo tempo de imersão. Foram obtidas reduções de resistência à tração de 10 %, 12 % e 14 % após 365 dias de imersão a 23 °C, 40 °C e 50 °C, respectivamente. Em um estudo semelhante, Robert, Cousin e Benmokrane (2009) registraram perdas de resistência de 9 %, 10 % e 16 % após 240 dias de imersão de barras de GFRP embutidas no concreto em água a 23 °C, 40 °C e 50 °C, respectivamente. Segundo previsões dos autores, mesmo após uma vida útil de 100 anos, a retenção da resistência à tração das barras estudadas ainda seria de 70 % e 77 % para temperaturas médias anuais de 50 °C (temperatura média anual e ambiente marinho do Oriente Médio e regiões quentes) e 10 °C (temperatura média das regiões norte), respectivamente.

Morales *et al.* (2021) investigaram a durabilidade de barras de GFRP com diâmetro de 9,5 mm embebidas no concreto produzido com água do mar. As barras de GFRP no interior dos elementos de concreto foram expostas a diferentes condições ambientais durante 1, 6, 12 e 24 meses e foram posteriormente extraídas para determinação de suas propriedades físicas e mecânicas. Os ambientes de exposição se basearam em condições típicas de região subtropical do Sul da Flórida (temperatura média de 25 °C e umidade relativa de 71,2 %) e água do mar a 60 °C. Os autores apontam que a resistência à tração das barras foi o fator mais afetado pelas condições ambientais. Com base em um modelo exponencial de degradação, a previsão de retenção média da resistência à tração a longo prazo obtida foi de 92 % sob condições típicas de região subtropical e de 72% sob a ação da água do mar a 60 °C.

Lu *et al.* (2022) investigaram a durabilidade de barras de GFRP com diâmetro de 6 mm embebidas em concreto produzido com água e areia do mar e imersas em água do mar. Os autores observaram que a resistência à tração das barras de GFRP sofreu degradação significativa, com retenções de resistência de 49,5 %, 18,4 % e 18,2 % para as barras mantidas imersas durante 120 dias à temperatura ambiente, 40 °C e 60 °C, respectivamente. Este fato se deve, provavelmente, à influência da penetração de íons agressivos sobre as barras com pequeno diâmetro, indicando que a durabilidade das barras de GFRP é afetada pelo diâmetro (Duo *et al.*, 2021; Iqbal *et al.*, 2021).

Para investigar os efeitos causados por ambiente rico em cloretos sobre a durabilidade do GFRP, Wang *et al.* (2023) submeteram barras de GFRP com diâmetro de 14 mm envoltas por concreto produzido com água e areia do mar, com revestimento de 30 mm, a ciclos de molhagem e secagem em solução de cloretos durante 90, 180 e 270 dias. Tais ciclos

consistiram em imersão em solução de NaCl com concentração de 3,5 % e temperatura de  $40 \pm 2$  °C durante 12 h e secagem em ambiente com temperatura de  $25,2 \pm 8,9$  °C e umidade de  $65,3 \pm 16,6$  % durante 12 h. Após os períodos de exposição, as barras foram submetidas a ensaios de tração axial por meio dos quais os autores obtiveram retenções da resistência à tração de 81 %, 76 % e 76 % após 90, 180 e 270 dias de exposição, respectivamente.

Empanza *et al.* (2022) submeteram 6 diferentes tipos de barras de GFRP ao envelhecimento acelerado por meio de sua imersão em água do mar a temperaturas de 23 °C, 40 °C e 60 °C durante 60, 120, 210 e 365 dias. Como esperado, os autores observaram que a solução com temperatura de 60 °C levou a significativamente maiores reduções de resistência em comparação às temperaturas de 23 °C e 40 °C. Os autores observaram que a barra que apresentou maior absorção de umidade (maior que 1 % na saturação) sofreu degradação mais expressiva, com reduções da resistência à tração, da resistência ao cisalhamento transversal e horizontal e da resistência de aderência iguais a 45 %, 20 %, 10 % e 20 %, respectivamente, sem reduções expressivas no módulo de elasticidade.

#### **2.3.1.4 Durabilidade do FRP no interior do concreto**

Segundo o FIB Bulletin 40 (2007), um dos maiores problemas é o fato do GFRP ser sensível à ataques alcalinos, o que faz do concreto um ambiente intrinsecamente agressivo. Os produtos da hidratação do cimento no concreto são naturalmente alcalinos e a presença de umidade no concreto induz a lixiviação dos álcalis e a formação de uma solução de poros alcalina (Yu *et al.*, 2021). Pesquisas mostraram que a solução contida nos poros do concreto é abundante e altamente alcalina, com pH variando geralmente entre 12,5 e 13,5 (Shi *et al.*, 2021; Lu, Shi, Zhong, 2022; Yang *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2022c). Assim, a alcalinidade da solução contida nos poros do concreto é a principal responsável pela degradação das barras de GFRP (D'Antino, Pisani, Poggi, 2018).

Entretanto, estudos mostraram que o concreto não é tão agressivo quanto as soluções alcalinas que a maioria dos pesquisadores utiliza, ou seja, a taxa de degradação de barras de GFRP diretamente imersas em solução que simula laboratorialmente a solução presente nos poros do concreto é maior do que para uma situação real de envolvimento interno em estruturas de concreto (Manalo *et al.*, 2020b; Li *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2022b). Wu *et al.* (2022b) analisaram a aparência de barras de GFRP após serem expostas a solução alcalina durante 8 anos. Os autores observaram a desagregação completa entre fibras e matriz da região diretamente exposta a solução alcalina (Figura 18), enquanto a região protegida no interior do concreto manteve boa aparência. A desagregação das fibras em relação à matriz reflete diretamente a degradação das propriedades mecânicas das barras.

**Figura 18: Aparência das barras de GFRP após imersão em solução alcalina durante 8 anos**



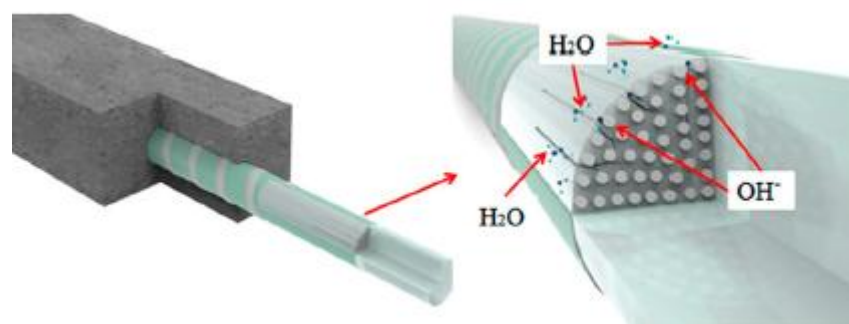
Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2022b)

He, Dai e Yang (2017) afirmam que o processo de degradação de barras de GFRP embebidas no concreto pode ser dividido em três estágios. No primeiro estágio, durante a configuração inicial do concreto, a solução intersticial tem uma alta alcalinidade devido à reação de hidratação do cimento. Os íons  $\text{OH}^-$  e as moléculas de água penetram no interior da barra de GFRP principalmente por difusão, a matriz polimérica na superfície da barra de GFRP incha depois de absorver as moléculas de água e, em seguida, a pressão osmótica promove o surgimento e o desenvolvimento de microfissuras. No segundo estágio, à medida que o concreto endurece gradualmente e ocorre a reação de carbonatação, a umidade do concreto é consumida e evaporada. A reação corrosiva seria interrompida na ausência de água. Nesse momento, o ambiente de concreto não só não tem efeito adverso sobre as propriedades de tração das barras de GFRP, mas também fornece uma cobertura protetora contra a ação de meios agressivos externos às barras de GFRP. No último estágio, quando a estrutura de concreto armado com GFRP é submetida a condições de serviço nas quais são mantidas em um estado de tensões sob carga sustentada, os defeitos e vazios iniciais da matriz de resina criam uma concentração de tensões e geram microfissuras. Essas microfissuras e as fissuras no concreto sob situação de serviço fornecem canais adicionais para que os meios agressivos externos ataquem a fibra de vidro e a matriz polimérica. A Figura 19 apresenta um diagrama esquemático desse processo de degradação.

Por outro lado, segundo Manalo *et al.* (2020b), o revestimento de concreto pode reduzir significativamente a degradação da matriz de barras de GFRP submetidas a soluções aquosas. Em uma pesquisa que explorou, principalmente, o impacto de ensaios acelerados na taxa de degradação de barras de GFRP envoltas e não envoltas por concreto, Manalo *et al.* (2020b) obteve taxas de retenção da resistência à tração de barras de GFRP envoltas por

concreto iguais a 87,93 %, 83,36 % e 70,38 % após 112 dias de imersão em solução aquosa a 23 °C, 60 °C e 80 °C, respectivamente, enquanto as taxas de retenção da resistência à tração de barras de GFRP não envoltas por concreto foram obtidas iguais a 44,42 %, 33,64 % e 17,00 %, respectivamente.

**Figura 19: Diagrama esquemático do mecanismo de degradação de barras de GFRP embebidas no concreto**



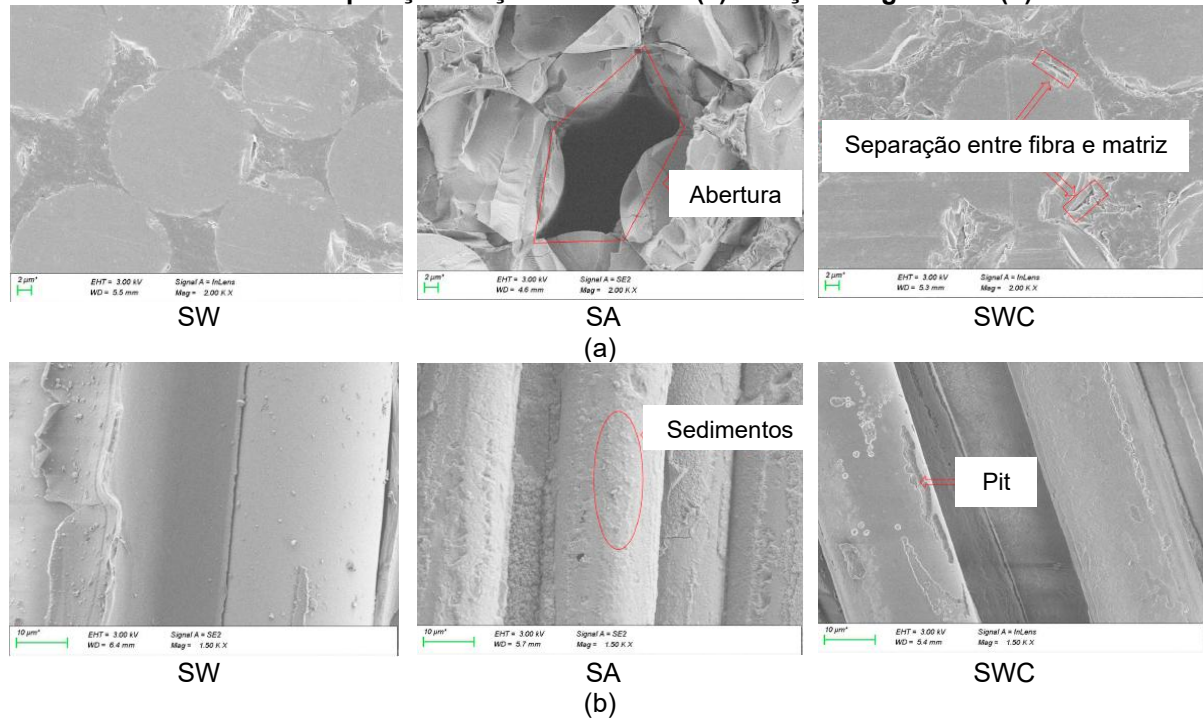
Fonte: He, Dai e Yang (2017)

Li *et al.* (2022) analisaram a durabilidade de barras de GFRP com diâmetro de 16 mm e comprimento de 80 mm diretamente expostas a água do mar (SW) ou solução salina-alcálica (SA), ambas à 60 °C, e barras de GFRP com diâmetro de 16 mm e comprimento de 80 mm protegidas no interior do concreto com cobrimento de 20 mm e expostas à água do mar (SWC) à 60 °C. Após 183 dias de exposição, as barras expostas ao ambiente SW não sofreram danos notáveis, enquanto as barras expostas aos ambientes SWC e SA apresentaram diferentes graus de separação entre as fibras e a matriz polimérica, fato que se deve ao inchamento da matriz após a absorção de água, o qual impacta diretamente a interface entre fibras e matriz, tal como pode ser visto na Figura 20a. Os autores observaram aberturas na matriz polimérica das amostras expostas ao ambiente SA devido ao efeito de erosão do  $\text{OH}^-$  na resina. Observaram, ainda, que a superfície das fibras das amostras expostas ao ambiente SW era regular e com poucos danos, enquanto a superfície das amostras expostas ao ambiente SA apresentou deposição de sedimentos, os quais são provenientes da precipitação do hidróxido de cálcio presente na solução, tal como apresentado na Figura 20b. Ainda, as barras expostas ao ambiente SWC apresentaram pequenas cavidades superficiais (*pits*) devido à reação de hidrólise.

Segundo Li *et al.* (2022), o  $\text{OH}^-$  presente nos ambientes SA e SWC reagiu com o  $\text{SiO}_2$  presente nas fibras de vidro, conforme a Equação 10, gerando o produto  $\text{SiOH}$ . Esse produto formou uma camada que se anexou à superfície da fibra, e, devido ao fato de sua densidade ser menor do que a densidade da fibra, a taxa de difusão do  $\text{OH}^-$  foi aumentada. No ambiente SW, a reação de hidrólise expressa na Equação 11 ocorreu primeiro, e, então, o  $\text{OH}^-$  gerado

reagiu com o SiO<sub>2</sub> da fibra. Por conseguinte, a taxa de reação no ambiente SW foi menor do que nos ambientes SA e SWC, levando a uma menor degradação da superfície das fibras.

**Figura 20: Imagens de microscopia eletrônica de varredura realizada nas barras de GFRP após 183 dias de exposição: seção transversal (a) e seção longitudinal (b)**



Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2022)



De acordo com Pan *et al.* (2023), a ligação interfacial entre barras de GFRP e o concreto circundante deteriora significativamente em ambientes salinos-alcálinos. Conforme demonstrado no estudo de Altamas, El Refai e Abed (2015), 90 dias de imersão em solução salina-alcálica reduz a resistência de aderência entre barras de GFRP e concreto em 25 %. Wang *et al.* (2018a) estudaram as propriedades da ligação entre barras de FRP e concreto de coral (composto de detritos de coral como agregado graúdo, areia de coral como agregado fino, água do mar e cimento) em ambiente de água do mar à 30, 60 e 80 °C. Os autores observaram que a resistência de aderência decresceu com o aumento da temperatura, e o modo de falha da interface entre as barras de GFRP e o concreto passou do arrancamento da barra de GFRP à ruptura da barra. Segundo Khatibmasjedi *et al.* (2020), a resistência da ligação interfacial reduz em 11 % após um ano de imersão.

Algumas medidas podem ser adotadas como forma de reduzir a influência da alcalinidade como o uso de concreto com menor conteúdo de hidróxido de cálcio e o uso de fibras de vidro álcali resistentes, no caso do GFRP (Prática Recomendada CT 303, 2021).

### **2.3.1.5 Envelhecimento natural de estruturas com armadura de FRP**

Como a aplicação do FRP é relativamente recente no campo da construção civil, é necessária a avaliação do desempenho em longo prazo do material em campo. Debaiky *et al.* (2006) avaliaram o comportamento em longo prazo e a durabilidade de barras de GFRP em estruturas de concreto, investigando a estabilidade das propriedades mecânicas sob a exposição a diferentes condições ambientais e cargas sustentadas ao longo do tempo. Para isso, as barras de GFRP com três diferentes diâmetros foram submetidas a soluções aquosa e alcalina, em combinação a temperaturas elevadas, durante 1 a 4 meses. Foi observada retenção da resistência à tração mínima de 89 % para a barra com menor diâmetro, sem alterações significativas no módulo de elasticidade das barras. Análises microestruturais revelaram degradações mínimas, principalmente delaminação e degradação química da matriz polimérica, sem impactos consideráveis nas fibras de vidro. Os autores mencionam que condições de laboratório são mais agressivas do que condições reais, sugerindo que os níveis de degradação observados provavelmente não ocorreriam em condições reais de serviço e garantindo que a resistência à tração do material permaneceria praticamente inalterada ao longo do tempo. Nesse sentido, algumas pesquisas e estudos de caso foram realizados para avaliar a durabilidade de barras de GFRP aplicadas como armadura em estruturas de concreto, como pontes e docas secas (Mufti *et al.*, 2005; Gooranorimi, Nannii, 2017; Benmokrane *et al.*, 2018; Ramanathan *et al.*, 2021; Benzecry *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2022b).

Mufti *et al.* (2007) destacam que os resultados de ensaios de durabilidade realizados por meio da imersão de barras de FRP em soluções alcalinas, no contexto de análises laboratoriais aceleradas, são muito divergentes da durabilidade de barras envoltas por concreto em estruturas reais, no contexto de situações de campo. Mufti *et al.* (2005) investigaram a durabilidade de barras de GFRP utilizadas como armadura em pontes com estrutura de concreto no Canadá após cinco a oito anos de serviço. Análises microestruturais revelaram que não houve deterioração nas barras de GFRP, sem sinais visíveis de degradação química devido à alcalinidade do concreto. Além disso, microscopias óticas revelaram que a ligação entre as barras de GFRP e o concreto não foi afetada pela exposição ambiental.

Um estudo realizado por Gooranorimi e Nanni (2017) avaliou a durabilidade de barras de GFRP que foram extraídas de uma região de um tabuleiro de concreto de uma ponte localizada no Texas após 15 anos de serviço. As barras de GFRP apresentaram redução de 23 % na resistência ao cisalhamento transversal após 15 anos de serviço, em relação às amostras de referência. Entretanto, por meio de análises microestruturais os autores observaram que as barras de GFRP tiveram sua integridade microestrutural e sua composição

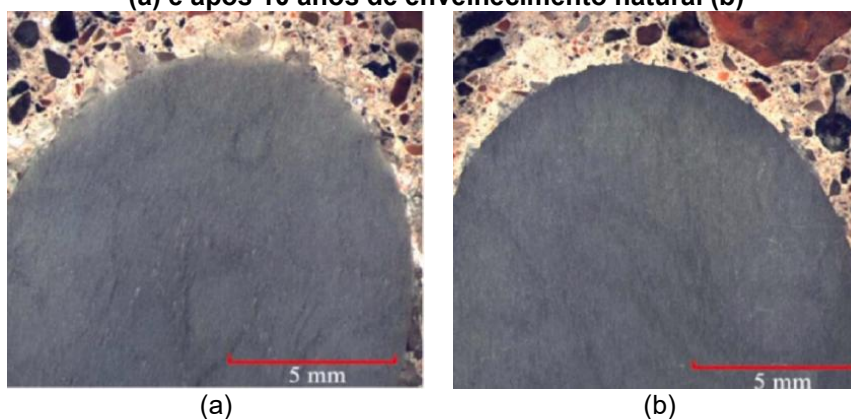
química preservadas após 15 anos de exposição às condições do local, uma vez que as fibras e a interface matriz-fibras mantiveram suas condições. A espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS – *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) não apresentou sinais de ataque químico na matriz polimérica ou nas fibras de vidro. Além disso, a  $T_g$  permaneceu inalterada, indicando uma chance muito baixa de decomposição da matriz polimérica.

Benmokrane *et al.* (2018) conduziram um estudo que avaliou barras de GFRP fabricadas com resina éster vinílica retiradas dos muros de barreira da ponte Val-Alain, localizada no Quebec, Canadá. Os autores observaram que as barras de GFRP mantiveram suas propriedades físico-químicas após 11 anos de imersão no concreto e exposição às condições ambientais. As barras de GFRP apresentaram densidade, teor de fibras, taxa de cura,  $T_g$ , quantidade de vazios e absorção de água muito similares às barras de referência. Durante análises microestruturais, os autores não identificaram nenhum tipo de degradação química ou física das barras. Assim, concluiu-se que as condições ambientais (ciclos de congelamento e descongelamento, bem como alta umidade) ao longo de 11 anos não tiveram efeitos adversos nas propriedades físico-químicas e na microestrutura das barras de GFRP instaladas nas barreiras de concreto da ponte.

Esmaeili *et al.* (2020) submeteram barras de GFRP removidas do interior de vigas de concreto sob envelhecimento natural durante 10 anos à análise microscópica utilizando MEV. Por meio da comparação das imagens obtidas para as barras de GFRP após 10 anos de envelhecimento natural com as barras de referência, os autores observaram que após 10 anos a seção transversal das barras permaneceu intacta e a interface com o concreto não apresentou sinais óbvios de degradação (Figura 21).

Ramanathan *et al.* (2021) avaliaram a durabilidade de barras de GFRP extraídas de um reparo de 18 anos (feito em 2001) em uma doca seca em Oahu, Havaí, que foi originalmente construída em 1942. Imagens obtidas por MEV mostraram que as barras de GFRP apresentaram danos graves em sua superfície, enquanto seu núcleo permaneceu intacto e em boas condições. Os danos na superfície das barras de GFRP foram validados pelos resultados obtidos em ensaios de absorção de água e de resistência ao cisalhamento interlaminar. Wu *et al.* (2022b) submeteram barras de GFRP a diferentes tipos de condicionamento durante 8 anos e observaram que a combinação de pré-fissuras, cargas sustentadas e um ambiente alcalino pode afetar consideravelmente a resistência à tração. A redução na resistência à tração foi causada pela hidrólise da matriz polimérica e a degradação das fibras de vidro, fenômenos observados a partir de imagens MEV. Contudo, o módulo de elasticidade das barras permaneceu inalterado, independentemente do tempo de exposição, do ambiente e dos níveis de carga.

**Figura 21: Interface entre barras de GFRP e o concreto circundante das amostras de referência (a) e após 10 anos de envelhecimento natural (b)**



Fonte: Esmaeili *et al.* (2020)

Uma investigação multilaboratorial foi realizada por Benzecry *et al.* (2021) e Al-Khafaji *et al.* (2021) para averiguar a durabilidade de barras de GFRP extraídas de 11 diferentes pontes com 15 a 20 anos de serviço nos Estados Unidos. Os autores observaram redução de resistência à tração de 4,2 % das barras de GFRP de uma das pontes avaliadas após 17 anos de serviço e reduções entre 8 e 28 % na resistência ao cisalhamento interlaminar das barras de GFRP de oito pontes. As análises microestruturais conduzidas pelos autores demonstraram apenas pequenos sinais de degradação predominantemente na região próxima à superfície das barras, sem sinais de lixiviação das fibras de vidro devido a ataques químicos. Os resultados da investigação indicaram que após anos de serviço em condições de campo, as barras de GFRP embebidas em concreto exposto a ambiente marinho não apresentaram degradação expressiva além da camada superficial. Nesse sentido, muitos estudos acabam sendo realizados utilizando-se técnicas de envelhecimento acelerado nas quais as barras são expostas a condições agressivas sob elevadas temperaturas para avaliar sua integridade física e mecânica ao longo do tempo.

Al-Zahrani (2024) expôs, em longo prazo, vigas de concreto armadas com dois tipos diferentes de GFRP a zona de maré em Jubail, na Arábia Saudita. Após 20 anos de exposição, as barras de GFRP foram removidas das vigas e submetidas a ensaios para análise da durabilidade. Foram observadas retenções de aproximadamente 82,5 % e 79,4 % da resistência ao cisalhamento transversal das barras de GFRP denominadas RB e SC, respectivamente, e retenções de 84,4 % e 78,1 %, respectivamente, da resistência ao cisalhamento interlaminar. Por meio de imagens MEV, observou-se a degradação das fibras de vidro, especialmente na superfície da fibra, e o consequente descolamento na interface matriz-fibras das barras de ambos os tipos. Um estudo conduzido pela equipe de pesquisa do autor (Fasil, Al-Zahrani, 2023; Fasil, Al-Zahrani, 2024) investigou a resistência ao cisalhamento transversal e interlaminar dos mesmos tipos de barra de GFRP submetidas a condições de envelhecimento acelerado, com a exposição à solução alcalina a 60 °C durante

3, 6 e 12 meses. Para as barras de GFRP do tipo RB, os autores obtiveram retenções da resistência ao cisalhamento transversal após 3, 6 e 12 meses de exposição iguais a 90,3 %, 2,8 % e 75,4 %, respectivamente, e retenções da resistência ao cisalhamento interlaminar iguais a 87,1 %, 80,6 % e 74,2 %, respectivamente. Com relação às barras de GFRP do tipo SC, os autores observaram retenções da resistência ao cisalhamento transversal e interlaminar iguais a 80,1 %, 66,1 % e 51,3 %, e 82,6 %, 63,0 % e 55,6 %, respectivamente, após 3, 6 e 12 meses de exposição. Dessa maneira, o envelhecimento acelerado causou a degradação da resistência das amostras em um ritmo mais rápido em comparação à exposição natural, motivo pelo qual essa técnica é tão aplicada para estudar o desempenho da durabilidade das barras de GFRP, sem a necessidade de realizar testes de exposição de longo prazo, em campo.

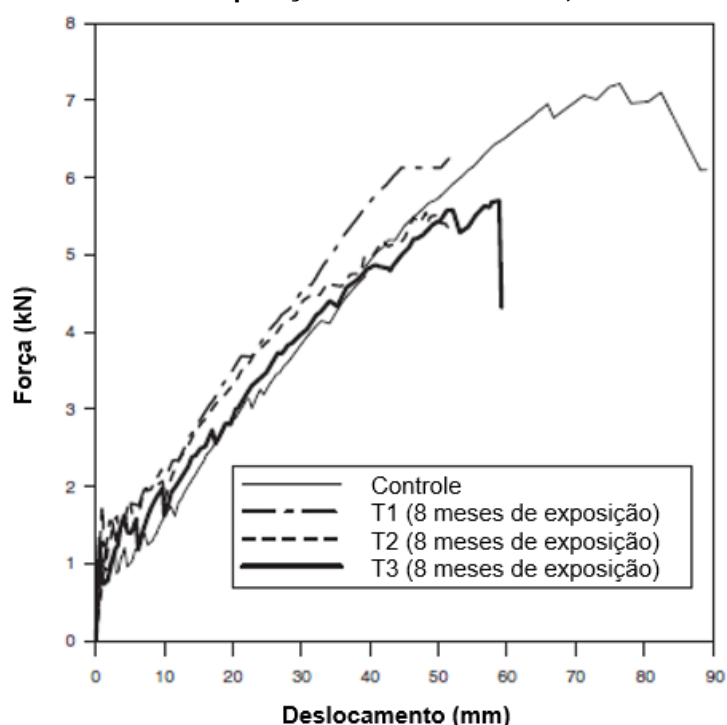
### **2.3.2 DURABILIDADE DE VIGAS COM ARMADURA DE FRP**

De acordo com Wang *et al.* (2023), é essencial avaliar a durabilidade de barras de GFRP, mas é mais significativo explorar a durabilidade de elementos estruturais reforçados com barras de GFRP para aplicações de engenharia. Estruturas de concreto geralmente apresentam microfissuras em serviço devido às características dos materiais de concreto e ao efeito de outros fatores adversos, tais como construção deficiente e sobrecarga (He, Dai, Yang, 2017). As microfissuras no concreto criam concentrações de tensão quando as vigas são submetidas a flexão, acelerando o surgimento e a propagação de microfissuras (He, Yang, Bakis, 2013; Robert, Benmokrane, 2013). Essas microfissuras fornecem canais adicionais para que agentes agressivos presentes no ambiente externo atinjam as barras de GFRP, afetando negativamente sua durabilidade. Segundo Park, Kim e Lee (2014), os dados a respeito do impacto da degradação das barras de GFRP no comportamento de elementos de concreto é limitada.

Almusallam e Al-Salloum (2006) avaliaram a durabilidade de barras de GFRP com diâmetro de 10 mm utilizadas como armadura em vigas de concreto, as quais foram submetidas à imersão contínua em água (T1), à imersão contínua em água do mar (T2) e ciclos de molhagem e secagem, a cada 2 semanas, em água do mar (T3), todas à 40 °C. Assim, após 4, 8 e 16 meses de exposição a cada ambiente, as barras de GFRP foram removidas do interior das vigas e foram submetidas à ensaios de tração uniaxial. Em relação às amostras de referência, após 4, 8 e 16 meses de exposição os autores observaram reduções da resistência à tração de 4,9 %, 13,1 % e 16,3 %, respectivamente, para as amostras mantidas no ambiente T1, reduções de 2,1 %, 15,6 % e 19,7 %, respectivamente, para as amostras mantidas no ambiente T2 e reduções de 10,3 %, 17,0 % e 21,8 %, respectivamente, para as amostras mantidas no ambiente T3. Adicionalmente, vigas com armadura de GFRP mantidas nos ambientes T1, T2 e T3 foram submetidas a ensaio de flexão

em 4 pontos após 8 meses de exposição, sendo obtidas as curvas de força *versus* deslocamento apresentadas na Figura 22. Os autores observaram reduções na força última e no deslocamento, em relação à referência, iguais a 12,5 % e 31,6 %, respectivamente, para o ambiente T1, iguais a 26,4 % e 32,9 %, respectivamente, para o ambiente T2, e iguais a 20,8 % e 22,4 %, respectivamente, para o ambiente T3. Observa-se que o ambiente T3 foi mais agressivo para as barras de GFRP, enquanto o ambiente T2 foi mais agressivo para as vigas com armadura de GFRP.

**Figura 22: Curvas de força *versus* deslocamento das vigas com armadura de GFRP após 8 meses de exposição aos ambientes T1, T2 e T3**

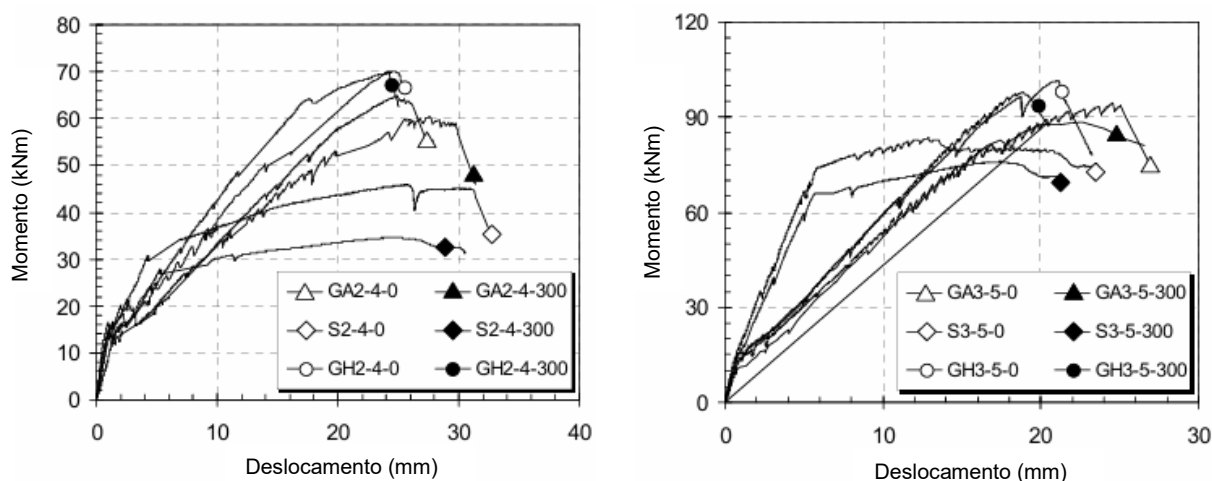


Fonte: Adaptado de Almusallam e Al-Salloum (2006)

Park, Kim e Lee (2014) submeteram vigas de concreto armadas com barras de aço e de GFRP a ambiente agressivo durante 300 dias, variando o tipo de armadura longitudinal positiva (dois tipos de GFRP, denominados A e H, e aço) e a taxa de armadura, e posteriormente a ensaios de flexão em 4 pontos. Todas as vigas foram submetidas a pré-fissuração com aplicação de 30 % da capacidade resistente, visando simular condições de serviço com deflexão igual a  $L/240$ . Após a pré-fissuração, as vigas foram inseridas em solução salina com concentração de 3 % durante 72 horas e posteriormente mantidas em uma câmara com temperatura de 47 °C e umidade de 80 % durante 300 dias, sendo constantemente submetidas ao esforço aplicado na pré-fissuração ao longo do tempo de exposição. A Figura 23 apresenta as curvas momento *versus* deslocamento das vigas, sendo a designação G referente às vigas com armadura de GFRP e S com armadura de aço, 2-4

referente à utilização de armadura longitudinal positiva composta de 2 barras com diâmetro #4 (13 mm para GFRP e 12,7 mm para o aço), 3-5 referente à utilização de armadura longitudinal positiva composta de 3 barras com diâmetro #5 (16 mm para GFRP e 15,9 mm para aço), 0 referente às vigas de referência e 300 referente às vigas condicionadas.

**Figura 23: Curvas de momento versus deslocamento das vigas ensaiadas por Park, Kim e Lee (2014)**



Fonte: Adaptado de Park, Kim e Lee (2014)

Na Figura 23 é possível observar que as vigas com armadura de GFRP apresentaram comportamento aproximadamente elástico linear até a ruptura, enquanto as vigas com armadura de aço apresentaram escoamento antes do esmagamento do concreto. Nota-se que as vigas com armadura de GFRP apresentaram maior capacidade resistente do que as vigas com armadura de aço e que maiores deslocamentos foram obtidos para as vigas com menores taxas de armadura. Em geral, todas as vigas apresentaram uma redução da capacidade resistente após o envelhecimento acelerado, tanto com armadura de aço quanto de GFRP. As vigas GA2-4, GH2-4 e S2-4 sofreram reduções de aproximadamente 9,1 %, 0,5 % e 21,7 % na capacidade resistente, respectivamente, enquanto as vigas GA3-5, GH3-5 e S3-5 sofreram reduções de aproximadamente 9,3 %, 4,6 % e 10,3 %, respectivamente. Nesse caso, a substituição da armadura de aço por GFRP foi benéfica para aumentar a durabilidade das vigas.

Alkhraisha e Abed (2023) avaliaram a exposição de barras de FRP a condições locais de clima quente e úmido, tal qual o clima dos Emirados Árabes Unidos. Para isso, barras de GFRP com diâmetros de 10 e 20 mm foram mantidas ao ar livre durante 28 meses, ao longo dos quais a temperatura e a umidade do ambiente variaram entre 20 e 40 °C e 50 e 60 %, respectivamente. Segundo os autores, esse tipo de exposição foi utilizado para simular condições de canteiro, nas quais as barras podem ficar em espera por grandes períodos e

armazenadas de maneira incorreta, expostas diretamente ao ambiente externo. Posteriormente, Alkhraisha e Abed (2023) utilizaram as barras expostas para produzir vigas de concreto com largura de 180 mm, altura de 230 mm e comprimento de 2200 mm. Assim, foram produzidas quatro vigas, sendo duas com armadura composta por duas barras de GFRP com diâmetro de 10 mm e duas com armadura composta por duas barras de GFRP com diâmetro de 20 mm. Após a produção, as vigas foram submetidas a ensaio de flexão em 4 pontos e a capacidade resistente expectável foi obtida por meio das disposições do ACI 440.1R (2015). Os autores concluíram que as disposições do ACI 440.1R (2015) previram com precisão os modos de ruptura, os quais foram baseados em ruptura balanceada ou esmagamento do concreto, bem como a capacidade resistente. A razão entre a capacidade resistente experimental e a previsão obtida por meio do ACI 440.1R (2015) foi próxima de 1 para todas as vigas ensaiadas, levando à conclusão de que o comportamento à flexão das vigas não foi afetado significativamente pela exposição das barras de GFRP.

De acordo com Chen *et al.* (2022), com base em um modelo de previsão da capacidade resistente a longo prazo, vigas de concreto SWSSC armadas com GFRP apresentam capacidade resistente residual média de 69 % e 63 % após 50 e 100 anos, respectivamente, de exposição à ambiente marinho.

### **2.3.3 PROTOCOLO DE ACONDICIONAMENTO ACELERADO**

Segundo o ACI 440.9R (2015), as vulnerabilidades relacionadas à durabilidade do FRP podem ser determinadas por meio da aplicação de protocolos de acondicionamento acelerado (*Accelerated Conditioning Protocols – ACPs*) combinados a ensaios para a caracterização das propriedades mecânicas do material. O ACI 440.9R (2015) indica que os ACPs foram elaborados para possibilitar a caracterização da durabilidade dos FRPs pelos fabricantes e para incentivar sua utilização por pesquisadores e laboratórios, viabilizando a construção de um banco de dados significativo. Tal norma menciona que esse banco de dados, gerado pela obtenção de resultados consistentes, pode contribuir para o refinamento dos fatores de redução ambiental, tais como o  $C_E$  encontrado no ACI 440.1R (2015) e ACI 440.11 (2022).

A determinação do período necessário para que mudanças nas propriedades mecânicas do FRP sejam observadas é uma das dificuldades inerentes aos ensaios de durabilidade. A abordagem ideal para garantir a durabilidade do FRP durante a vida útil da estrutura seria seu monitoramento, no ambiente em que está inserida, durante um período especificado. Tendo em vista que esta abordagem comumente não é seguida, os ensaios de durabilidade podem ser realizados de maneira acelerada, com um tempo de exposição razoável e prático (ACI 440.9R, 2015). Desta forma, durante a aplicação dos ACPs, o FRP é envelhecido aplicando-se um fator acelerador (neste caso, a temperatura), de acordo com a Lei de Arrhenius.

De acordo com Wu *et al.* (2023), quando a temperatura do ambiente excede 60 °C, a taxa de degradação das barras de FRP aumenta significativamente, com decréscimo acentuado na resistência do compósito quando esta temperatura se aproxima da  $T_g$  da matriz (Wang, Wong, Kodur, 2007). Assim, a temperatura elevada do ambiente acelera, principalmente, a degradação da matriz polimérica, sendo este efeito de degradação acelerada muito relacionado ao ponto de fusão da matriz (Micelli, Nanni, 2004; Ceroni *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2008).

Na maior parte dos estudos de durabilidade de barras de FRP, a condição de temperatura é considerada um parâmetro importante para acelerar o processo de degradação. A pesquisa de Dejke e Tepfers (2001) mostrou que a degradação após 3, 18, 36, 92 e 193 dias em ambiente alcalino a 60 °C pode corresponder a 1, 5, 10, 25 e 50 anos no ambiente natural.

Segundo Li *et al.* (2022), estudiosos usualmente expõe barras de FRP a diferentes ambientes para ensaios de envelhecimento acelerado para analisar sua degradação a longo prazo. Assim, soluções alcalinas, soluções salinas e soluções neutras são comumente utilizadas para simular a solução alcalina presente nos poros do concreto, o ambiente de água do mar e de água doce, respectivamente. A durabilidade das barras de FRP em condições de congelamento-degelo e ciclos de molhagem e secagem também são investigadas para estimar a influência do ambiente em elementos de concreto com este tipo de armadura.

A temperatura da solução utilizada nos ensaios de envelhecimento acelerado influencia diretamente nos resultados de retenção da resistência à tração de barras de FRP. Kim *et al.* (2008) submeteu barras de GFRP à solução alcalina, com pH igual 13 e temperaturas de 25 °C e 80 °C. Após 75 dias de imersão, a retenção da resistência à tração das barras de GFRP foi obtida igual de 84,7 % para a solução mantida a 25 °C e igual a 49,3 % para a solução mantida a 80 °C.

O ACI 440.9R (2015) trata a durabilidade como uma medida da retenção das propriedades físicas e mecânicas do FRP quando expostos aos ambientes propostos. Assim, esta norma apresenta procedimentos para a fabricação das amostras, protocolos de acondicionamento acelerado, ensaios mecânicos e procedimentos para que as propriedades residuais das amostras de FRP sejam determinadas. Os ACPs do ACI 440.9R (2015) consistem em uma descrição do ambiente e das tensões que devem ser impostas às amostras de FRP que serão expostas, conforme apresentado a seguir.

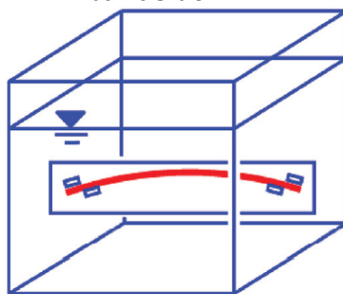
- *Standard laboratory conditions* (Condições laboratoriais padrão) – temperatura padrão de  $23 \pm 3$  °C e umidade relativa padrão de  $50 \pm 10$  %;
- *ACP continuous immersion in water* (Imersão contínua em água) – imersão contínua em água potável a uma temperatura de  $50 \pm 3$  °C;

- *ACP continuous exposure to humidity* (Exposição contínua à umidade) – exposição contínua a uma umidade relativa igual a 100 % a uma temperatura de  $60 \pm 3$  °C; e
- *ACP continuous immersion in alkaline solution* (Imersão contínua em solução alcalina) – imersão contínua em solução alcalina, preparada de acordo com as recomendações da ASTM D7705/D7705M (2019), a uma temperatura de  $60 \pm 3$  °C. A solução alcalina deve ser mantida coberta antes e durante o ensaio para prevenir sua interação com o CO<sub>2</sub> atmosférico e a evaporação. O pH da solução deve ser checado ao final do acondicionamento.

De acordo com o ACI 440.9R (2015), o mecanismo de degradação primário das barras de FRP é o efeito da alcalinidade e da umidade na resina. Assim, são apresentados quatro métodos de ensaio que podem ser utilizados para determinar os efeitos do ambiente nas propriedades mecânicas das amostras de FRP, os quais podem ser realizados individualmente ou combinados. Dentre estes quatro procedimentos, três são detalhados no ASTM D7705/D7705M (2019), sendo: i) acondicionamento sem imposição de tensão seguido de ensaio de tração, ii) acondicionamento com imposição de tensão seguido de ensaio de tração, e iii) acondicionamento com imposição de tensão no interior do concreto seguido de ensaio de tração.

O quarto procedimento, o qual é definido no ACI 440.9R (2015), consiste na indução de flexão em barras de FRP durante o acondicionamento. Assim, amostras de barra de FRP são mantidas presas em um gabarito curvado, sendo, assim, mantidas flexionadas, e posteriormente são submetidas a um protocolo de acondicionamento acelerado de imersão em solução alcalina durante 3000 horas (Figura 24). A norma ainda recomenda que sejam também ensaiadas amostras de referência, as quais devem ser mantidas sob o protocolo de acondicionamento acelerado de exposição a condições laboratoriais padrão, de forma a se compararem as propriedades mecânicas obtidas após ensaios de tração, os quais devem ser realizados de acordo com as prescrições da ASTM D7205/D7205M (2016).

**Figura 24: Protocolo de acondicionamento acelerado proposto pelo ACI 440.9R (2015) para barras de FRP**



Fonte: ACI 440.9R (2015)

Com relação aos períodos de exposição, o ACI 440.9R (2015) cita o AC125 (2012), o qual também recomenda protocolos de acondicionamento, ensaios mecânicos e limites de retenção da resistência à umidade, água salgada, alcalinidade, raios ultravioleta e gelo e degelo para amostras reforçadas externamente com mantas de FRP, além de também sugerir a utilização de temperaturas elevadas em conjunto com a umidade ou soluções químicas para a aceleração da degradação. Os procedimentos do AC125 (2012) são recomendados para serem aplicados ao longo de períodos entre 1000 e 10000 horas.

O CAN CSA S806 (2012) recomenda que a durabilidade do FRP seja avaliada com base em ensaios para alguns tipos de ambiente, tal como apresentado na Tabela 17.

**Tabela 17: Ensaios de durabilidade de FRP**

Ambiente considerado para ensaio de durabilidade	Condições de ensaio	Duração do ensaio
Resistência à água	100% de umidade e temperatura de $38 \pm 1$ °C	1000, 3000 e 10000 horas
Resistência à solução salina	Imersão em solução salina com temperatura de $23 \pm 1$ °C	1000, 3000 e 10000 horas
Resistência à alcalinidade	Imersão em solução de CaCO <sub>3</sub> com pH = 9,5 e temperatura de $23 \pm 1,5$ °C	1000 e 3000 horas
Resistência ao calor	Temperatura de $60 \pm 3$ °C	1000 e 3000 horas

Fonte: Adaptado de FIB *Bulletin* 40 (2007)

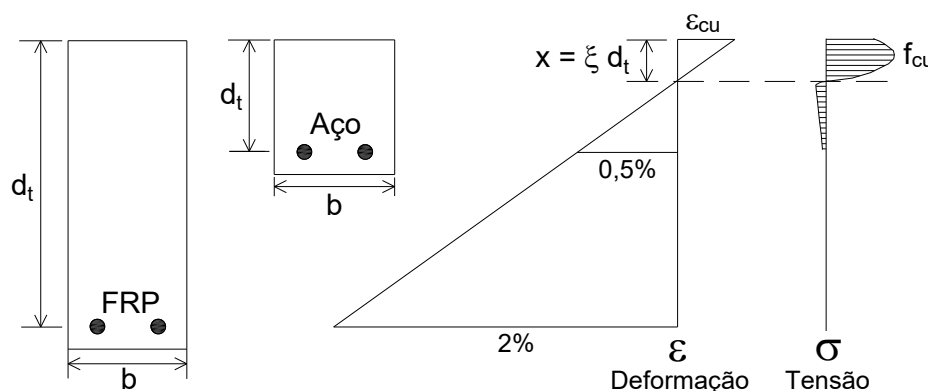
## 2.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS COM ARMADURA DE FRP

Uma preocupação no projeto de elementos de concreto com armadura de GFRP é a ductilidade, uma vez que esse material apresenta comportamento elástico linear até a falha, sem deformação plástica proeminente ou considerável absorção de energia (ACI 440.1R, 2015; Solyom, Balázs, 2018). De forma geral, no projeto de estruturas de concreto armado, quando a resistência à tração da armadura é completamente utilizada a seção é considerada subarmada. A efetividade da armadura longitudinal é reduzida quando a seção transversal se torna superarmada, ou seja, a resistência à tração da armadura não é mobilizada em sua totalidade e o concreto rompe à compressão. Em seções denominadas balanceadas, a resistência à tração da armadura e a resistência à compressão do concreto são atingidas simultaneamente. No caso de estruturas de concreto com armadura de aço convencional, normalmente o dimensionamento é realizado visando o escoamento da armadura antes do esmagamento do concreto (FIB *Bulletin* 40, 2007).

Em estruturas convencionais de concreto com armadura de aço, a razão resistência/rigidez da armadura é similar à do concreto e, desta forma, a profundidade da linha neutra de uma seção retangular balanceada se encontra próxima à metade da altura da seção. No caso da utilização de armadura de FRP, dependendo do tipo de fibra utilizada, a razão resistência/rigidez da armadura é uma ordem de grandeza maior que a do concreto, e, conseqüentemente, a profundidade da linha neutra de uma seção retangular balanceada é

próxima à superfície comprimida, tal como apresentado na Figura 25. Isto implica no fato de que, em elementos com armadura de FRP, quando se utiliza toda a resistência à tração da armadura, a maior parte da seção transversal estará submetida a deformações de tração. Assim, maiores deflexões são esperadas nestes elementos (FIB *Bulletin* 40, 2007). Um estudo conduzido por Habeeb e Ashour (2008) avaliou o comportamento à flexão de vigas contínuas de concreto armado com barras de GFRP, com foco na variação da taxa de armadura. Nesse sentido, foram ensaiadas três vigas contínuas e duas vigas simplesmente apoiadas. De acordo com as taxas de armadura, as vigas foram tanto subarmadas quanto superarmadas. O estudo concluiu que, em comparação com as vigas subarmadas, a carga que causou o início de fissuração foi maior nas vigas superarmadas. Além disso, os autores observaram que as vigas com armadura de GFRP fissuraram mais cedo e mais amplamente do que vigas reforçadas com armadura de aço.

**Figura 25: Distribuição de deformações para uma seção de concreto armado com barras de FRP**

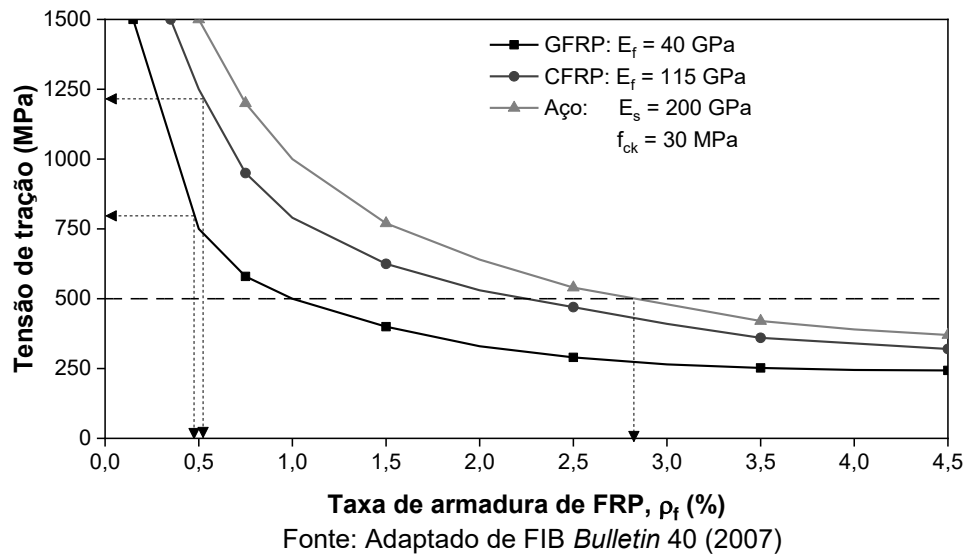


Fonte: Adaptado de Pilakoutas *et al.* (2002)

Segundo o FIB *Bulletin* 40 (2007), os modos de falha de uma seção de concreto armado com barras de FRP são o esmagamento do concreto comprimido ou a ruptura da armadura tracionada. Para prever o modo de falha de seções de concreto armado é necessário examinar as tensões instaladas na armadura e no concreto. A Figura 26 apresenta a variação de tensões na armadura de FRP em função da taxa de armadura ( $\rho_f$ ). Para esta seção utilizada para produzir os resultados apresentados na Figura 26, é possível observar que a seção com armadura de aço se torna “superarmada” para taxa de armadura por volta de 3%, sendo que abaixo deste valor a seção é “subarmada” e o aço está escoando. No caso das armaduras de GFRP e CFRP, ambas são “superarmadas” até a taxa de 0,5%, para esta seção analisada, passando a ser “subarmada” para taxas inferiores à 0,5%, nas quais se observa a ruptura da barra, dependendo da resistência à tração do FRP utilizado. Ainda é possível observar na Figura 26 que à medida em que a taxa de armadura aumenta, a tensão instalada nas barras de GFRP diminui, como esperado. Quando estas tensões reduzem à valores

abaixo da resistência do aço, maiores áreas de armadura são necessárias para resistir ao mesmo momento aplicado na seção, e o aumento da área de armadura leva tanto a maiores custos, gerando elementos menos econômicos, quanto ao fato do fator de segurança parcial relacionado à armadura de FRP se tornar irrelevante, uma vez que sua resistência à tração de projeto não é atingida.

**Figura 26: Exemplo de tensões na armadura para o esmagamento do concreto versus taxa de armadura longitudinal**



É universalmente aceito que seções de concreto “superarmadas” com barras de FRP serão inevitáveis na maioria das aplicações estruturais, o que impacta na ductilidade dos elementos, uma vez que o concreto não confinado rompe de maneira abrupta (FIB *Bulletin* 40, 2007). Para minimizar este problema, outras fontes de ductilidade podem ser utilizadas, tais como o uso de barras híbridas de FRP ou a combinação de barras de FRP com diferentes características, as quais falharão com diferentes deformações promovendo uma pseudo-ductilidade, a adição de barras de sacrifício, as quais não levam ao colapso do elemento caso se rompam ou a utilização de armadura combinada de aço e de FRP, sendo o FRP localizado próximo à superfície do concreto e o aço em uma camada mais interior. Segundo a Prática Recomendada CT 303 (2021), apesar de ser similar ao dimensionamento de estruturas de concreto com armadura de aço, o dimensionamento de estruturas de concreto com armadura de FRP deve ser feito cuidadosamente, uma vez que o comportamento das barras de FRP é frágil. Abdelkarim *et al.* (2019) mencionam que, uma vez que barras de FRP não apresentam escoamento e rompem repentinamente, muitos códigos e normas indicam que vigas armadas com FRP devem ser projetadas para ser superarmadas, isto é, com ruptura pelo esmagamento do concreto comprimido em vez da ruptura da barra por tração. Esse conceito de projeto visa permitir que a viga tenha mais tempo para se deformar, sinalizando a necessidade de reparo antes que as barras de FRP rompam de forma catastrófica. Além

disso, vigas superarmadas com FRP apresentam menores deformações e menores aberturas de fissuras em serviço quando comparadas a vigas subarmadas, tendo em vista a maior rigidez e menor tensão nas barras de FRP (Vijay, GangaRao, 2001).

## 2.5 MODELOS DE DIMENSIONAMENTO

O comportamento das barras de FRP é diferente das barras de aço convencionais, portanto, a utilização de armadura de FRP altera o comportamento do elemento estrutural, sendo necessário que os procedimentos de dimensionamento sejam adaptados para este tipo de material. Em geral, as normas para dimensionamento de estruturas com barras de FRP de cada país são baseadas em seus respectivos procedimentos para dimensionamento de estruturas com armadura de aço, sendo feitas adaptações para representar o comportamento do FRP.

Quando comparada à utilização do aço carbono como armadura em estruturas de concreto, a utilização de FRP ainda não é comum. Desta forma, os procedimentos de dimensionamento definidos mundialmente ainda serão muito discutidos e modificados, como no caso das normas de dimensionamento de estruturas de concreto armado com barras de aço, as quais são atualizadas com certa frequência.

No Brasil, por meio de uma parceria ABECE/IBRACON, foi lançada a Prática Recomendada CT 303 (2021) para projeto de estruturas de concreto com armadura de FRP. Mais recentemente foram lançadas as primeiras normas técnicas no âmbito da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) a respeito da caracterização e da utilização de armaduras de FRP para projetos de estruturas de concreto, a ABNT NBR 17201 (2025) e a ABNT NBR 17196 (2025), respectivamente. Portanto, os procedimentos ainda estão começando a ser aplicados e devem ser atualizados ao longo do tempo.

No exterior, diversos países possuem normas para o projeto de estruturas de concreto com armadura de FRP. Neste trabalho, são apresentados os procedimentos americanos - ACI 440.11 (2022); europeus - FIB *Bulletin* 40 (2007); russos - SP 295.1325800 (2017); e canadenses - CAN CSA S806 (2012), além dos procedimentos brasileiros – ABNT NBR 17196 (2025), voltados ao dimensionamento de vigas de concreto armado com barras de GFRP submetidas à flexão.

Diferentemente dos elementos de concreto com armadura de aço, para os quais o dimensionamento é realizado de forma a se obter o escoamento da barra, os elementos com armadura de GFRP são dimensionados visando ao esmagamento do concreto comprimido. Essa diferença de abordagem se justifica pelo fato das barras de GFRP não apresentarem patamar de escoamento, exibindo comportamento elástico linear até a ruptura, que ocorre de forma frágil. Por esse motivo, a definição convencional de ductilidade não pode ser aplicada a vigas de concreto com armadura de GFRP (Park, Kim, Lee, 2014). Assim, o esmagamento

do concreto torna-se desejável, uma vez o desenvolvimento do comportamento plástico do concreto antes da ruptura confere certa ductilidade.

De forma geral, algumas hipóteses básicas são levadas em conta para a simplificação do fenômeno real que ocorre em elementos armados com FRP:

- Seções planas permanecem planas após a deformação do elemento;
- A resistência à tração do concreto é desprezada;
- O comportamento das barras de FRP é elástico linear até a ruptura;
- Barras de FRP localizadas na zona comprimida de uma seção transversal de concreto devem ter resistência à compressão e rigidez consideradas igual a zero;
- A aderência entre o concreto e as barras de FRP é perfeita.

Todos os procedimentos normativos aqui apresentados utilizam a filosofia de dimensionamento baseada nos Estados Limites. Em geral, o Estado Limite de Serviço (ELS) é o condicionante do dimensionamento de uma estrutura armada com barras de FRP, uma vez que maiores aberturas de fissuras e deformações são observadas devido ao menor módulo de elasticidade do material, principalmente do GFRP, em comparação ao do aço (Baena *et al.*, 2009; Camacho, 2011; El-Nemr *et al.*, 2016; Abdelkarim *et al.*, 2019; Benzecry *et al.*, 2021). Vijay e GangaRao (2001) afirmam que, no estágio de serviço, as vigas superarmadas apresentam deflexões menores do que as vigas subarmadas devido ao aumento da rigidez e a redução das deformações, fato comprovado por Chen *et al.* (2022). Tais autores observaram que o aumento da taxa de armadura longitudinal melhora a capacidade resistente e a rigidez pós-fissuração de vigas de concreto com armadura de GFRP. Segundo Vijay e GangaRao (2001), as vigas de concreto com armadura de GFRP devem apresentar taxa de armadura superior a 1,4 vezes a taxa de armadura para a qual ocorreria a ruptura balanceada (ruptura da armadura e esmagamento do concreto, simultaneamente) para que os requisitos do Estado Limite de Serviço sejam atendidos. Ainda assim, o dimensionamento deste tipo de estrutura é baseado no Estado Limite Último (ELU), de forma semelhante ao método empregado para estruturas de concreto armado com barras de aço (Tavares, 2006).

### **2.5.1 ACI 440.11 (2022)**

A norma ACI 440.11 (2022) se aplica exclusivamente a barras de GFRP utilizadas como armadura em elementos de concreto. Outros tipos de FRP não são contemplados por esta norma, e, para esses casos, deve-se consultar o ACI 440.1R (2015), que apresenta diretrizes para diferentes tipos de FRP.

Com base no ELU, para garantir a segurança contra a ruína, é necessário que as solicitações impostas não sejam superiores à resistência do elemento, conforme apresentado na Equação 12.

$$\phi \cdot M_n \geq M_u \quad (12)$$

Na Equação 12,  $M_u$  é o momento solicitante obtido pela majoração das ações atuantes por fatores probabilísticos definidos no ACI 318 (2019),  $M_n$  é o momento resistente nominal e  $\phi$  é o fator de redução da resistência. O momento resistente nominal deve ser determinado com base na compatibilidade de deformações, na qual a deformação em cada camada de barras de GFRP deve ser considerada separadamente, no equilíbrio de forças internas e no tipo de ruptura que governa o comportamento do elemento, o qual pode ser baseado no esmagamento do concreto ou na ruptura da barra de GFRP.

A determinação do tipo de ruína que governa o comportamento do elemento é realizada pela comparação entre a taxa de armadura de FRP ( $\rho_f$ ) e a taxa de armadura balanceada ( $\rho_{fb}$ ). A taxa de armadura de GFRP está relacionada à área de armadura longitudinal efetivamente disposta na seção transversal e pode ser calculada pela Equação 13, na qual  $A_f$  é a área de armadura de GFRP,  $b$  é a largura da seção transversal e  $d$  é a altura útil da seção transversal, medida a partir da extremidade comprimida. A taxa de armadura balanceada é uma taxa de armadura fictícia para a qual ocorreriam, simultaneamente, a ruptura da barra de GFRP e o esmagamento do concreto, e pode ser calculada pela Equação 14. Na Equação 14,  $f'_c$  é a resistência à compressão do concreto,  $f_{fu}$  é a resistência à tração de projeto das barras de GFRP,  $E_f$  é o módulo de elasticidade da barra de GFRP fornecido pelo fabricante e  $\varepsilon_{cu}$  é a deformação máxima de ruptura do concreto. O ACI 440.11 (2022) adota o valor de 3 ‰ para  $\varepsilon_{cu}$ . O fator de redução  $\beta_1$  deve ser tomado igual a 0,85 para  $20,7 \leq f'_c \leq 27,6$  MPa, calculado por meio da Equação 15 para  $27,6 < f'_c \leq 55,2$  MPa e igual a 0,65 para  $f'_c > 55,2$  MPa.

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d} \quad (13)$$

$$\rho_{fb} = 0,85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_{fu}} \cdot \frac{E_f \cdot \varepsilon_{cu}}{E_f \cdot \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (14)$$

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \cdot \frac{(f'_c - 27,6)}{6,9} \quad (15)$$

A propriedades mecânicas das barras de GFRP normalmente são fornecidas pelo fabricante ou podem ser determinadas por ensaios de tração realizados em laboratório. Entretanto, a resistência à tração da barra deve ser considerada como um valor inicial, sem levar em conta os efeitos da exposição ambiental de longo prazo. O ACI 440.11 (2022) estabelece um fator de redução ambiental ( $C_E$ ) que deve ser aplicado à resistência à tração inicial para a obtenção do valor efetivo a ser utilizado no projeto. De acordo com a norma, esse fator deve ser adotado igual a 0,85, tanto para estruturas de concreto em contato com o

solo ou expostas às intempéries quanto para aquelas localizadas em ambientes internos. Assim, a resistência à tração de projeto da barra de GFRP ( $f_{fu}$ ) pode ser calculada pela Equação 16, na qual  $f_{fu}^*$  é a resistência à tração dada pelo fabricante ou obtida experimentalmente. No caso de ser obtida experimentalmente, deve ser utilizada a Equação 17, sendo  $f_{fu,ave}$  valor médio da resistência à tração e  $\sigma$  o desvio padrão. A deformação de ruptura de projeto ( $\varepsilon_{fu}$ ) deve ser determinada por meio da divisão entre  $f_{fu}$  e  $E_f$ .

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^* \quad (16)$$

$$f_{fu}^* = f_{fu,ave} - 3 \cdot \sigma \quad (17)$$

O ACI 440.11 (2022) apresenta dois casos possíveis para a ruína do elemento estrutural, sendo o esmagamento do concreto ou ruptura da barra de GFRP. A ruptura balanceada é considerada como uma condição de transição na qual ocorreriam simultaneamente a ruptura da barra de GFRP e esmagamento do concreto. Assim, se  $\rho_f \leq \rho_{fb}$ , a ruína do elemento é baseada na ruptura da barra de GFRP e se  $\rho_f > \rho_{fb}$  a ruína é baseada no esmagamento do concreto. O fator de redução da resistência ( $\phi$ ) utilizado na Equação 12 pode ser determinado pela Equação 18.

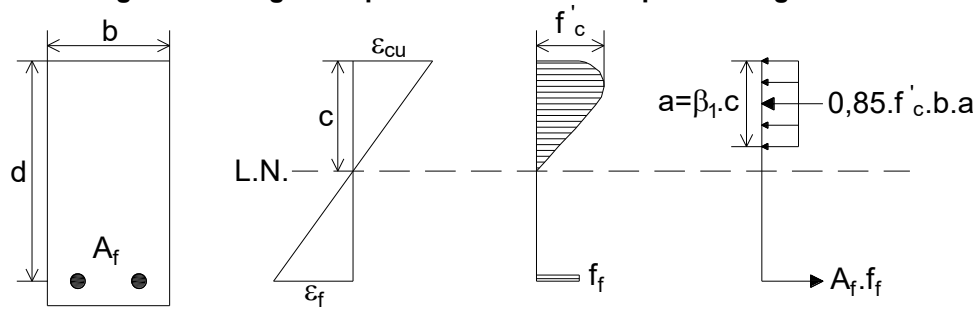
$$\phi = \begin{cases} 0,55 & \text{se } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0,3 + 0,25 \cdot \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} & \text{se } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4 \cdot \rho_{fb} \\ 0,65 & \text{se } \rho_f \geq 1,4 \cdot \rho_{fb} \end{cases} \quad (18)$$

### 2.5.1.1 Ruína governada pelo esmagamento do concreto

Quando a ruína é governada pelo esmagamento do concreto ( $\rho_f > \rho_{fb}$ ), o ACI 440.11 (2022), com base no ACI 440.1R (2015), permite que o diagrama de tensões no concreto seja aproximado para a forma retangular, conforme apresenta a Figura 27. Nesse caso, a barra de GFRP não atinge seu potencial máximo e a tensão de tração na camada mais externa de GFRP ( $f_f$ ) será menor do que  $f_{fu}$ .

O momento resistente nominal pode ser calculado por meio de equações de equilíbrio e compatibilidade de deformações. Dessa forma, a altura do diagrama retangular equivalente de tensões no concreto ( $a$ ) pode ser determinado pela Equação 19. Sabendo-se que um momento pode ser calculado multiplicando-se uma força por um braço de alavanca, o momento resistente nominal ( $M_n$ ) pode ser calculado pela Equação 20. A tensão na armadura de GFRP pode ser calculada por meio da Equação 21, obtida com o uso da Lei de Hooke e compatibilidade de deformações.

**Figura 27: Diagrama retangular equivalente de tensões para esmagamento do concreto**



Fonte: Adaptado de ACI 440.11 (2022)

$$a = \frac{A_f \cdot f_f}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \quad (19)$$

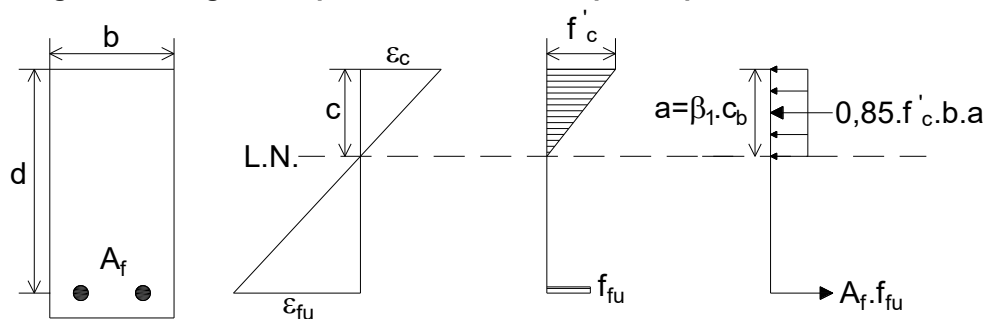
$$M_n = A_f \cdot f_f \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (20)$$

$$f_f = \left( \sqrt{\frac{(E_f \cdot \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f'_c}{\rho_f} \cdot E_f \cdot \varepsilon_{cu}} - 0,5 \cdot E_f \cdot \varepsilon_{cu} \right) \leq f_{fu} \quad (21)$$

### 2.5.1.2 Ruína governada pela ruptura da barra de GFRP

Quando  $\rho_f \leq \rho_{fb}$ , a ruína é governada pela ruptura da barra de GFRP e o diagrama de tensões no concreto não pode ser aproximado para forma retangular equivalente, uma vez que este não atinge sua deformação máxima de ruptura. Nesse caso, a barra de GFRP atinge seu potencial máximo e a tensão de tração na camada mais externa de GFRP é igual a  $f_{fu}$ . Assim, pode ser utilizado um diagrama equivalente que apresenta como incógnitas a deformação no concreto quando o GFRP rompe à tração ( $\varepsilon_c$ ) e a profundidade da linha neutra ( $c$ ), tal como apresentado na Figura 28.

**Figura 28: Diagrama equivalente de tensões para ruptura da barra de FRP**



Fonte: Adaptado de ACI 440.11 (2022)

Tendo em vista que a análise do diagrama envolvendo todas as variáveis é bastante complexa uma vez que a deformação no concreto é desconhecida, o ACI 440.11 (2022) permite uma simplificação. Para uma dada seção, o produto  $\beta_1 \cdot c$  varia dependendo das

propriedades e da taxa de armadura de GFRP, atingindo valor máximo igual a  $\beta_1 \cdot c_b$  quando a deformação máxima de 3 ‰ no concreto é atingida. Assim, a profundidade de linha neutra considerada ( $c_b$ ) e o momento resistente nominal ( $M_n$ ) podem ser obtidos pelas Equações 22 e 23.

$$c_b = \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) \cdot d \quad (22)$$

$$M_n = A_f \cdot f_{fu} \cdot \left( d - \frac{\beta_1 \cdot c_b}{2} \right) \quad (23)$$

### 2.5.2 CAN CSA S806 (2012)

Para garantir a segurança, a resistência de elementos de concreto com armadura de FRP minorada por fatores de segurança deve ser igual ou maior do que as solicitações impostas majoradas em combinações de ações apresentadas na Parte 4 do Código Nacional de Construção do Canadá (*National Building Code of Canada*, 2015). Desta forma, o CAN CSA S806 (2012) recomenda que a resistência à compressão de projeto do concreto ( $f'_{c,f}$ ) seja calculada pela Equação 24, na qual  $\phi_c$  é o fator de redução da resistência do concreto, tomado igual a 0,65, e  $f'_c$  é a resistência característica à compressão do concreto.

$$f'_{c,f} = \phi_c \cdot f'_c \quad (24)$$

A resistência característica à tração das barras de FRP ( $f_{fu}$ ) deve ser fornecida pelo fabricante ou calculada pela Equação 25, na qual  $f_{fu,m}$  é a resistência à tração média obtida em laboratório e  $\sigma$  é o desvio padrão. Por meio da Equação 26 pode ser determinada a resistência à tração de projeto das barras de FRP ( $f_{fu,f}$ ), sendo  $\phi_f$  o fator de redução da resistência do FRP, tomado igual a 0,75. Analogamente, a deformação à tração de ruptura do FRP ( $\varepsilon_{fu}$ ) pode ser fornecida pelo fabricante ou calculada pela Equação 27, na qual  $\varepsilon_{fu,m}$  é a deformação à tração média de ruptura do FRP obtida experimentalmente e  $\sigma$  o desvio padrão. O CAN CSA S806 (2012) recomenda que  $\varepsilon_{fu}$  não seja inferior à 1,2 ‰. O módulo de elasticidade das barras de FRP ( $E_f$ ) pode também ser fornecido pelo fabricante ou determinado experimentalmente conforme o procedimento detalhado no Anexo C do CAN CSA S806 (2012).

$$f_{fu} = f_{fu,m} - 3 \cdot \sigma \quad (25)$$

$$f_{fu,f} = \phi_f \cdot f_{fu} \quad (26)$$

$$\varepsilon_{fu} = \varepsilon_{fu,m} - 3 \cdot \sigma \quad (27)$$

Segundo o CAN CSA S806 (2012), a não ser que a resistência minorada da seção transversal seja 1,6 vezes maior que as solicitações impostas, elementos de concreto com armadura de FRP devem ser dimensionados de forma a se obter ruína pelo esmagamento do concreto na região comprimida. Assim, para que a deformação última de compressão no concreto seja considerada igual a 3,5 ‰, a condição apresentada na Equação 28 deve ser obedecida, na qual  $c$  é a profundidade da linha neutra e  $d$  é a altura útil, medida a partir da extremidade comprimida até o centro de gravidade de armadura tracionada.

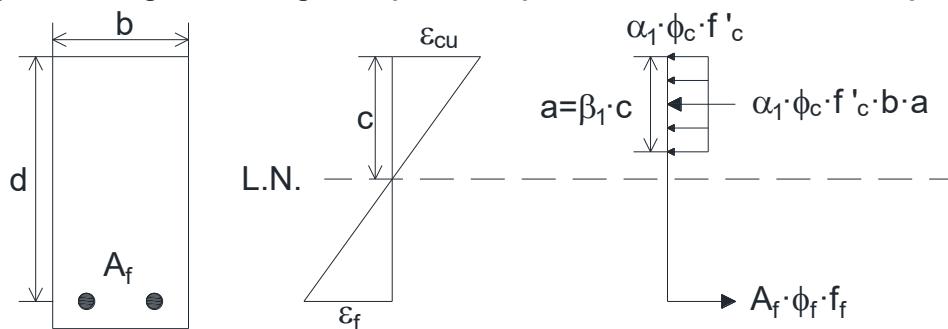
$$\left(\frac{c}{d}\right) \geq \frac{7}{7 + 2000 \cdot \varepsilon_{fu}} \quad (28)$$

Se a condição apresentada na Equação 28 for satisfeita, a distribuição de tensões no concreto comprimido pode ser aproximada para a forma retangular equivalente, tal como apresentado na Figura 29, sendo os fatores  $\alpha_1$  e  $\beta_1$  calculados pelas Equações 29 e 30.

$$\alpha_1 = 0,85 - 0,0015 \cdot f'_c \geq 0,67 \quad (29)$$

$$\beta_1 = 0,97 - 0,0025 \cdot f'_c \geq 0,67 \quad (30)$$

**Figura 29: Diagrama retangular equivalente para tensões no concreto comprimido**



Fonte: Próprio autor

A tensão de tração em cada camada da armadura de FRP deve ser determinada utilizando-se a compatibilidade de deformações e a relação linear entre as tensões e deformações de tração. Por meio da compatibilidade de deformações obtém-se a Equação 31, na qual  $\varepsilon_f$  é a deformação instalada na armadura de FRP, e por meio do equilíbrio da seção transversal obtém-se a profundidade da linha neutra ( $c$  - Equação 32), na qual  $A_f$  é a área de armadura de FRP.

Conhecendo-se  $\varepsilon_f$  e  $c$ , com o uso da Lei de Hooke, obtém-se a Equação 33, por meio da qual pode-se calcular tensão instalada na armadura de FRP ( $f_f$ ). Por fim, o momento resistente da seção transversal ( $M_f$ ) pode ser obtido pela Equação 34.

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cu} \cdot (d - c)}{c} \quad (31)$$

$$c = \frac{A_f \cdot \phi_f \cdot f_f}{\alpha_1 \cdot \phi_c \cdot f'_c \cdot b \cdot \beta_1} \quad (32)$$

$$\phi_f \cdot f_f = \left( \sqrt{\frac{(E_f \cdot \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{\alpha_1 \cdot \beta_1 \cdot \phi_c \cdot f'_c \cdot b \cdot d}{A_f} \cdot E_f \cdot \varepsilon_{cu}} - 0,5 \cdot E_f \cdot \varepsilon_{cu} \right) \quad (33)$$

$$M_f = A_f \cdot \phi_f \cdot f_f \cdot \left( d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \quad (34)$$

É importante ressaltar que o CAN CSA S806 (2012) não leva em conta o efeito do ambiente sobre as propriedades da barra de FRP, uma vez que não apresenta um fator de redução que considere o tipo de exposição ambiental do elemento estrutural.

### 2.5.3 FIB BULLETIN 40 (2007)

O FIB *Bulletin* 40 (2007) apresenta procedimentos de dimensionamento de seções armadas com barras de FRP considerando dois tipos de ruína: o esmagamento do concreto ou a ruptura da barra de FRP. A determinação do tipo de ruína é realizada por meio da comparação entre a taxa de armadura ( $\rho_f$ ), calculada pela Equação 35, e a taxa de armadura balanceada ( $\rho_{fb}$ ). O FIB *Bulletin* 40 (2007) dispõe de três diferentes equações para o cálculo de  $\rho_{fb}$ : a mesma expressão encontrada no ACI 440.1R (2015), a expressão proposta por Pilakoutas *et al.* (2002), que leva em consideração a variabilidade do concreto, e a expressão semiempírica proposta por El-Ghandour (1999) para lajes de concreto com armadura de FRP (Equações 36, 37 e 38, respectivamente). Na Equação 37,  $f_{ck}$ ,  $f_{fk}$  e  $E_{ck}$  são os valores característicos da resistência à compressão do concreto, da resistência à tração da barra de FRP e do módulo de elasticidade da barra de FRP. Na Equação 38,  $f_{cu}$  é a resistência à compressão do concreto obtida pelo ensaio de amostras cúbicas.

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d} \quad (35)$$

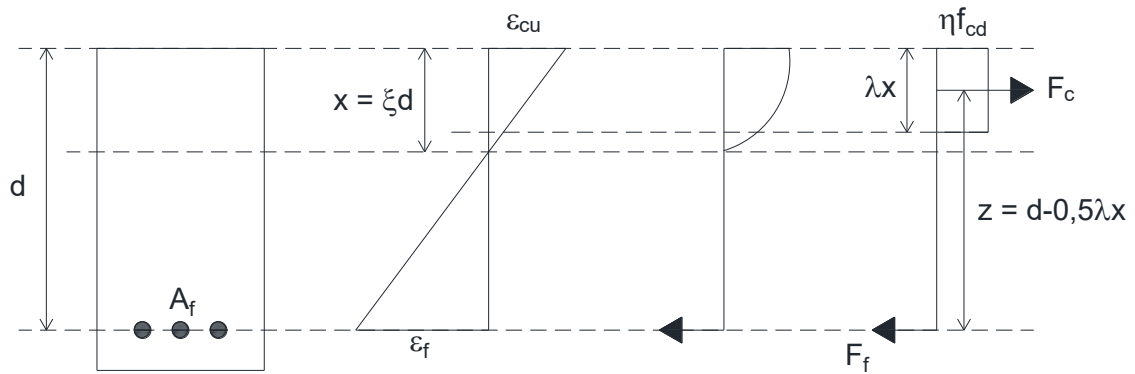
$$\rho_{fb} = 0,85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_{fu}} \cdot \frac{E_f \cdot \varepsilon_{cu}}{E_f \cdot \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (36)$$

$$\rho_{fb} = \frac{0,81 \cdot (f_{ck} + 8) \cdot \varepsilon_{cu}}{f_{fk} \cdot \left( \frac{f_{fk}}{E_{fk}} + \varepsilon_{cu} \right)} \quad (37)$$

$$\rho_{fb} = 2,1 \cdot \left( \frac{f_{cu}}{40} \right) \cdot \left( \frac{E_f}{110 \cdot 10^3} \right)^{0,7} \cdot \left( \frac{500}{f_{fu}} \right)^{1,6} \quad (38)$$

Desta forma, o momento resistente da seção pode ser determinado com base na Figura 30, desconsiderando-se a presença de armaduras comprimidas de FRP (porta-estribos) devido à sua natureza anisotrópica e sua baixa contribuição à capacidade resistente da seção.

**Figura 30: Distribuição simplificada de tensões e deformações em seções de concreto com armadura de FRP**



Fonte: Adaptado de FIB *Bulletin* 40 (2007)

### 2.5.3.1 Ruína pelo esmagamento do concreto

Quando  $\rho_f$  é maior do que  $\rho_{fb}$ , espera-se que a ruína da seção transversal ocorra pelo esmagamento do concreto comprimido. Neste caso, o momento último resistente ( $M_u$ ) pode ser calculado pela Equação 39, na qual  $f_{cd}$  é o valor de projeto da resistência à compressão do concreto, obtido pela Equação 40,  $\eta$  é o fator de redução da resistência do concreto para o diagrama de tensões retangular equivalente, calculado pela Equação 41,  $b$  é a largura da seção,  $d$  é a altura útil,  $\lambda$  é o fator de redução da profundidade da linha neutra que define a altura do diagrama retangular equivalente, calculado pela Equação 42, e  $\xi$  é um fator que relaciona a profundidade da linha neutra e a altura útil, calculado pela Equação 43.

$$M_u = \eta \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2 \cdot (\lambda \cdot \xi) \cdot \left(1 - \frac{\lambda \cdot \xi}{2}\right) \quad (39)$$

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} \quad (40)$$

$$\eta = \begin{cases} 1 & \text{se } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 1 - \left(\frac{f_{ck} - 50}{200}\right) & \text{se } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad (41)$$

$$\lambda = \begin{cases} 0,8 & \text{se } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 0,8 - \left(\frac{f_{ck} - 50}{400}\right) & \text{se } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad (42)$$

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_f + \epsilon_{cu}} \quad (43)$$

Na Equação 40, o fator  $\alpha_{cc}$  é recomendado igual a 1 e  $\gamma_c$  é o fator de redução da resistência do concreto, igual a 1,5. Na Equação 43,  $\varepsilon_f$  é a deformação de tração instalada na armadura de FRP, a qual pode ser determinada pela Equação 44, sendo  $\varepsilon_{cu}$  a deformação última do concreto, igual a 3,5 ‰ para concretos com resistência à compressão de até 50 MPa, segundo o FIB *Bulletin* 40 (2007).

Por Lei de Hooke, a Equação 45 pode ser utilizada para calcular a tensão instalada na armadura de FRP ( $\sigma_f$ ), além de verificar se a ruptura do FRP está sendo evitada, uma vez que  $\sigma_f$  deve ser menor do que a resistência à tração de projeto do FRP ( $f_{fd}$ ).

$$\varepsilon_f = \frac{-\varepsilon_{cu} + \sqrt{\varepsilon_{cu}^2 + \frac{4 \cdot \eta \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{ck} \cdot \lambda \cdot \varepsilon_{cu}}{\gamma_c \cdot \rho_f \cdot E_f}}}{2} \quad (44)$$

$$\sigma_f = \varepsilon_f \cdot E_f < f_{fd} \quad (45)$$

### 2.5.3.2 Ruína pela ruptura da barra de FRP

Caso  $\rho_f$  seja inferior à  $\rho_{fb}$ , a ruína esperada da seção transversal é governada pela ruptura da barra de FRP. Neste caso, a Equação 46 pode ser utilizada para calcular o momento último resistente ( $M_u$ ). Para isso, é necessário determinar a deformação instalada no concreto ( $\varepsilon_c$ ), o que pode ser feito por meio de um processo iterativo para a solução das Equações 47 e 48. Na Equação 48,  $f_c$  é a tensão de compressão no concreto, calculada pela Equação 49, na qual  $\varepsilon_{c2}$  é a deformação quando o concreto atinge sua máxima resistência e  $\varepsilon_{cu}$  é a deformação última, calculadas pelas Equações 50 e 51, e  $n$  é um fator calculado pela Equação 52.

$$M_u = A_f \cdot f_{fd} \cdot d \cdot \left(1 - \frac{\lambda \cdot \xi}{2}\right) \quad (46)$$

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{fu} + \varepsilon_c} \quad (47)$$

$$F_c = F_T \rightarrow b \cdot d \cdot \xi \cdot \frac{\int_0^{\varepsilon_c} f_c \cdot d \cdot \varepsilon_c}{\varepsilon_c} = A_f \cdot f_{fd} \quad (48)$$

$$f_c = \begin{cases} f_{cd} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}}\right)^n\right] & \text{se } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \\ f_{cd} & \text{se } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (49)$$

$$\varepsilon_{c2} = \begin{cases} 2,0 & \text{se } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 2,0 + 0,085 \cdot (f_{ck} - 50)^{0,53} & \text{se } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad (50)$$

$$\varepsilon_{cu} = \begin{cases} 3,5 & \text{se } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 2,6 + 35 \cdot \left[ \frac{(90 - f_{ck})}{100} \right]^4 & \text{se } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad (51)$$

$$n = \begin{cases} 2,0 & \text{se } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 1,4 + 23,4 \cdot \left[ \frac{(90 - f_{ck})}{100} \right]^4 & \text{se } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad (52)$$

### 2.5.3.3 Consideração da exposição ambiental

Para levar em conta a ação do ambiente a longo prazo, o FIB *Bulletin* 40 (2007) utiliza uma filosofia que identifica os principais ambientes agressivos que podem deteriorar o FRP e introduz uma série de fatores de redução da resistência em função do ambiente de exposição. Desta forma, a durabilidade do FRP é abordada com base em uma equação na qual a resistência à tração de projeto do FRP é relacionada à resistência à tração característica de curto prazo ( $f_{fk0}$ ) por meio de um fator que leva em conta a ação ambiental ( $\eta_{env,t}$ ) e um fator de segurança ( $\gamma_f$ ), conforme a Equação 53.

$$f_{fd} = \frac{f_{fk0}}{\eta_{env,t} \cdot \gamma_f} \quad (53)$$

O fator ambiental  $\eta_{env,t}$  é dado por uma razão entre a resistência à tração característica de curto prazo e a resistência à tração característica de longo prazo. Esta resistência à tração característica de longo prazo pode ser determinada com precisão se a resistência à tração característica obtida em ensaio de 1000 horas ( $f_{fk1000h}$ ) e a porcentagem de redução padrão da resistência à tração, por década logarítmica, devido à influência ambiental ( $R_{10}$ ) forem conhecidas, como apresenta a Equação 54. O expoente  $n$  é dado pela soma de quatro termos, conforme a Equação 55, sendo  $n_{mo}$  o termo relacionado à condição de umidade,  $n_T$  o termo relacionado à temperatura,  $n_{SL}$  o termo relacionado à vida útil desejada e  $n_d$  o termo relacionado à correção do diâmetro da barra. Para condições normais, o FIB *Bulletin* 40 (2007) recomenda que o parâmetro  $n$  seja igual a 3.

$$\eta_{env,t} = \frac{f_{fk1000h}}{f_{fk0}} \cdot \left( \frac{100 - R_{10}}{100} \right)^n \quad (54)$$

$$n = n_{mo} + n_T + n_{SL} + n_d \quad (55)$$

O fator  $R_{10}$  é a inclinação da curva, em escala logarítmica dupla, da carga em função do tempo até a falha do material. Uma inclinação constante indica a mesma porcentagem de

perda de resistência para a mesma razão de tempo. Segundo o FIB *Bulletin* 40 (2007), vários ensaios realizados à temperatura ambiente e elevadas temperaturas mostraram um comportamento linear em escala logarítmica dupla (Alwis, Burgoyne, 2006; Uomoto, Nishimura, 1997; Greenwood, 2001; Weber, 2006a; Weber, 2006b), assim, para cada grupo de materiais sob condições similares este valor é aproximadamente constante (Weber, 2006a). Para materiais com  $R_{10}$  conhecido, uma extrapolação dos valores de longo prazo à vida útil é simples e, para materiais com  $R_{10}$  desconhecido, uma estimativa pode ser realizada com base nos dados da literatura para o grupo de material analisado.

A Tabela 18 apresenta fatores de redução padronizados para a resistência à tração esperada após 100 anos no concreto sob “condições de exposição padronizadas”, as quais são definidas como um clima exterior (sem contato constante com a água) com temperatura média anual entre 5 e 15 °C. Os valores sugeridos de  $\eta_{env,t}$  para GFRP, AFRP e CFRP são também apresentados de forma inversa para representar as frações da resistência à tração original. Por exemplo, o esforço de tração esperado para o qual 5% das barras de CFRP romperão após 100 anos nestas condições padronizadas é cerca de 77% da resistência à tração original da barra, enquanto os valores limites para AFRP e GFRP são de 44% e 24%.

O valor de  $f_{fk1000h}$  é dado pela tração resistida pela barra de FRP depois de ser exposta a condições agressivas durante 1000 horas, o qual pode ser expresso como uma porcentagem da resistência à tração de curto prazo da barra ou como valor absoluto. Assim, a durabilidade só pode ser estimada com confiança se dados de ensaios de longo prazo forem obtidos, e, quanto maior a duração do ensaio de longo prazo, mais precisa será a extrapolação do comportamento, sendo 1000 horas uma boa idade de ensaio para o FRP. Durante este período, os processos de difusão estão estabilizados e os ensaios são realizados dentro de poucos meses. Caso o valor de  $f_{fk1000h}$  não seja conhecido, uma estimativa pode ser obtida por meio da Equação 56, levando a  $\eta_{env,t}$  estimado da Equação 57.

**Tabela 18: Fatores de redução padrão da resistência à tração para 100 anos de exposição – ambiente úmido e temperatura média anual de 10°C**

Tipo de FRP	Valores de $R_{10}$ da literatura (%)	$\eta_{env,t}$	$1/\eta_{env,t}$
GFRP – classe 3	25	4,16	0,24
GFRP – classe 2	ASD	ASD	ASD
GFRP – classe 1	ASD	ASD	ASD
AFRP – classe 2	15	2,25	0,44
AFRP – classe 1	ASD	ASD	ASD
CFRP – classe 2	5	1,29	0,77
CFRP – classe 1	ASD	ASD	ASD

ASD – A ser determinado

Fonte: Adaptado de FIB *Bulletin* 40 (2007)

$$f_{fk1000h} = f_{fk0} \cdot \left[ \frac{100 - R_{10}}{100} \right]^2 \quad (56)$$

$$\eta_{env,t} = \frac{1}{\left( \frac{100 - R_{10}}{100} \right)^{n-2}} \quad (57)$$

Assim, a resistência à tração de projeto de longo prazo ( $f_{fk,d}$ ) pode ser calculada pela Equação 58.

$$f_{fk,d} = \frac{f_{fk1000h} \cdot \left[ \frac{100 - R_{10}}{100} \right]^n}{\gamma_f} \quad (58)$$

A Tabela 19 apresenta os valores assumidos pelos termos de correção  $n_{mo}$ ,  $n_T$ ,  $n_{SL}$  e  $n_d$  para cada uma das condições relacionadas à umidade, temperatura, vida útil e diâmetro consideradas, respectivamente.

Com relação à umidade, o FIB *Bulletin* 40 (2007) considera três tipos de ambientes: seco (condições internas, protegidas da chuva, e com umidade relativa média de aproximadamente 50%), úmido (condições externas, submetidas à chuva, sem contato constante com água, e com umidade relativa média de aproximadamente 80%), e saturado (constantemente em contato com água e com umidade relativa média de cerca de 100%). Com relação à temperatura, o FIB *Bulletin* 40 (2007) apresenta quatro classes com intervalos de 10 °C na temperatura média anual (TMA). Caso as variações sazonais de temperatura forem altas, o valor mais alto é recomendado.

**Tabela 19: Termos de correção relacionados às condições de umidade, de temperatura, à vida útil desejada e ao diâmetro da barra de FRP**

Termo de correção	Condição	Valor assumido
$n_{mo}$	Seco	-1
	Úmido	0
	Saturado	1
$n_T$	TMA < 5 °C	-0,5
	5 °C < TMA < 15 °C	0,0
	15 °C < TMA < 25 °C	0,5
	25 °C < TMA < 35 °C	1,0
$n_{SL}$	Vida útil de 1 ano	1,0
	Vida útil de 10 anos	2,0
	Vida útil de 50 anos	2,7
	Vida útil de 100 anos	3,0
$n_d$	Diâmetro maior que o ensaiado	0,0
	Diâmetro igual ao ensaiado	0,0
	75% do diâmetro ensaiado	0,5 (0,3)
	50% do diâmetro ensaiado	1,0 (0,6)

Fonte: Adaptado de FIB *Bulletin* 40 (2007)

Como o fator  $\eta_{env,t}$  é sugerido para uma vida útil de 100 anos, uma menor redução da resistência pode ser utilizada caso a vida útil requerida seja inferior. Se uma relação linear entre a redução da resistência e o logaritmo do tempo for assumida, o fator  $\eta_{env,t}$  pode ser recalculado pelo termo  $n_{SL}$ .

Tendo em vista que todos os processos de deterioração são uma função da temperatura, do tempo e da umidade, a lei de difusão de Fick pode ser aplicada. Essa Lei diz que o diâmetro influencia no tempo até a falha do material. Sob condições constantes, um quarto do tempo até a falha é observado para metade do diâmetro, e, se um diâmetro menor que o ensaiado for utilizado, um termo de correção deve ser aplicado. Para diâmetros maiores não é recomendada compensação, devido ao efeito do tamanho na resistência. Desta forma, o FIB *Bulletin* 40 (2007) apresenta valores para a correção do diâmetro da barra, conforme a Tabela 19, sendo os valores em parênteses calculados com base na lei de difusão.

Com relação ao fator de segurança  $\gamma_f$ , o FIB *Bulletin* 40 (2007) recomenda um valor único de 1,25 para GFRP, AFRP e CFRP.

#### 2.5.4 SP 295.1325800 (2017)

As disposições da SP 295.1325800 (2017) se aplicam para a utilização de barras de GFRP (denominado pela norma como ASK), BFRP (denominado ABK), CFRP (denominado AUK), AFRP (denominado AAK) e para a combinação de um ou mais tipos de FRP (denominado ACC). A resistência à tração ( $R_{f,n}$ ), módulo de elasticidade ( $E_{f,n}$ ) e deformação última ( $\varepsilon_{fu,n}$ ) são propriedades das barras de FRP com valores padrão, as quais devem ser determinadas em laboratório com segurança de, pelo menos, 0,95, tendo como base os resultados de ensaios realizados em amostras de FRP. Os valores padrão da resistência à tração e do módulo de elasticidade das barras de FRP não devem ser inferiores aos valores apresentados na Tabela 20.

**Tabela 20: Valores mínimos das propriedades mecânicas por tipo de FRP**

Propriedade mecânica	Valores mínimos por tipo de FRP				
	ASK (GFRP)	ABK (BFRP)	AUK (CFRP)	AAK (AFRP)	ACC (Combinado)
Resistência à tração – $R_{f,n}$ (MPa)	800	800	1400	1400	1000
Módulo de elasticidade – $E_{f,n}$ (GPa)	50	50	130	70	100

Fonte: Adaptado de SP 295.1325800 (2017)

O valor de projeto do módulo de elasticidade do material ( $E_f$ ) deve ser tomado igual a seu valor padrão ( $E_{f,n}$ ). Já com relação ao valor de projeto da resistência à tração da barra de FRP ( $R_f$ ), seu valor pode ser calculado pela Equação 59, na qual  $\gamma_f$  é o fator de redução da resistência do material e  $\gamma_{f1}$  é um coeficiente que leva em conta as condições de exposição

da estrutura armada com barras de FRP. Para o dimensionamento no ELU, no caso de se assegurar uma confiabilidade probabilística de pelo menos 0,997, dependendo do valor do coeficiente de variação ( $v$ ), o fator de segurança  $\gamma_f$  pode ser igual a 1,2, se  $v \leq 0,1$  ou 1,5, se  $0,1 < v \leq 0,15$ . O coeficiente  $\gamma_{f1}$  é obtido pela Tabela 21.

$$R_f = \frac{\gamma_{f1} \cdot R_{f,n}}{\gamma_f} \quad (59)$$

**Tabela 21: Valores do coeficiente de exposição por tipo de FRP**

Condição de exposição da estrutura	Valores de $\gamma_{f1}$ por tipo de FRP				
	ASK (GFRP)	ABK (BFRP)	AUK (CFRP)	AAK (AFRP)	ACC (Combinado)
Interna	0,8	0,9	1,0	0,9	0,9
Externa e em contato com o solo	0,7	0,8	1,0	0,8	0,8

Fonte: Adaptado de SP 295.1325800 (2017)

Caso o dimensionamento da estrutura seja realizado no ELU considerando apenas a ação de carregamentos constantes e de longa duração,  $R_f$  pode ser obtido pela Equação 60, sendo  $\gamma_{f,1}$  o coeficiente de redução da resistência à tração do FRP sob carregamentos de longa duração, dado pela Tabela 22. O valor de projeto da deformação última do FRP ( $\epsilon_{f,ult}$ ) pode ser obtido pela Equação 61.

**Tabela 22: Valores do coeficiente de redução da resistência à tração sob carregamentos de longa duração por tipo de FRP**

Valores de $\gamma_{f,1}$ por tipo de FRP				
ASK (GFRP)	ABK (BFRP)	AUK (CFRP)	AAK (AFRP)	ACC (Combinado)
0,3	0,4	0,6	0,4	0,4

Fonte: Adaptado de SP 295.1325800 (2017)

$$R_f = \gamma_{f,1} \cdot R_{f,n} \quad (60)$$

$$\epsilon_{f,ult} = \frac{R_f}{E_f} \quad (61)$$

A SP 295.1325800 (2017) recomenda que a resistência à compressão da barra de FRP seja desconsiderada, ou seja, o valor de projeto da resistência à compressão da barra de FRP deve ser tomado igual a zero.

Os procedimentos detalhados a seguir são apresentados na SP 295.1325800 (2017) e aplicados para estruturas armadas com barras de FRP sem aplicação de protensão, considerando-se o ELU. Tal norma apresenta procedimentos para a determinação da capacidade resistente de estruturas armadas com barras de FRP submetidas à momento

fletor, tração centrada, tração e compressão excêntrica. Entretanto, como neste trabalho se avaliam estruturas submetidas à momento fletor, apenas este tópico será detalhado.

Segundo a SP 295.1325800 (2017), a análise da capacidade resistente de estruturas sob a ação de momentos fletores e forças longitudinais (compressão excêntrica ou tração) deve ser realizada para seções normais ao eixo longitudinal do elemento. Assim, tal análise deve ser realizada com base em um modelo não-linear de deformações. Entretanto, no caso de estruturas com seção retangular, seções do tipo T ou I com a armadura de FRP posicionada nas faces superior e inferior da seção, bem como seções retangulares, circulares ou anelares submetidas à compressão, a análise pode ser realizada com base nas forças últimas.

#### **2.5.4.1 Capacidade resistente de seções normais para forças últimas**

O cálculo da capacidade resistente de seções normais deve ser realizado com base na razão entre o valor da altura da região comprimida de concreto, determinada a partir das condições de equilíbrio da seção (profundidade da linha neutra -  $x$ ) e o valor da altura da região de concreto comprimido para o caso de se obter modo de ruína governado pela ruptura simultânea da armadura de FRP e do concreto (ruína balanceada -  $x_R$ ). Assim, o parâmetro  $\xi$  pode ser obtido pela Equação 62, na qual  $h_0$  é a altura medida a partir da face comprimida até o centro de gravidade de armadura tracionada (altura útil). Já o parâmetro  $\xi_R$  pode ser obtido pela Equação 63, na qual  $\varepsilon_{b2}$  é a deformação última de compressão do concreto, a qual é dada pela norma SP 63.13330 (2012) igual a 0,0035 para concretos de classe até B60 e calculado por interpolação linear entre os valores de 0,0033 para classe B70 até 0,0028 para classe B100.

$$\xi = \frac{x}{h_0} \quad (62)$$

$$\xi_R = \frac{x_R}{h_0} = \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_{f,ult}}{\varepsilon_{b2}}} \quad (63)$$

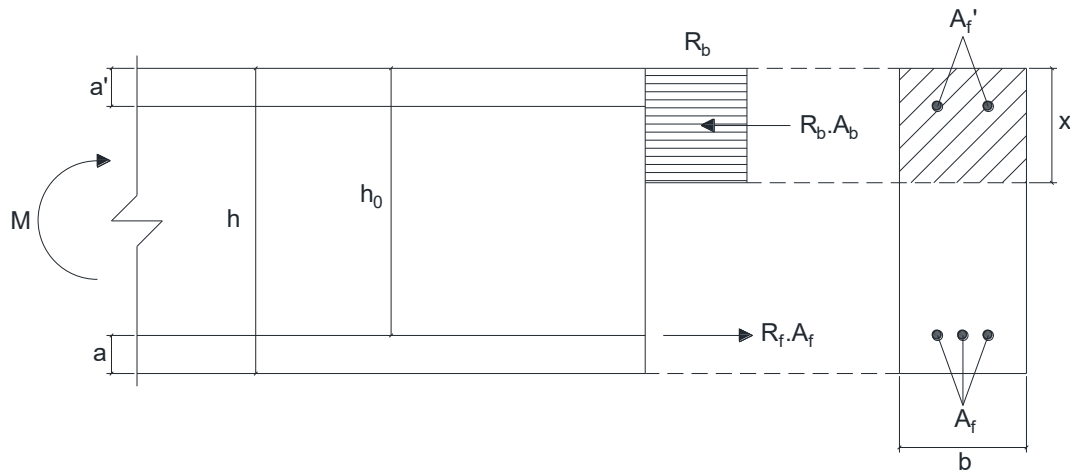
A classificação do concreto pode ser determinada de acordo com a norma russa SP 63.13330 (2012), sendo que a classe de resistência à compressão do concreto (B) corresponde ao valor da resistência à compressão cúbica, em MPa, determinada por meio de ensaios padronizados com segurança de 0,95.

Para seções submetidas à flexão, a análise da capacidade resistente deve ser realizada com base na condição dada pela Equação 64, na qual  $M$  é o momento fletor solicitante e  $M_{ult}$  é o momento fletor último resistente. A Figura 31 apresenta o diagrama de

forças e tensões para uma seção retangular normal ao eixo longitudinal de uma estrutura fletida, o qual é utilizado para o cálculo da capacidade resistente.

$$M \leq M_{ult} \quad (64)$$

**Figura 31: Diagrama de tensões e forças de uma estrutura de seção retangular submetida à momento fletor**



Fonte: Adaptado de SP 295.1325800 (2017)

O valor de  $M_{ult}$  para estruturas de seções retangulares submetidas à flexão, considerando-se a ruína do tipo balanceada ( $\xi = \xi_R$ ), pode ser determinado pela Equação 65, na qual  $R_b$  é a resistência à compressão de projeto do concreto, calculada pela Equação 66 e  $b$  é a largura da seção transversal. Na Equação 66,  $R_{b,n}$  é a resistência à compressão do concreto e  $\gamma_b$  é o fator de redução da resistência do concreto, tomado igual a 1,3. Pela Equação 67 é possível calcular a profundidade da linha neutra ( $x$ ), sendo  $A_f$  a área de armadura de FRP na seção transversal.

$$M_{ult} = R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - 0,5 \cdot x) \quad (65)$$

$$R_b = \frac{R_{b,n}}{\gamma_b} \quad (66)$$

$$x = \frac{R_f \cdot A_f}{R_b \cdot b} \quad (67)$$

Para o cálculo da capacidade resistente de estruturas fletidas, é recomendado pela norma SP 295.1325800 (2017) que a condição  $\xi \leq \xi_R$  seja atendida, ou seja, o modo de ruína que governa o comportamento do elemento estrutural deve ser o esmagamento do concreto comprimido ou a ruína balanceada. Caso a área de armadura de FRP tracionada seja maior do que a requerida para que a condição de ruína balanceada seja atendida (ruína pelo

esmagamento do concreto comprimido),  $M_{ult}$  para estruturas fletidas com seção retangular deve ser calculado pela Equação 65, utilizando-se as Equações 68 a 71 para o cálculo da profundidade da linha neutra ( $x$ ). Na Equação 68,  $\omega$  é uma característica da região comprimida de concreto, sendo seu valor tomado igual a 0,8 para concretos de classe até B60 e igual 0,7 para concretos de classe B70 a B100.

$$x = \sqrt{(0,5 \cdot \mu_f \cdot \alpha_2 \cdot h_0)^2 + \mu_f \cdot \alpha_2 \cdot h_0^2 \cdot \omega} - 0,5 \cdot \mu_f \cdot \alpha_2 \cdot h_0 \quad (68)$$

$$\mu_f = \frac{A_f}{b \cdot h_0} \quad (69)$$

$$\alpha_2 = \frac{E_f}{E_{b2}} \quad (70)$$

$$E_{b2} = \frac{R_b}{\varepsilon_{b2}} \quad (71)$$

### 2.5.5 ABNT NBR 17196 (2025)

A ABNT NBR 17196 (2025) utiliza a filosofia de dimensionamento da ABNT NBR 6118 (2023), baseada no ELU e ELS, e considera a utilização de barras de GFRP e BFRP como armadura em estruturas de concreto. Assim, os valores característicos das resistências dos materiais devem ser minorados para a obtenção dos valores de cálculo, tal como apresentado nas Equações 72 a 74, nas quais  $f_{cd}$ ,  $f_{yd}$  e  $f_{fd}$  são as resistências à compressão de cálculo do concreto, ao escoamento de cálculo do aço e à tração de cálculo do FRP, respectivamente,  $f_{ck}$ ,  $f_{yk}$  e  $f_{fk}$  são as resistências à compressão característica do concreto, ao escoamento característica do aço e à tração característica do FRP, respectivamente,  $\gamma_c$ ,  $\gamma_s$  e  $\gamma_{FRP}$  são os fatores de redução da resistência do concreto, do aço e do FRP, respectivamente, e  $C_E$  é o fator de redução ambiental, tomado igual a 0,85.

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (72)$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (73)$$

$$f_{fd} = C_E \cdot \frac{f_{fk}}{\gamma_{FRP}} \quad (74)$$

Os valores dos fatores de redução da resistência do concreto e do aço podem ser obtidos a partir das recomendações da ABNT NBR 6118 (2023) e são tomados igual a 1,4 e 1,15, respectivamente. Com relação aos fatores de redução da resistência do FRP, estes são apresentados pela ABNT NBR 17196 (2025) em função do tipo de combinação de ações

utilizado, conforme apresentado na Tabela 23. As combinações de ações para ELU e ELS devem ser consideradas de acordo com a ABNT NBR 8681 (2004).

**Tabela 23: Fator de redução da resistência de barras de FRP em função do tipo de combinação de ações considerado**

Combinação	$\gamma_{FRP}$
ELU Normal	1,30
ELU Especial ou de construção	1,20
ELU Excepcional	1,20
ELU Fadiga e ELU Fluência	3,00
ELS	1,00

Fonte: ABNT NBR 17196 (2025)

Para garantir a segurança, a estrutura deve atender ao ELU no todo e para suas partes durante sua vida útil. Segundo a ABNT NBR 17196 (2025), considera-se que o ELU é atingido quando a deformação na armadura tracionada ou no concreto comprimido assumem seus valores-limites. Assim, a condição apresentada na Equação 75 deve ser atendida, ou seja, os esforços solicitantes de cálculo (valor de projeto das ações -  $S_d$ ) obtidos para as situações mais desfavoráveis que podem ocorrer ao longo da vida útil da estrutura (incluindo a fase construtiva), devem ser menores do que às resistências de cálculo (valor de projeto das resistências -  $R_d$ ).

$$S_d \leq R_d \quad (75)$$

A ABNT NBR 17196 (2025) considera dois possíveis modo de falha do elemento, sendo um baseado no esmagamento do concreto e outro baseado na ruptura da barra. O modo de falha que governa o comportamento do elemento pode ser determinado pela relação entre a taxa de armadura ( $\rho_f$  - Equação 76) e a taxa de armadura balanceada ( $\rho_{fb}$  - Equação 77), a qual é definida pela taxa de armadura fictícia para a qual se observa a transição entre os modos de falha. Na Equação 76,  $A_f$  é a área de armadura de FRP instalada na seção transversal,  $b$  é a largura da seção e  $d$  é a altura útil. Na Equação 77,  $\lambda$  é o coeficiente que determina a altura do diagrama retangular equivalente de tensões no concreto comprimido,  $\alpha_c$  é o parâmetro que determina a tensão equivalente no concreto comprimido,  $\eta_c$  é o coeficiente de fragilidade,  $E_f$  é o módulo de elasticidade do FRP e  $\varepsilon_{cu}$  é a deformação última de compressão no concreto. Para concretos de resistência normal e seções transversais retangulares,  $\lambda$  e  $\alpha_c$  são iguais a 0,8 e 0,85, respectivamente. Com relação à  $\eta_c$ , assume-se o valor de 1,0 para  $f_{ck} \leq 40$  MPa e  $\eta_c = (40/f_{ck})^{1/3}$ , com  $f_{ck}$  em MPa, para  $f_{ck} > 40$  MPa. De acordo com a ABNT NBR 6118 (2023),  $\varepsilon_{cu}$  pode ser tomado igual a 0,0035 (3,5 ‰) para concretos com  $f_{ck} \leq 50$  MPa.

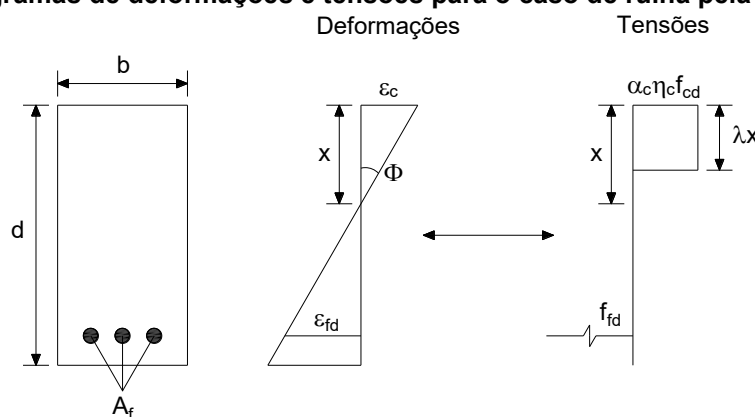
$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d} \quad (76)$$

$$\rho_{fb} = \lambda \cdot \alpha_c \cdot \eta_c \cdot \frac{f_{cd}}{f_{fd}} \cdot \frac{E_f \cdot \varepsilon_{cu}}{E_f \cdot \varepsilon_{cu} + f_{fd}} \quad (77)$$

### 2.5.5.1 Ruptura da barra de FRP

Caso  $\rho_f \leq \rho_{fb}$ , o modo de falha que governa o comportamento do elemento é a ruptura da armadura longitudinal de FRP tracionada e os diagramas de deformações e tensões podem ser obtidos tal como apresentado na Figura 32. Utilizando-se a compatibilidade de deformações e fazendo-se o equilíbrio da seção transversal, é possível calcular a profundidade da linha neutra ( $x$ ) pela Equação 78. O momento resistente da seção transversal pode então ser calculado por meio da Equação 79.

**Figura 32: Diagramas de deformações e tensões para o caso de ruína pela ruptura do FRP**



Fonte: Adaptado de Prática Recomendada CT 303 (2021)

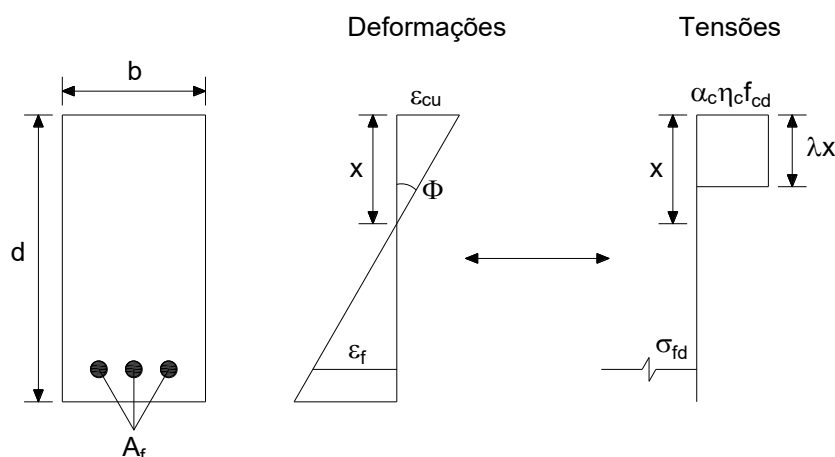
$$x = \frac{f_{fd} \cdot A_f}{\lambda \cdot \alpha_c \cdot \eta_c \cdot f_{cd} \cdot b} \quad (78)$$

$$M_{Rd} = f_{fd} \cdot A_f \cdot \left( d - \frac{\lambda x}{2} \right) \quad (79)$$

### 2.5.5.2 Esmagamento do concreto

Caso  $\rho_f > \rho_{fb}$ , o modo de falha que governa o comportamento do elemento é o esmagamento do concreto comprimido. A Figura 33 apresenta os diagramas de deformações e tensões, por meio dos quais pode ser obtida a profundidade da linha neutra ( $x$ ) fazendo-se o equilíbrio da seção com o uso da compatibilidade de deformações (Equação 80). Assim, o momento resistente pode ser calculado pela Equação 81, na qual  $\sigma_{fd}$  é a tensão instalada na armadura de FRP, calculada pela Equação 82.

**Figura 33: Diagramas de deformações e tensões para o caso de ruína pelo esmagamento do concreto**



Fonte: Adaptado de Prática Recomendada CT 303 (2021)

$$x = \frac{1}{2 \cdot b} \cdot \frac{\varepsilon_{cu} \cdot A_f \cdot E_f}{\lambda \cdot \alpha_c \cdot \eta_c \cdot f_{cd}} \cdot \left( -1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{\lambda \cdot \alpha_c \cdot \eta_c \cdot f_{cd}}{\varepsilon_{cu} \cdot A_f \cdot E_f} \cdot b \cdot d} \right) \quad (80)$$

$$M_{Rd} = \sigma_{fd} \cdot A_f \cdot \left( d - \frac{\lambda x}{2} \right) \quad (81)$$

$$\sigma_{fd} = \frac{b \cdot \lambda \cdot x \cdot \alpha_c \cdot \eta_c \cdot f_{cd}}{A_f} \quad (82)$$

## 2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais conceitos relacionados ao tema abordado, tais como propriedades da matriz polimérica, das resinas e do FRP em si, processo de produção, aplicações do material, aspectos de durabilidade e cinco modelos de dimensionamento de estruturas com armadura de FRP existentes. Ressalta-se que os procedimentos de dimensionamento aqui apresentados são relativos à aplicação de armaduras de FRP como armadura longitudinal em vigas de concreto armado submetidas à flexão, considerando-se o Estado Limite Último. Para o dimensionamento de estruturas submetidas à esforços axiais de tração, compressão, esforços combinados ou torção, bem como para análises relativas ao Estado Limite de Serviço, as respectivas normas técnicas devem ser consultadas.

# 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Tendo em vista os objetivos propostos, este trabalho foi dividido em três etapas, abrangendo análises teóricas e experimentais relacionadas ao comportamento mecânico e à durabilidade de vigas de concreto armadas com barras de aço e de GFRP, bem como à durabilidade de barras de GFRP isoladas. Este estudo dá continuidade ao programa experimental iniciado por Mazzú (2020), no qual foram avaliadas vigas de concreto armado com barras de aço e de GFRP submetidas à imersão em solução salina e a ambiente laboratorial. Mazzú (2020) ensaiou as vigas de referência e expostas durante 1000 horas, enquanto no presente trabalho a investigação foi ampliada com a realização de ensaios das vigas expostas durante 5000 e 10000 horas.

A primeira etapa consistiu em uma análise teórica de diferentes modelos normativos de dimensionamento. Foram aplicados cinco modelos para estimar a capacidade resistente de vigas de concreto armado com barras de GFRP, utilizando como base os resultados experimentais obtidos por Mazzú (2020). Além disso, dois modelos para dimensionamento de vigas de concreto com armadura de aço e dois modelos para vigas com armadura de GFRP foram selecionados e aplicados para prever o comportamento das vigas ensaiadas no âmbito desse trabalho, permitindo a comparação entre resultados teóricos e experimentais.

A segunda etapa correspondeu à continuação do programa experimental anterior, com a realização de ensaios após 5000 e 10000 horas de exposição das vigas à solução salina e ao ambiente laboratorial. As vigas foram submetidas a ensaios de flexão para avaliação do comportamento mecânico e dos efeitos da exposição prolongada. Corpos de prova de concreto, barras de aço e barras de GFRP também foram ensaiados para determinação das propriedades mecânicas dos materiais, além da realização de ensaios para avaliação da profundidade de penetração de cloretos no concreto.

Na terceira etapa, foram avaliadas barras de GFRP isoladas, expostas aos mesmos ambientes e pelos mesmos períodos das vigas, tanto na condição protegida por concreto quanto desprotegida. Essas barras foram submetidas a ensaios mecânicos e microestruturais, permitindo uma análise mais detalhada dos mecanismos de degradação atuantes.

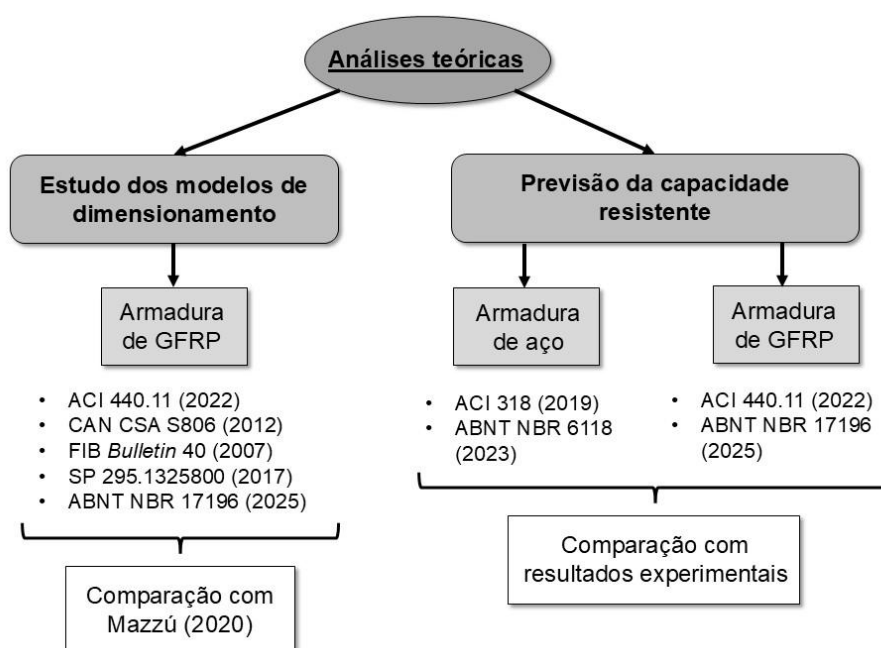
## 3.1 ANÁLISE TEÓRICA

A análise teórica se baseou no estudo e na aplicação dos modelos de dimensionamento propostos pelas normas técnicas ACI 440.11 (2022), CAN CSA S806 (2012), FIB *Bulletin* 40 (2007), SP 295.1325800 (2017) e ABNT NBR 17196 (2025) para a

determinação da capacidade resistente teórica das vigas de concreto armado com barras de GFRP ensaiadas por Mazzú (2020).

Posteriormente, foram selecionadas e aplicadas as normas ACI 440.11 (2022) e ABNT NBR 17196 (2025), bem como as normas ACI 318 (2019) e ABNT NBR 6118 (2023) para prever a capacidade resistente das vigas de concreto com armadura de GFRP e de aço, respectivamente, ensaiadas no âmbito deste trabalho. A Figura 34 apresenta um fluxograma desta etapa.

**Figura 34: Fluxograma da análise teórica**



Fonte: Próprio autor

### 3.1.1 ESTUDO DOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO

Foram estudados os modelos de dimensionamento das normas técnicas ACI 440.11 (2022), CAN CSA S806 (2012), FIB *Bulletin* 40 (2007), SP 295.1325800 (2017) e ABNT NBR 17196 (2025), cujos procedimentos, considerando-se vigas de seção retangular submetidas à flexão, foram apresentados no item 2.5 deste trabalho. Tais procedimentos foram aplicados para calcular a capacidade resistente teórica das vigas de concreto com armado com barras de GFRP ensaiadas por Mazzú (2020).

Mazzú (2020) avaliou a capacidade resistente de seis vigas de concreto armado com barras de GFRP, com seção transversal de 12 x 20 cm, comprimento de 250 cm, vão livre de 230 cm, cobrimento de 15 mm e armadura transversal composta por estribos de aço CA-60 com diâmetro nominal de 5 mm, espaçados a cada 10 cm. As vigas possuíam armadura longitudinal composta por duas barras de GFRP com diâmetro nominal de 10 mm, resistência à tração de 1047 MPa e módulo de elasticidade de 48 GPa (propriedades fornecidas pelo

fabricante). Entre as seis vigas com armadura de GFRP, duas foram ensaiadas à flexão em três pontos 45 dias após a concretagem, sendo utilizadas como referência (V\_LAB\_GFRP\_45d). Outras duas vigas foram ensaiadas após 1000 horas de exposição a ambiente laboratorial padrão (V\_LAB\_GFRP\_1000h), e as duas restantes após 1000 horas de imersão em solução salina de NaCl com concentração de 3,5% e temperatura de  $50 \pm 3$  °C (V\_ACP\_GFRP\_1000h).

A Tabela 24 apresenta os valores médios de resistência à compressão do concreto e de força máxima resistida pelas vigas, obtidos por Mazzú (2020), os quais foram utilizados para comparação com os resultados teóricos obtidos por meio da aplicação das prescrições normativas.

**Tabela 24: Resultados experimentais médios obtidos por Mazzú (2020) para vigas com armadura de GFRP**

Viga	Resistência à compressão do concreto (MPa)	Força máxima resistida pelas vigas (kN)
V_LAB_GFRP_45d	32,79	35,6
V_LAB_GFRP_1000h	33,49	37,0
V_ACP_GFRP_1000h	34,60	33,1

Fonte: Adaptado de Mazzú (2020)

Apesar de existirem similaridades entre as filosofias de dimensionamento de cada norma técnica, existem também particularidades que conduzem a diferenças nos resultados obtidos. O SP 295.1325800 (2017) leva em conta a agressividade do ambiente por meio do coeficiente  $\gamma_{f1}$ , que considera apenas a possibilidade de exposição ou não à água e intempéries. Este coeficiente assumiu o valor de 0,8 no caso das vigas submetidas à ambiente laboratorial e 0,7 no caso das vigas submetidas à solução salina. O ACI 440.11 (2022) e a ABNT NBR 17196 (2025) utilizam o coeficiente  $C_E$ , o qual possui valor fixo igual a 0,85. Já a FIB *Bulletin* 40 (2007) leva em conta a agressividade do ambiente por meio de um conjunto de fatores dependentes da umidade relativa, da temperatura do ambiente e da vida útil considerada, os quais, quando somados permitem obter o fator ambiental  $\eta_{env,t}$ . Assim, para as vigas referência ensaiadas 45 dias após a concretagem, foi desconsiderada a ação do ambiente. Para as vigas mantidas em ambiente laboratorial durante 1000 horas, foram consideradas condições internas, protegidas da chuva ( $n_{mo} = -1$ ), temperatura média anual entre 15 e 25 °C (ambiente laboratorial padrão,  $n_T = 0,5$ ), vida útil de 50 anos (valor mínimo segundo a ABNT NBR 15575-1 (2013),  $n_{SL} = 2,7$ ), diâmetro da barra de GFRP igual ao ensaiado ( $n_d = 0$ ), resistência à tração após 1000 horas ( $f_{rk,1000h}$ ) igual ao valor dado pelo fabricante, uma vez que permaneceram em ambiente laboratorial, e  $R_{10}$  para GFRP igual à 25, conforme a Tabela 18. Para as vigas mantidas em solução salina durante 1000 horas, foram consideradas condições saturadas ( $n_{mo} = 1$ ), temperatura média de 50 °C ( $n_T = 1$ , o qual

é o valor máximo apresentado na Tabela 19), vida útil de 50 anos ( $n_{SL} = 2,7$ ), diâmetro da barra de GFRP igual ao ensaiado ( $n_d = 0$ ), resistência à tração após 1000 horas ( $f_{fk,1000h}$ ) reduzida pelo parâmetro  $R_{10}$ , o qual foi adotado igual a 25, conforme a Tabela 18. A norma CAN CSA S806 (2012) não considera reduções devido à agressividade do ambiente.

Outra diferença na abordagem das normas é que o ACI 440.11 (2022) não considera a aplicação de fatores de redução dos materiais (FRP e concreto), mas minorar o momento resistente calculado pelo fator  $\phi$ . As demais normas minoram as resistências dos materiais para garantir a segurança, sendo que cada norma adota um valor diferente para os fatores de redução, conforme apresentado na Tabela 25.

**Tabela 25: Fatores de redução da resistência do FRP e do concreto por norma**

Norma	Fator de redução da resistência do concreto	Fator de redução da resistência do FRP
ACI 440.11 (2022)	$\phi$	
CAN CSA S806 (2012)	0,65 *	0,75 *
FIB <i>Bulletin</i> 40 (2007)	1,50	1,25
SP 295.1325800 (2017)	1,30	1,50
ABNT NBR 17196 (2025)	1,40	1,30

\* Aplicados multiplicando a resistência dos materiais, enquanto os demais são aplicados dividindo a resistência dos materiais

Fonte: Próprio autor

Com isso em vista, neste trabalho os cálculos foram realizados com a aplicação de todos os fatores de minoração das resistências dos materiais ou do momento resistente, visando simular uma situação de projeto, e desconsiderando-se tais coeficientes para se aproximar dos valores experimentais obtidos em laboratório. Ressalta-se que os fatores de redução ambiental foram aplicados em todos os casos. Os resultados obtidos e as devidas comparações encontram-se apresentados no item 4.2 deste trabalho, enquanto os cálculos completos encontram-se apresentados no Apêndice A.

### 3.1.2 PREVISÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE

Um dos objetivos específicos deste trabalho foi comparar os resultados experimentais obtidos com os resultados teóricos obtidos pela aplicação dos modelos de dimensionamento do ACI 318 (2019) e ABNT NBR 6118 (2023) para vigas com armadura longitudinal de aço e do ACI 440.11 (2022) e ABNT NBR 17196 (2025) para vigas com armadura longitudinal de GFRP.

Assim, as características das vigas de concreto ensaiadas no âmbito deste trabalho, as quais encontram-se apresentadas no item 3.2, foram utilizadas como parâmetros de entrada nos modelos de dimensionamento. Além disso, foram utilizadas as propriedades

mecânicas do aço, do GFRP e do concreto obtidas experimentalmente, as quais encontram-se apresentadas no item 4.1 deste trabalho.

A filosofia de dimensionamento do ACI 440.11 (2022) é baseada no ACI 318 (2019), portanto, esta última também garante a segurança do elemento estrutural por meio da minoração do momento resistente obtido, tal como apresentado no Apêndice B.1. Analogamente, a filosofia de dimensionamento da ABNT NBR 17196 (2025) é baseada nos procedimentos da ABNT NBR 6118 (2023), ou seja, a segurança do elemento estrutural é garantida pela minoração das resistências dos materiais utilizados, tal como apresentado no Apêndice B.2.

Desta maneira, os resultados teóricos utilizados na comparação com os resultados experimentais foram obtidos aplicando-se e, também, desconsiderando-se os coeficientes de minoração do momento resistente e das resistências dos materiais, de acordo com as premissas de cada norma técnica. Com esta abordagem, visou-se contemplar resultados mais próximos de uma realidade de projeto, e, também, a realidade de um laboratório (ambiente controlado). Ainda, ressalta-se que nas situações pertinentes foi considerada a ação do ambiente agressivo, como no caso da imersão em solução salina. Os resultados obtidos e suas respectivas comparações e discussões encontram-se apresentados no item 4.2 deste trabalho. Os cálculos completos encontram-se no Apêndice B.

## **3.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL – VIGAS**

### **3.2.1 VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM BARRAS DE AÇO E DE GFRP**

A segunda etapa deste trabalho consistiu na finalização do programa experimental iniciado por Mazzú (2020), correspondente ao trabalho de mestrado da autora. A pesquisadora produziu 28 vigas de concreto armado, sendo 14 com armadura longitudinal positiva composta por duas barras de aço CA-50 e 14 com armadura longitudinal positiva composta por duas barras de GFRP. Dentro de cada grupo de 14 vigas, Mazzú (2020) destinou 2 ao ambiente laboratorial para serem ensaiadas 45 dias após a concretagem (referência), 6 ao mesmo ambiente laboratorial para ensaios após 1000, 5000 e 10000 horas, e 6 à imersão em solução salina, também para ensaios após 1000, 5000 e 10000 horas. Além disso, a autora submeteu corpos de prova de concreto, aço e GFRP aos mesmos ambientes das vigas, por 1000, 5000 e 10000 horas, com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas dos materiais. Após a moldagem de todas as vigas, estas foram mantidas em ambiente laboratorial por 45 dias, período após o qual foram ensaiadas as vigas de referência. Em seguida, metade das vigas remanescentes foi imersa em solução salina, enquanto a outra metade permaneceu no ambiente laboratorial até as respectivas idades de ensaio.

Mazzú (2020) realizou os ensaios de flexão em três pontos em 12 das 28 vigas moldadas, sendo 4 de referência, 4 mantidas por 1000 horas em ambiente laboratorial e 4 mantidas imersas em solução salina pelo mesmo período, além dos respectivos corpos de prova de aço, concreto e GFRP. Dando continuidade a esse programa experimental, o presente trabalho contemplou os ensaios de flexão em três pontos das 16 vigas remanescentes, sendo 8 expostas por 5000 e 10000 horas em ambiente laboratorial e 8 imersas em solução salina pelos mesmos períodos. Também foram ensaiados os corpos de prova correspondentes de aço, concreto e GFRP. A Tabela 26 apresenta um resumo do programa experimental, enquanto a Figura 35 ilustra, por meio de um fluxograma, a metodologia adotada nesta etapa.

Mazzú (2020) estabeleceu uma nomenclatura para as vigas segundo o padrão  $V_{x\_y\_z\_w}$ , no qual x se refere à repetição do modelo a ser ensaiado (1 ou 2), y se refere ao ambiente de exposição (LAB - ambiente laboratorial ou ACP - solução salina), z se refere ao tipo de armadura (S - aço ou GFRP), e w se refere à idade de ensaio (45d, 1000h, 5000h ou 10000h).

As vigas de concreto armado apresentaram seção transversal com largura de 12 cm e altura de 20 cm, bem como comprimento de 250 cm. Durante os ensaios de flexão em três pontos as vigas foram apoiadas em pontos distantes 10 cm de suas extremidades, perfazendo um vão livre entre apoios de 230 cm. Visando-se analisar a durabilidade da armadura longitudinal, todas as vigas foram projetadas para ruptura por flexão. Para isso, todas as vigas apresentaram armadura longitudinal composta por duas barras com diâmetro nominal de 10 mm (taxa de armadura de 0,75%), sendo 14 vigas com armadura de GFRP e 14 vigas com armadura de aço CA-50.

**Tabela 26: Resumo do programa experimental das vigas de concreto armado**

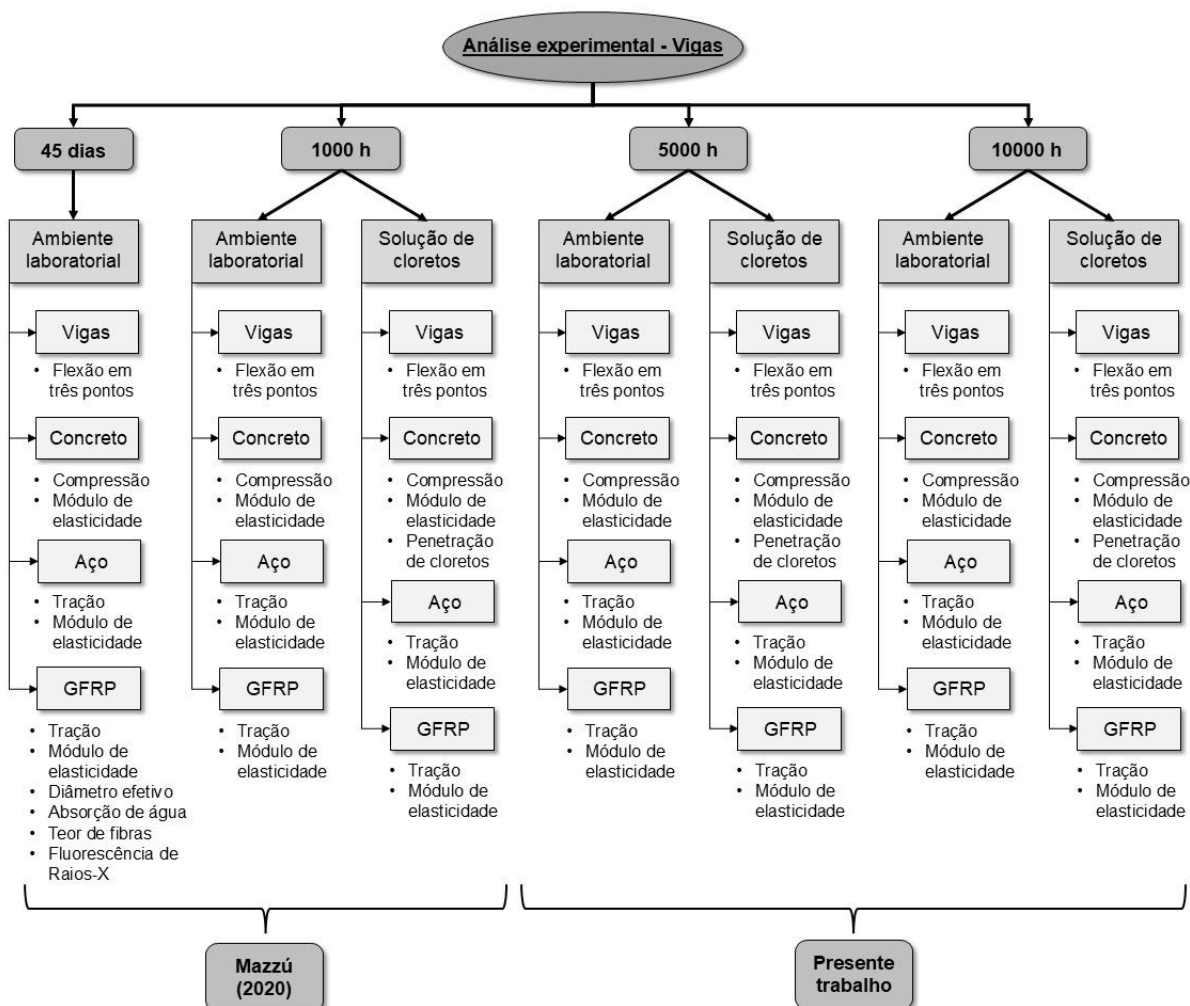
Ambiente de exposição	Idade de ensaio	Identificação	Quantidade de corpos de prova				
			Vigas		Concreto (Cilindro Ø10x20cm)	Barras de aço	Barras de GFRP
			Aço	GFRP			
Laboratorial	45 dias	Mazzú (2020)	2	2	3	2	18**
Laboratorial	1000 h (87 dias)	Mazzú (2020)	2	2	3	2	3
	5000 h (254 dias)	Presente trabalho	2	2	3	2	3
	10000 h (462 dias)	Presente trabalho	2	2	3	2	3
Solução salina	1000 h (87 dias)	Mazzú (2020)	2	2	6*	2	3
	5000 h (254 dias)	Presente trabalho	2	2	6*	2	3
	10000 h (462 dias)	Presente trabalho	2	2	6*	2	3

\*3 corpos de prova para determinação das propriedades mecânicas e 3 corpos de prova para a determinação da profundidade de penetração de íons cloreto

\*\*3 corpos de prova para a determinação das propriedades mecânicas, 5 corpos de prova para a obtenção do diâmetro efetivo, 5 corpos de prova para a determinação da absorção de água após imersão em 24 horas e 5 corpos de prova para a determinação do teor de fibras

Fonte: Adaptado de Mazzú (2020)

Figura 35: Fluxograma do programa experimental das vigas de concreto armado



Fonte: Próprio autor

Segundo o fabricante, as barras de GFRP foram produzidas utilizando-se fibras de vidro álcali-resistentes (AR) e resina termofixa epóxi éster-vinílica, possuindo conformação superficial caracterizada por enrolamento helicoidal. A Tabela 27 apresenta as propriedades fornecidas pelo fabricante das barras de GFRP utilizadas.

Tabela 27: Propriedades da barra de GFRP utilizada

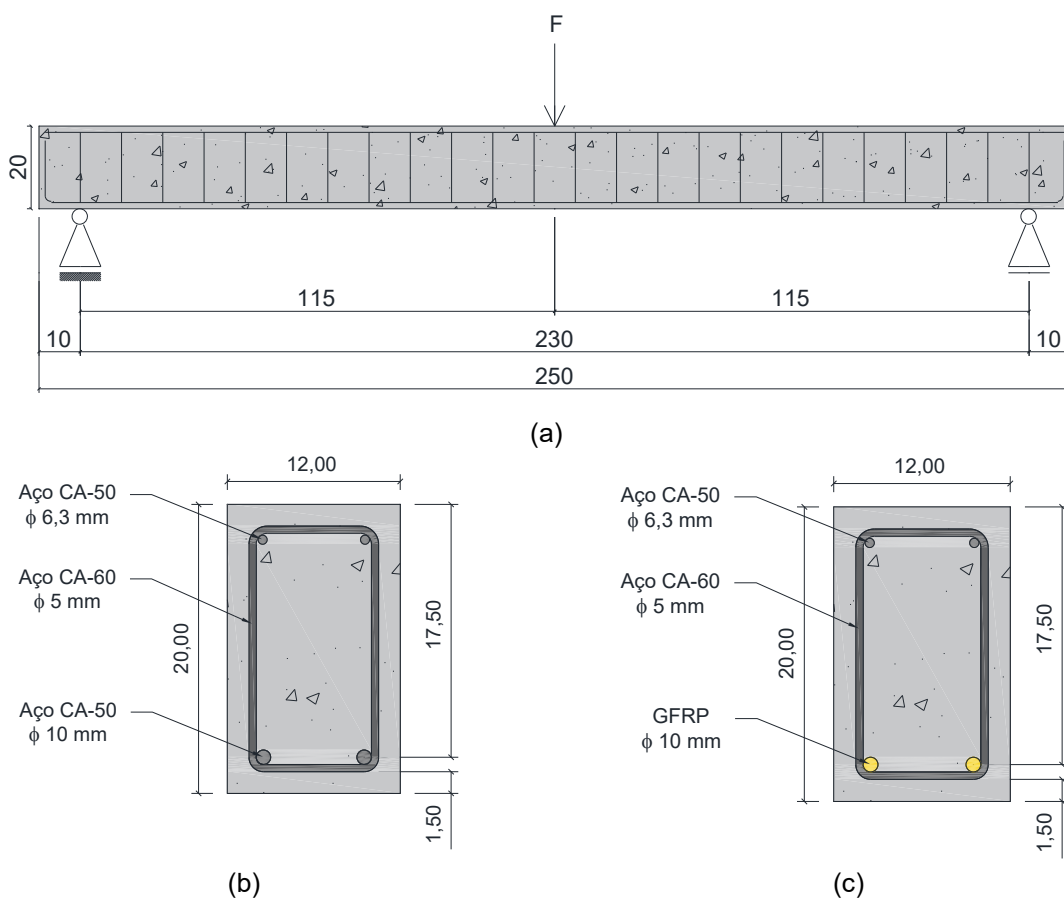
Propriedade	Unidade	Valores para barras com diâmetro nominal de 10 mm
Tensão nominal de tração	MPa	1047
Força de tração	kN	53,9
Coefficiente de Poisson	-	0,21
Módulo de elasticidade	GPa	48
Tensão nominal de compressão	MPa	541
Alongamento	%	2,11
Tensão nominal de cisalhamento	MPa	210
Coefficiente longitudinal de dilatação	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	5,9
Coefficiente transversal de dilatação	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	27,3
Absorção de umidade	%	0,515

Fonte: Mazzú (2020)

Todas as vigas apresentaram armadura longitudinal negativa (porta estribos) composta por duas barras de aço CA-50 com diâmetro nominal de 6,3 mm, armadura transversal composta por estribos de aço CA-60 com diâmetro nominal de 5,0 mm, espaçados a cada 10 cm, e cobertura de 15 mm.

A Figura 36 apresenta o esquema estático e as seções transversais das vigas com armadura longitudinal positiva de aço e de GFRP.

**Figura 36: Esquema estático de ensaio de flexão em três pontos (a) e seções transversais das vigas com armadura longitudinal positiva de aço (b) e de GFRP (c) – unidades em centímetros**



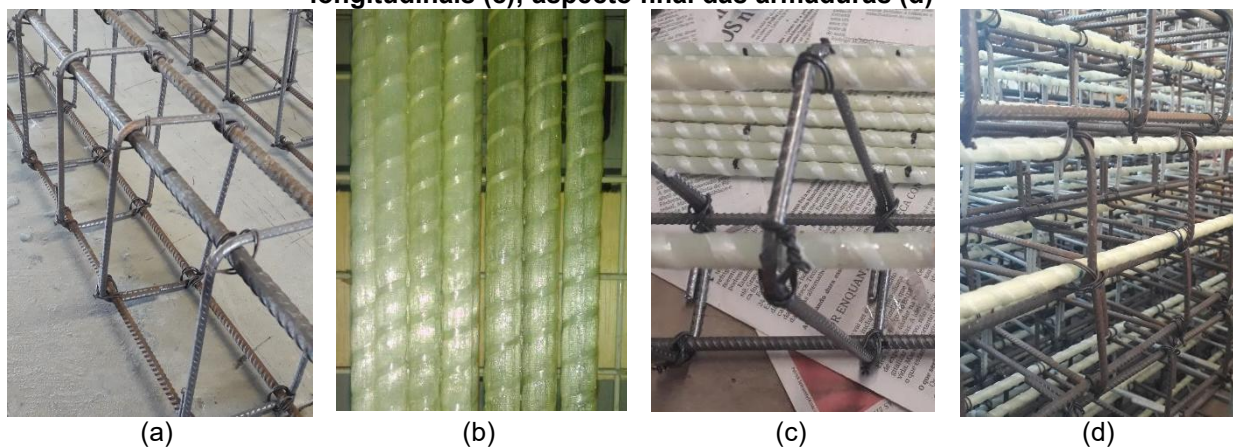
Fonte: Adaptado de Mazzú (2020)

### 3.2.1.1 Moldagem

A produção das vigas de concreto armado foi realizada por Mazzú (2020) e foi iniciada pela preparação das armaduras longitudinais e transversais. As armaduras de aço das vigas foram fornecidas já montadas enquanto as armaduras de GFRP das vigas foram montadas no local, conforme apresentado na Figura 37. Para esta montagem, o primeiro passo foi realizar a marcação do posicionamento dos estribos nas armaduras positivas e negativas (porta estribos) utilizando-se pincel atômico, para garantir seu correto posicionamento.

Posteriormente, os estribos foram fixados em sua posição com o uso de torquês e arame recozido torcido.

**Figura 37: Armadura de aço (a); barras de GFRP (b); amarração dos estribos nas armaduras longitudinais (c); aspecto final das armaduras (d)**



Fonte: Mazzú (2020)

No caso das vigas a serem mantidas em solução salina, tanto com armadura de aço quanto de GFRP, foi aplicada pintura de proteção à base de epóxi rico em zinco nos estribos utilizando-se pincel e seguindo as instruções do fabricante do produto, de forma a se evitar a corrosão dos estribos e a ruptura por cisalhamento no momento do ensaio de flexão em três pontos.

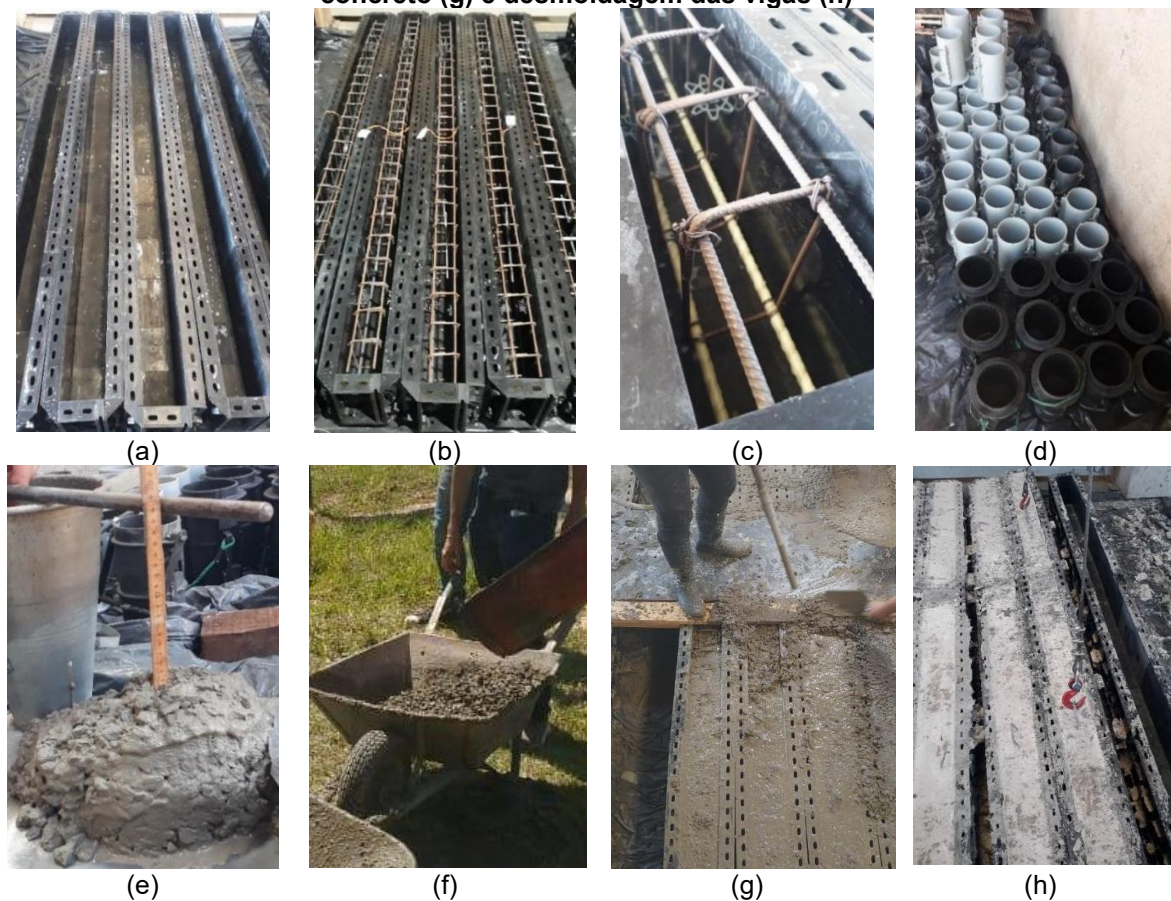
Para a moldagem das vigas foram utilizadas fôrmas poliméricas. Primeiramente, foram posicionados espaçadores nas armaduras das vigas para garantir o cobrimento adotado e foi aplicado desmoldante em todas as fôrmas. O desmoldante utilizado foi fornecido pela mesma empresa e é próprio para ser aplicado neste tipo de fôrma, visando evitar a degradação do material polimérico e possibilitando sua reutilização.

Após a preparação das armaduras e fôrmas, o concreto foi lançado com o auxílio de carrinho de mão e o adensamento mecânico foi realizado com vibrador de imersão com agulha de 25 mm de diâmetro. O concreto utilizado foi dosado em central e fornecido por meio de caminhão betoneira, facilitando o processo de concretagem e diminuindo a variabilidade das propriedades mecânicas, uma vez que todas as vigas e corpos de prova foram concretados de uma só vez. Assim, segundo a empresa que forneceu o concreto, este apresentou resistência à compressão nominal média de 30 MPa, traço 1:4,65:5 e fator a/c de 0,61, sendo fabricado utilizando-se 775,32 kg de cimento, 3609,09 kg de areia, 3875,91 kg de brita 1 (agregado graúdo com dimensão máxima característica de 19 mm), 6,2 litros de aditivo e 470 kg de água, totalizando 3,5 m<sup>3</sup> de concreto (consumo de cimento de 221,52 kg/m<sup>3</sup>).

Mazzú (2020) realizou ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*) segundo a ABNT NBR NM 67 (1998) no início e na metade da concretagem das vigas e produziu corpos

de prova cilíndricos de concreto (altura de 20 cm e diâmetro de 10 cm), de acordo com procedimentos de moldagem e cura da ABNT NBR 5738 (2015), para a determinação das propriedades mecânicas do concreto em idades pré-estabelecidas. A Figura 38 ilustra o processo de moldagem das vigas e corpos de prova de concreto.

**Figura 38: Fôrmas poliméricas com desmoldante (a); armaduras posicionadas nas fôrmas (b); espaçadores posicionados nas armaduras (c); moldes dos corpos de prova de concreto (d); ensaio de abatimento de tronco de cone (e); lançamento do concreto (d); adensamento do concreto (g) e desmoldagem das vigas (h)**



Fonte: Mazzú (2020)

A cura úmida das vigas e corpos de prova de concreto foi realizada durante um período de 7 dias após a moldagem, utilizando-se lona plástica para reduzir efeitos de retração do concreto pela evaporação da água. Após 7 dias de cura as vigas e corpos de prova de concreto foram desmoldados e armazenados em ambiente laboratorial.

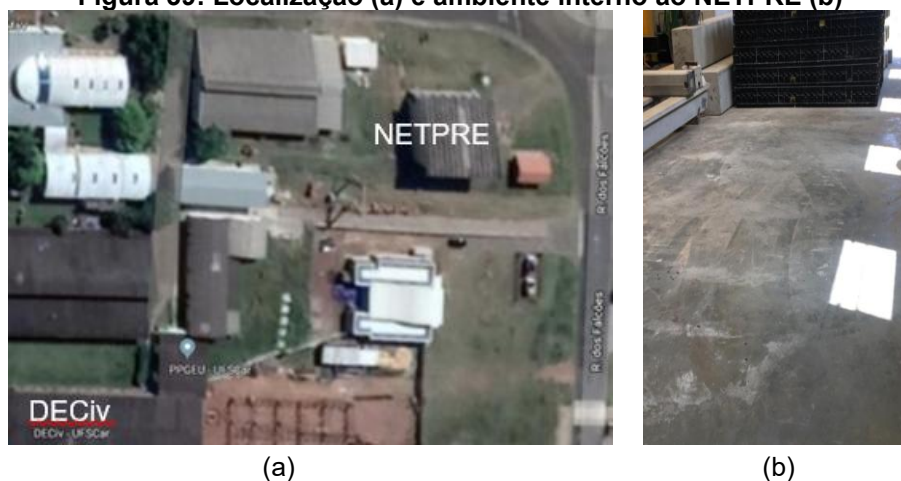
### **3.2.1.2 Ambientes de exposição**

Após a desmoldagem, Mazzú (2020) manteve as vigas e corpos de prova em ambiente laboratorial durante 45 dias, idade na qual foram realizados os ensaios de referência. Posteriormente, metade das vigas e dos corpos de prova remanescentes foi imersa em solução salina, enquanto a outra metade permaneceu no ambiente laboratorial. Nas idades

pré-estabelecidas, as vigas e os corpos de prova foram retirados dos respectivos ambientes de exposição e conduzidos para ensaio.

O ambiente laboratorial consistiu em um espaço interno e protegido, localizado no interior do Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto (NETPRE), da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), campus São Carlos, nas proximidades do Departamento de Engenharia Civil (DECiv), conforme apresentado na Figura 39.

**Figura 39: Localização (a) e ambiente interno ao NETPRE (b)**



Fonte: Mazzú (2020)

Embora o ambiente laboratorial fosse interno e protegido, não dispunha de controle climático artificial (climatização). Dessa forma, as vigas e corpos de prova submetidos a esse ambiente estiveram sujeitos às variações naturais de temperatura e umidade relativa do ar ao longo do período de exposição.

Para contextualizar as condições ambientais a que os corpos de prova foram submetidos, foram obtidos os dados climatológicos de temperatura e umidade relativa do ar junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2025). Os dados obtidos foram aferidos pelas Estação Automática A711, instalada no campus da UFSCar (latitude -21,98027777, longitude -47,88388888; altitude 859,29 m). A Figura 40 apresenta a distância entre o NETPRE e a Estação Climatológica, a qual é de aproximadamente 500 metros. Essa proximidade garante a representatividade dos dados registrados, refletindo com precisão as condições climáticas da região na qual estiveram armazenadas as vigas e corpos de prova, com variações mínimas no microclima local.

A Tabela 28 e a Figura 41 apresentam os dados climatológicos da cidade de São Carlos (SP), referentes ao período entre setembro de 2019 e fevereiro de 2022. Observa-se que, ao longo do período, a temperatura média mensal variou aproximadamente entre 16,8 °C e 24,2 °C, enquanto a umidade relativa oscilou entre 45,3 % e 82,7 %.

**Figura 40: Distância entre o NETPRE e a Estação climatológica da UFSCar**



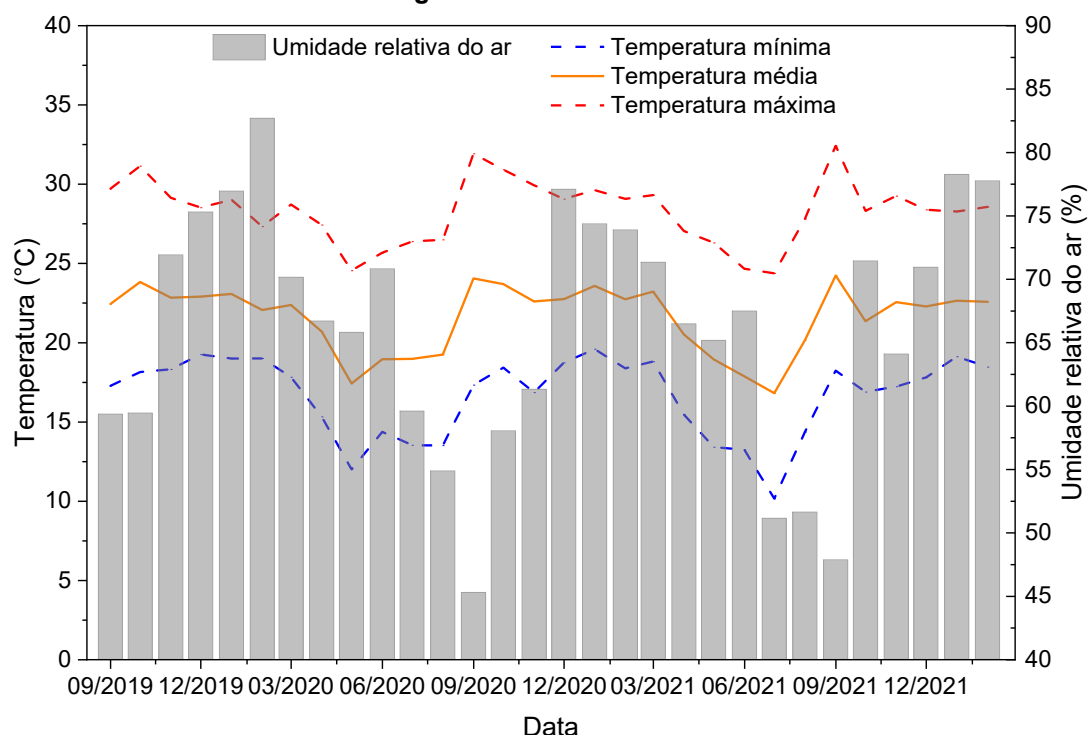
Fonte: Próprio autor

**Tabela 28: Dados climatológicos do período de exposição das vigas a ambiente laboratorial**

Ano-mês	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura média (°C)	Umidade relativa do ar (%)
2019-09	17,3	29,7	22,4	59,4
2019-10	18,1	31,1	23,8	59,4
2019-11	18,3	29,1	22,8	71,9
2019-12	19,3	28,5	22,9	75,3
2020-01	19,0	29,0	23,1	77,0
2020-02	19,0	27,3	22,1	82,7
2020-03	17,8	28,7	22,4	70,2
2020-04	15,3	27,4	20,7	66,7
2020-05	12,0	24,5	17,4	65,8
2020-06	14,4	25,7	19,0	70,8
2020-07	13,5	26,4	19,0	59,6
2020-08	13,5	26,5	19,2	54,9
2020-09	17,3	31,9	24,0	45,3
2020-10	18,4	30,9	23,7	58,1
2020-11	16,9	29,9	22,6	61,3
2020-12	18,7	29,1	22,7	77,1
2021-01	19,6	29,6	23,6	74,4
2021-02	18,4	29,1	22,7	73,9
2021-03	18,8	29,3	23,2	71,3
2021-04	15,5	27,0	20,5	66,5
2021-05	13,4	26,3	18,9	65,2
2021-06	13,2	24,7	17,9	67,5
2021-07	10,2	24,4	16,8	51,1
2021-08	14,4	27,8	20,2	51,6
2021-09	18,2	32,4	24,2	47,9
2021-10	16,9	28,3	21,3	71,4
2021-11	17,2	29,3	22,5	64,1
2021-12	17,8	28,4	22,3	70,9
2022-01	19,1	28,3	22,6	78,3
2022-02	18,5	28,6	22,6	77,8

Fonte: Adaptado de Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2025)

**Figura 41: Variação mensal média da temperatura e umidade relativa no período de exposição das vigas a ambiente laboratorial**



Fonte: Adaptado de Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2025)

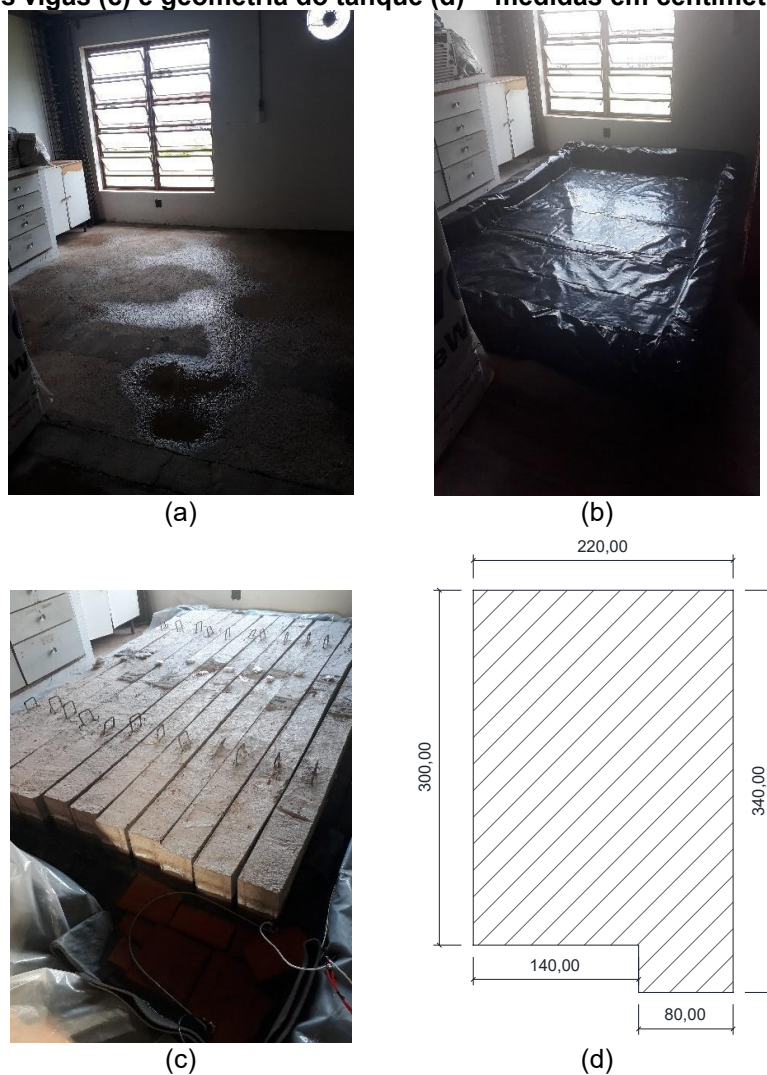
Com relação à exposição à solução salina, esta foi realizada por meio da imersão das vigas e dos corpos de prova em um tanque de acondicionamento contendo solução de NaCl com concentração de 3,5 %, mantida a uma temperatura de  $50 \pm 3$  °C. De acordo com Manalo *et al.* (2020b), essa concentração é representativa da salinidade da água do mar em ambientes marinhos. O ACI 440.9R (2015) recomenda, entre seus protocolos de acondicionamento acelerado, a imersão contínua de amostras de FRP em água potável com temperatura constante  $50 \pm 3$  °C por períodos entre 1000 e 10000 horas. Assim, tal protocolo foi adaptado para ser aplicado em vigas de concreto armado com barras de aço e de GFRP, utilizando-se solução salina, de forma a se analisar a durabilidade da armadura longitudinal quanto à ação de agente agressivo que comumente leva armaduras metálicas à corrosão (cloretos).

Mazzú (2020) confeccionou o tanque de acondicionamento em uma área interior à Oficina Mecânica do DECiv da UFSCar (Figura 42), utilizando blocos cerâmicos com altura de 20 cm justapostos, não argamassados, cobertos com lona plástica.

A solução foi preparada gradativamente, diluindo-se 350 g de NaCl em 10 litros de água, com o auxílio de recipientes plásticos. Assim, o tanque de acondicionamento foi preenchido com solução até atingir altura de lâmina d'água de 12 cm. As vigas foram posicionadas sobre blocos cerâmicos com espessura de 4 cm na região dos apoios, com a solução envolvendo as vigas até uma altura de 8 cm. O volume total de solução utilizada foi

de aproximadamente 550 litros. Devido a uma limitação do espaço disponível para montagem do tanque, as vigas foram posicionadas próximas umas das outras, com distâncias de 1 a 2 centímetros entre as faces laterais. O nível da solução foi ajustado diariamente com adição de água e a concentração da solução foi periodicamente corrigida.

**Figura 42: Local da montagem do tanque (a); tanque de acondicionamento (b); posicionamento das vigas (c) e geometria do tanque (d) – medidas em centímetros**



Fonte: Mazzú (2020)

Para o aquecimento e manutenção da temperatura da solução salina foram utilizados uma resistência de imersão de 2000 W e um termostato de 30 A, tal como apresentado na Figura 43. Esse sistema de aquecimento foi imerso na solução e apoiado sobre blocos cerâmicos de 4 cm, evitando seu contato direto com a lona plástica. Para minimizar a evaporação da água, o tanque foi coberto com lona plástica.

A temperatura da solução salina foi conferida semanalmente com o auxílio de termômetro digital, conforme apresentado na Figura 44, na qual se pode observar a temperatura homogênea em toda a extensão do tanque.

**Figura 43: Sistema de aquecimento**

Fonte: Mazzú (2020)

**Figura 44: Medida da temperatura nos quatro cantos do tanque**

Fonte: Mazzú (2020)

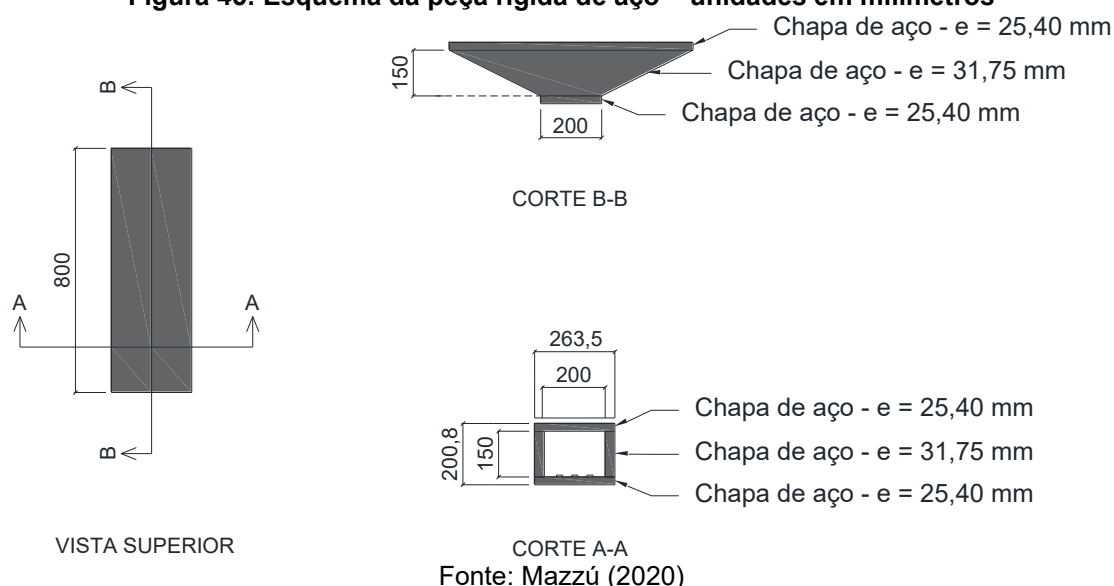
### 3.2.1.3 Ensaio de flexão em três pontos

Após a exposição aos ambientes descritos, as vigas de concreto armado foram submetidas a ensaio de flexão em três pontos para a determinação de sua capacidade resistente, ductilidade, rigidez, modos de ruptura e deformações no concreto e na armadura longitudinal. Este ensaio consiste em submeter vigas bi apoiadas à carregamento gradativo aplicado a meio vão, até que se atinja a ruína do elemento.

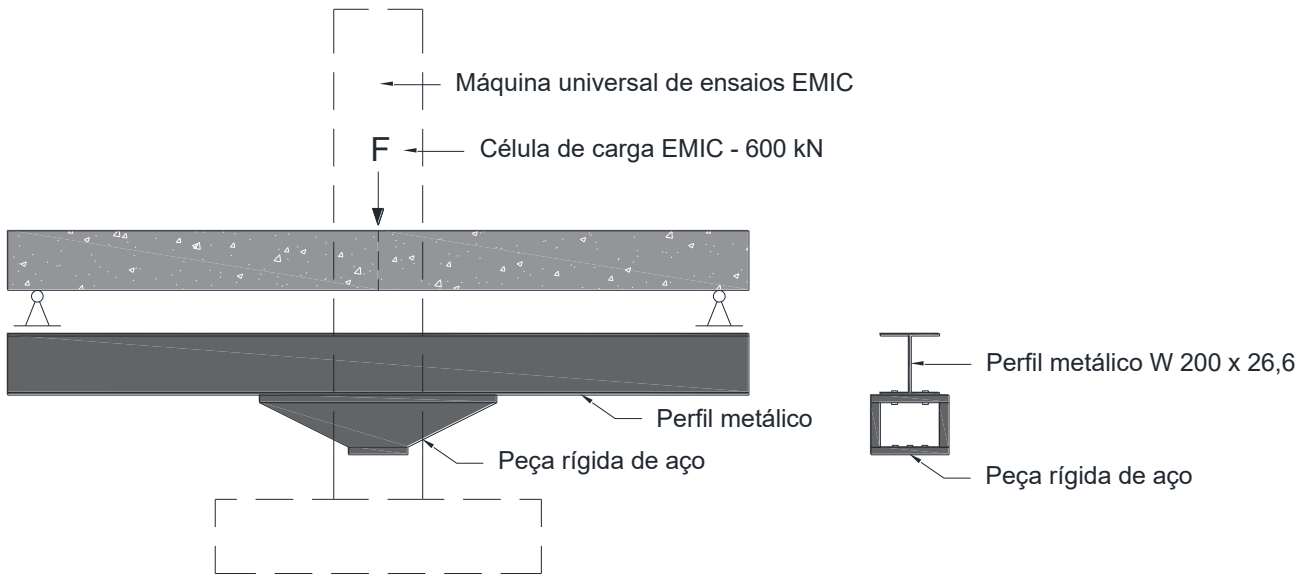
Assim, os ensaios realizados por Mazzú (2020) e os ensaios realizados no âmbito deste trabalho foram realizados no Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) da UFSCar, utilizando-se uma máquina de ensaios universal da marca EMIC, modelo DL 60000, com célula de carga de capacidade máxima igual a 600 kN e resolução de leitura de 0,1 kN. O controle de deslocamentos foi realizado por transdutor interno à máquina de ensaios, atuando a uma velocidade de 1 mm/min.

Para o posicionamento das vigas na máquina de ensaios foi necessária a utilização de um dispositivo composto por uma peça rígida, fabricado com chapas de aço com espessura de 31,75 mm e 25,40 mm, o qual serviu de apoio para um perfil metálico do tipo W200 x 26,6 cm, com comprimento de 250 cm. A fixação do perfil metálico na parte superior da peça rígida foi feita utilizando-se 8 parafusos sextavados de aço, do tipo M10. Já a fixação da peça rígida na máquina de ensaios foi feita utilizando-se 6 parafusos sextavados de aço, do tipo M12. A Figura 45, Figura 46 e Figura 47 apresentam esquemas do dispositivo e a Figura 48 apresenta a configuração final com posicionamento o de uma viga de concreto armado. Segundo Mazzú (2020), este dispositivo tem como objetivo apoiar as vigas durante o ensaio e exercer sobre a vigas esforços contrários aos aplicados pela máquina de ensaios.

**Figura 45: Esquema da peça rígida de aço – unidades em milímetros**



**Figura 46: Esquema do dispositivo de aço para apoio das vigas**



Fonte: Mazzú (2020)

**Figura 47: Fixação do dispositivo na máquina de ensaios**

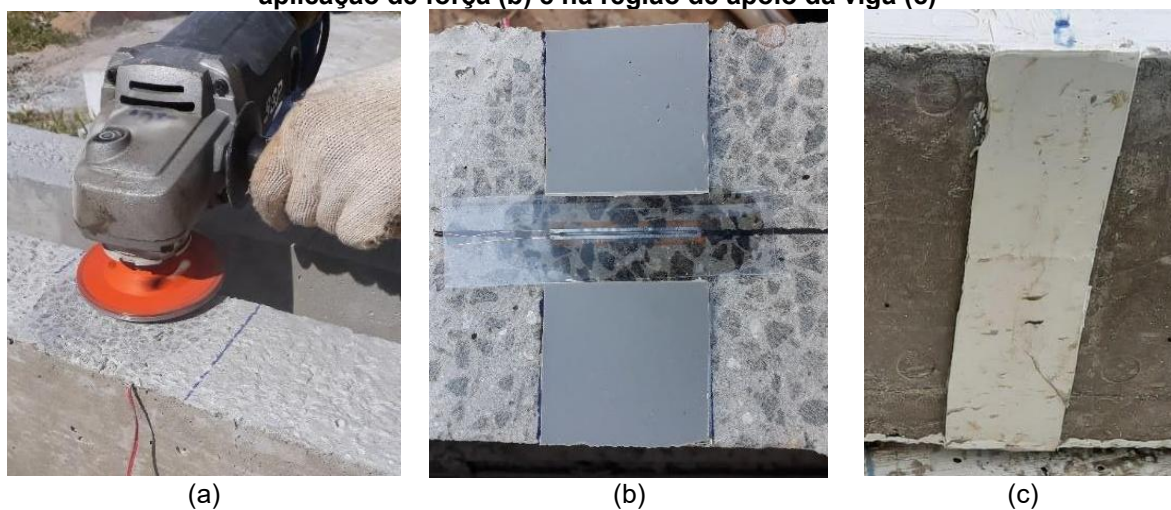


Fonte: Mazzú (2020)

**Figura 48: Configuração de ensaio de flexão de três pontos**

Fonte: Mazzú (2020)

A superfície de concreto das vigas foi nivelada na região dos apoios e no ponto de aplicação de força, utilizando-se esmerilhadeira com disco diamantado e massa plástica, visando a transferência de esforços de maneira uniforme, tal como apresentado na Figura 49.

**Figura 49: Lixamento da superfície da viga (a) e aplicação de massa plástica no ponto de aplicação de força (b) e na região de apoio da viga (c)**

(a)

(b)

(c)

Fonte: Mazzú (2020)

Durante os ensaios, além da célula de carga interna à máquina de ensaios, foi utilizada ainda uma célula de carga externa, com capacidade de 200 kN. Desta forma, a força aplicada foi duplamente aferida para garantir a obtenção dos resultados ainda que uma das células

apresentasse problema. Para garantir a transferências de forças de maneira uniforme, foi utilizada uma peça metálica sobre a massa plástica aplicada na face superior da viga e uma chapa metálica sob a célula de carga externa, conforme ilustrado na Figura 50. Assim, a superfície da célula de carga externa manteve contato completo com a superfície onde a força foi aplicada (chapa metálica). A peça metálica disposta sobre a camada de massa plástica, a qual serviu de apoio para a chapa metálica, apresentou uma reentrância na região central, de forma a se evitar a danificação da instrumentação instalada na região (Figura 49b).

**Figura 50: Ponto de aplicação da força na face superior da viga, a meio vão**



Fonte: Próprio autor

Para facilitar a visualização e a marcação das fissuras ao longo dos ensaios, foi aplicada uma camada de tinta branca na superfície das vigas. Ressalta-se que as vigas mantidas em tanque com solução salina foram retiradas do tanque, preparadas e posicionadas na máquina de ensaios dentro de um período de 5 horas.

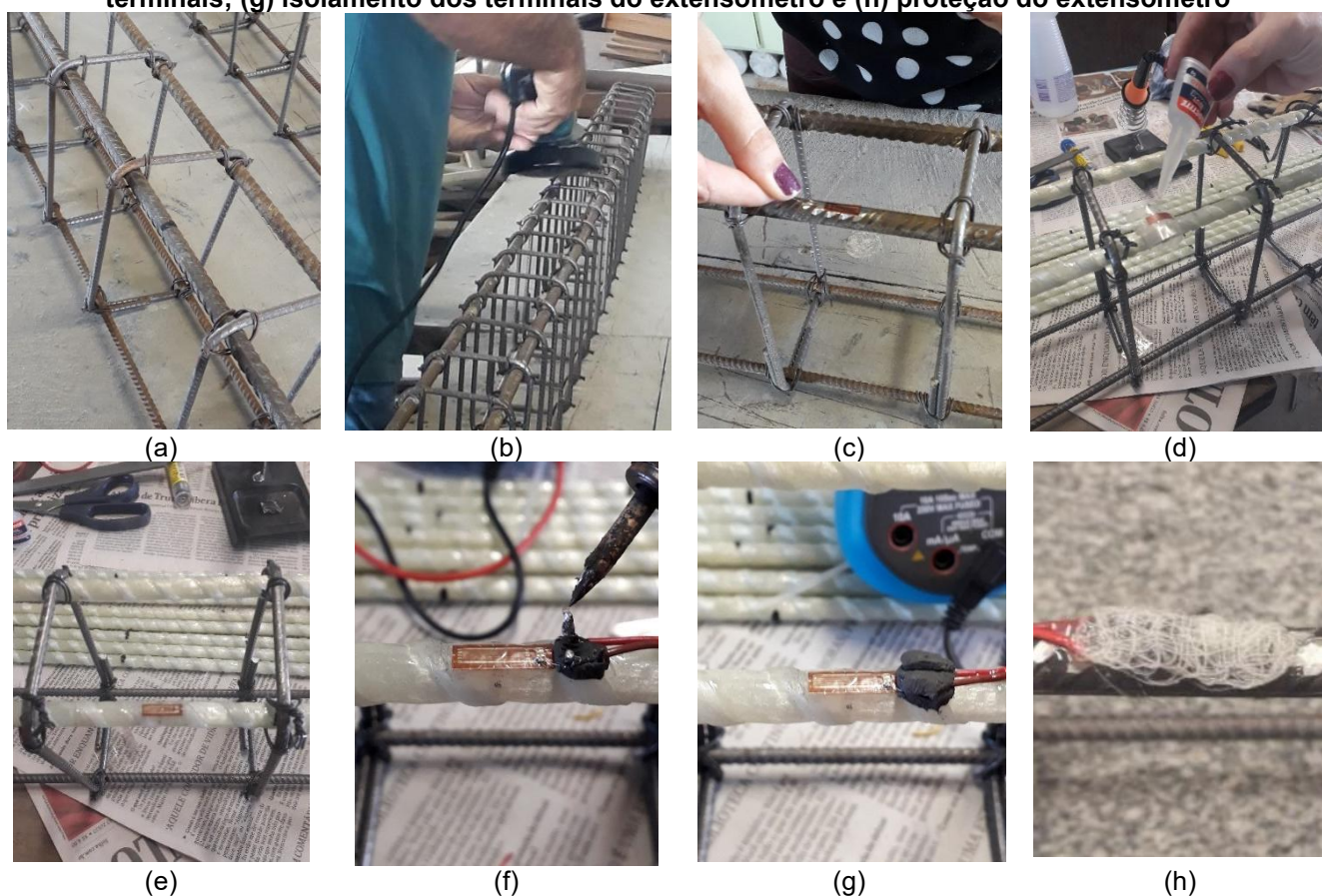
#### **3.2.1.4 Instrumentação**

A instrumentação das vigas baseou-se no uso de LVDTs (Transdutor de Deslocamento Variável Linear - *Linear Variable Differential Transformer*) e SGs (Extensômetros Elétricos - *Strain Gauge*), os quais foram responsáveis pela leitura dos deslocamentos e deformações, respectivamente. Para o registro dos dados, os LVDTs e SGs foram conectados a um aquisitor de dados da LYNX Tecnologia, modelo ADS-2000.

Os SGs foram utilizados para medição das deformações no concreto comprimido e na armadura tracionada. Em cada viga, foi aplicado um SG do tipo KFG-10-120-C1-11 (KYOWA

- resistência de  $120 \Omega$  e comprimento da grade de leitura de 10 mm) no centro de uma das barras da armadura longitudinal positiva. Para isso, o centro da barra foi previamente marcado com pincel atômico e trena; em seguida, a superfície foi lixada no ponto de instalação para regularização da área de colagem (com esmerilhadeira e disco diamantado, no caso das barras de aço, e lixa comum, no caso das barras de GFRP). O SG foi colado com adesivo instantâneo, e fios foram soldados aos seus terminais utilizando ferro de solda e estanho. Posteriormente, os contatos foram isolados com massa para calafetar, e o sistema foi protegido contra a umidade com aplicação de gaze e cola epóxi. A Figura 51 apresenta o passo a passo da instalação dos SGs nas armaduras.

**Figura 51: (a) Marcação do centro da armadura; (b) lixamento da superfície da barra; (c) posicionamento do extensômetro; (d-e) colagem do extensômetro; (f) soldagem do fio aos terminais; (g) isolamento dos terminais do extensômetro e (h) proteção do extensômetro**



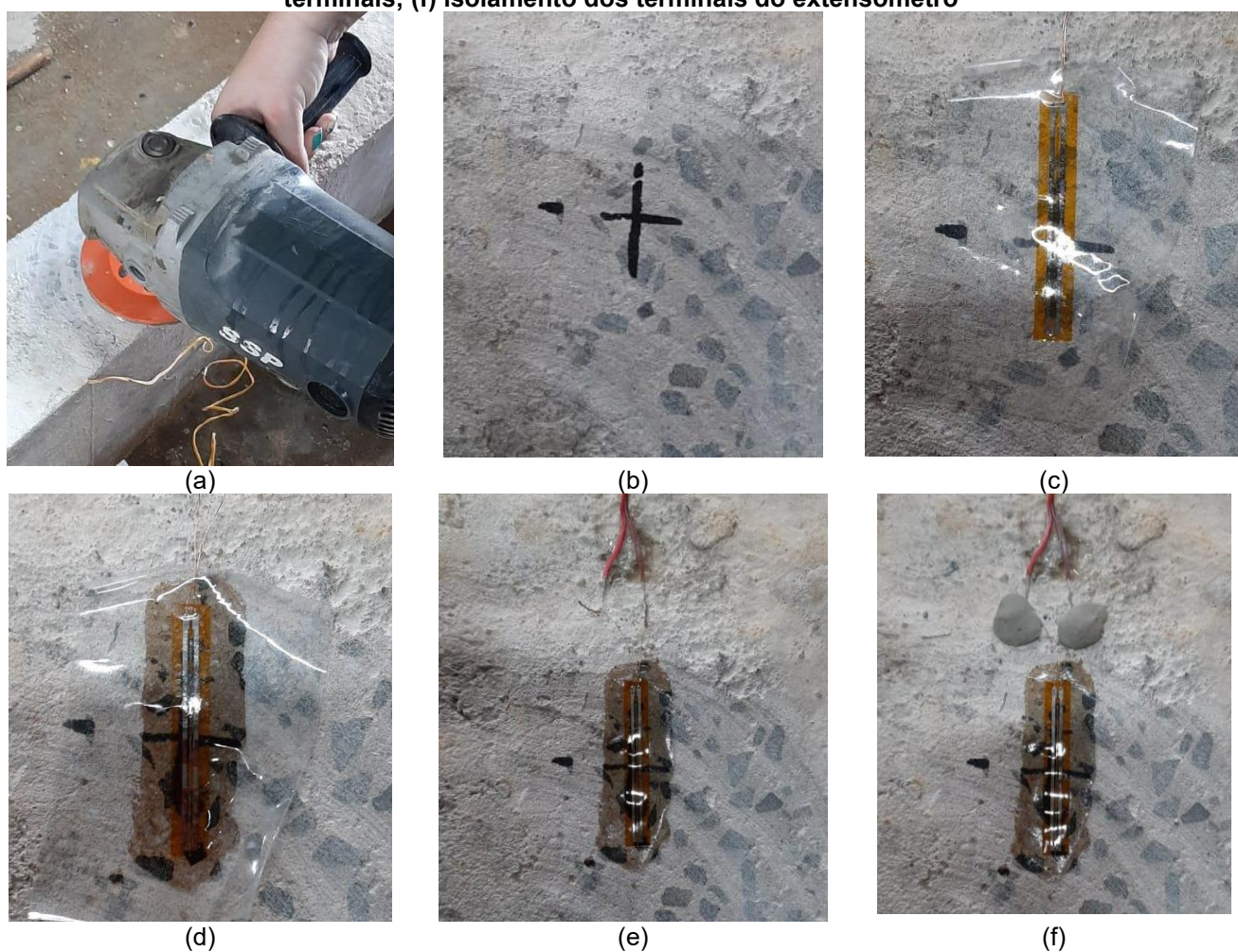
Fonte: Mazzú (2020)

Na face superior de cada viga, no meio do vão, foi instalado um SG para leitura das deformações no concreto comprimido. Foram utilizados SGs do tipo BX120-50AA (resistência de  $120 \Omega$  e comprimento da grade de leitura de 50 mm) ou do tipo PA-06-1500-BA-120 (Excel Sensores - resistência de  $120 \Omega$  e comprimento da grade de leitura de 40 mm). Para a aplicação, a superfície do concreto foi inicialmente regularizada com esmerilhadeira e disco diamantado e, em seguida, limpa com álcool para remoção dos resíduos de lixamento. O

ponto de aplicação foi marcado com o auxílio de trena e pincel atômico, e o SG foi colado com adesivo epóxi. Fios foram soldados aos terminais do SG com ferro de solda e estanho, e posteriormente os contatos foram isolados com massa para calafetar. A Figura 52 apresenta os procedimentos adotados para a aplicação dos SGs.

A Figura 53 ilustra o posicionamento dos SGs no concreto e na armadura longitudinal positiva, sendo SG1 os responsáveis pela leitura das deformações no concreto comprimido e SG2 os responsáveis pela leitura das deformações na armadura tracionada.

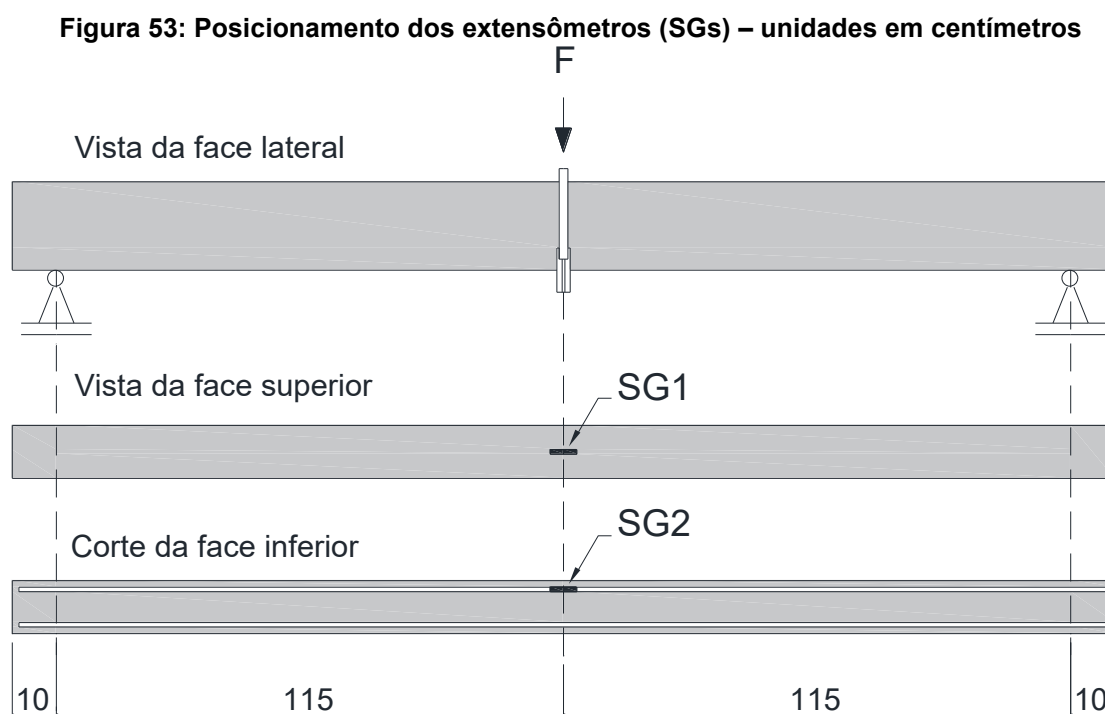
**Figura 52: (a) Regularização da superfície; (b) marcação do ponto de aplicação; (c) posicionamento do extensômetro; (d) colagem do extensômetro; (e) soldagem do fio aos terminais; (f) isolamento dos terminais do extensômetro**



Fonte: Próprio autor

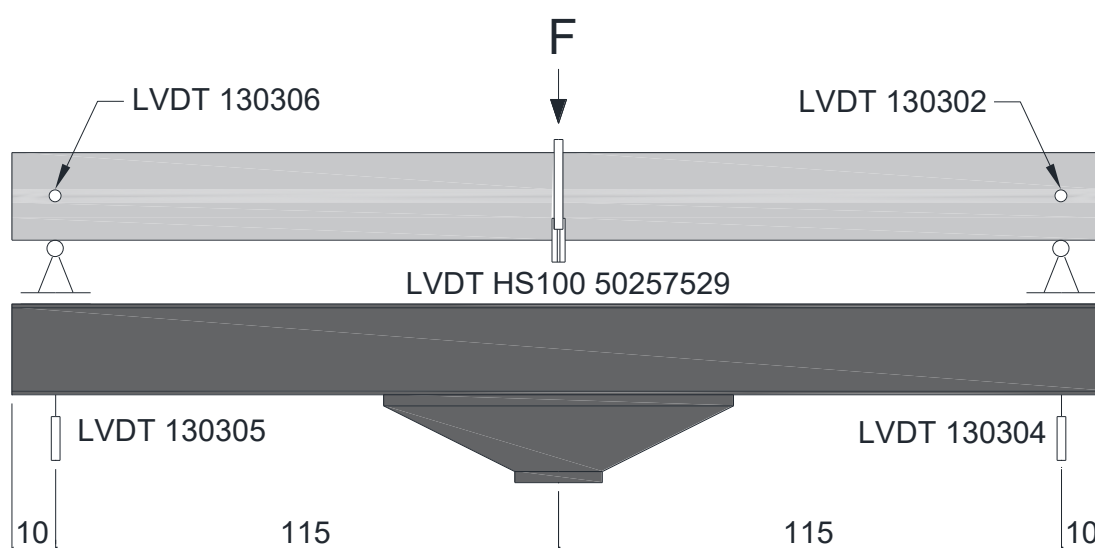
Para a aferição do deslocamento vertical no meio do vão das vigas, foi utilizado um LVDT (HS100 50257529) com campo de leitura de 100 mm e precisão de  $\pm 0,01$  mm, fixado a um suporte externo à máquina de ensaios. Para mensurar o deslocamento vertical do perfil metálico que serviu de apoio às vigas de concreto, foram empregados dois LVDTs (130305 e 130304) com campo de leitura de 25 mm e precisão de  $\pm 0,01$  mm, posicionados nas extremidades do perfil. Como o perfil metálico permaneceu em balanço durante os ensaios,

esses deslocamentos foram registrados para posterior correção do deslocamento medido no meio do vão das vigas. Além disso, utilizaram-se LVDTs adicionais (130306 e 130302), também com campo de leitura de 25 mm e precisão de  $\pm 0,01$  mm, para aferição da rotação das vigas na região dos apoios. Esses sensores foram posicionados na face lateral das vigas, à meia altura da seção transversal. A Figura 54 e Figura 55 apresentam o posicionamento dos LVDTs utilizados.



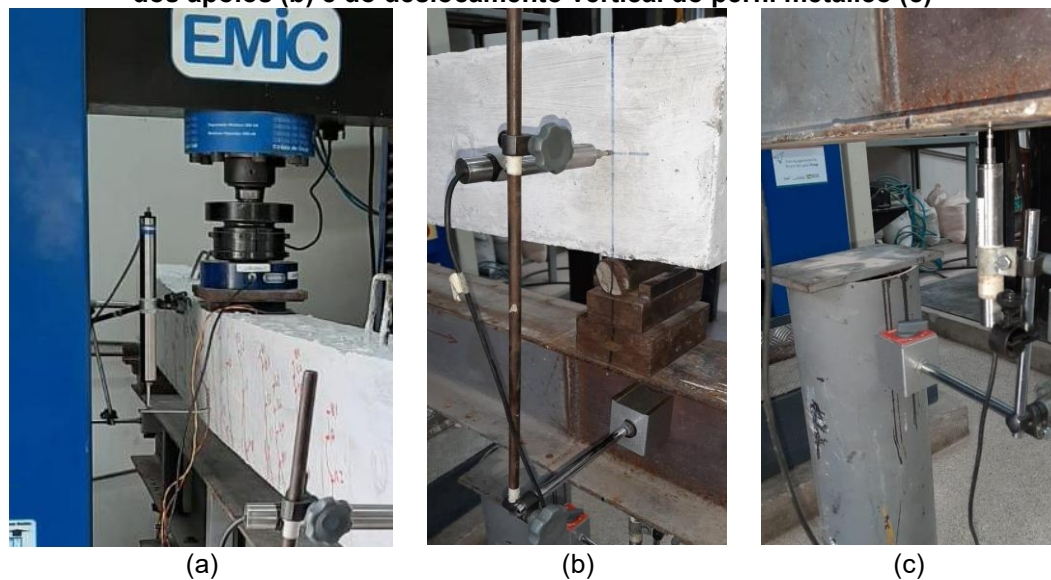
Fonte: Adaptado de Mazzú (2020)

**Figura 54: Posicionamento dos transdutores de deslocamento (LVDTs) – unidades em centímetros**



Fonte: Adaptado de Mazzú (2020)

**Figura 55: Posicionamento dos LVDTs para aferição do deslocamento vertical (a), da rotação dos apoios (b) e do deslocamento vertical do perfil metálico (c)**



Fonte: Próprio autor

### 3.2.2 CORPOS DE PROVA

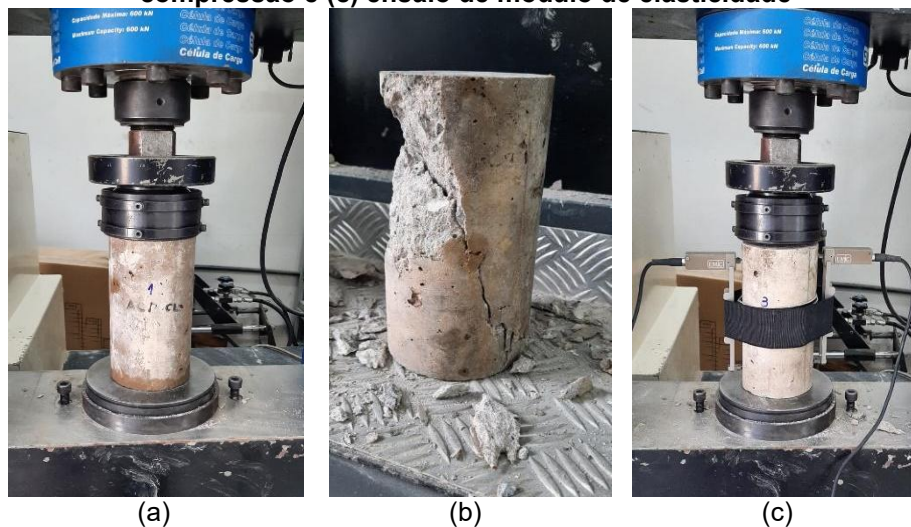
Os materiais utilizados foram submetidos a ensaios para caracterização de suas propriedades mecânicas. Tais ensaios também foram realizados no Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) da UFSCar, utilizando-se máquina de ensaios universal da marca EMIC, modelo DL 60000, com célula de carga com capacidade máxima de 600 kN e resolução de leitura de 0,1 kN.

#### 3.2.2.1 Concreto

Os corpos de prova de concreto foram submetidos a ensaios para determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, conforme os procedimentos estabelecidos nas normas ABNT NBR 5739 (2018) e ABNT NBR 8522 (2017). Para cada idade e ambiente de exposição, foram ensaiados três corpos de prova. Inicialmente, um corpo de prova foi submetido ao ensaio de compressão axial, e o resultado obtido serviu de referência para o ensaio de módulo de elasticidade dos outros dois corpos de prova restantes. Ao final desses ensaios, os corpos de prova utilizados para determinação do módulo de elasticidade também foram levados à ruptura por compressão.

Os corpos de prova foram retirados dos ambientes de exposição nas idades de ensaio e passaram por processo de retificação com molhagem superficial, a fim de regularizar a superfície de aplicação de carregamento, sendo encaminhados para ensaio em seguida. Durante os ensaios de módulo de elasticidade, foram utilizados extensômetros eletrônicos da marca EMIC, com comprimento de leitura de 150 mm e faixa de medição entre 0,0001 e 2,5 mm. A Figura 56 ilustra a execução dos ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade nos corpos de prova de concreto.

**Figura 56: (a) Ensaio de compressão axial, (b) corpo de prova de concreto após ensaio de compressão e (c) ensaio de módulo de elasticidade**

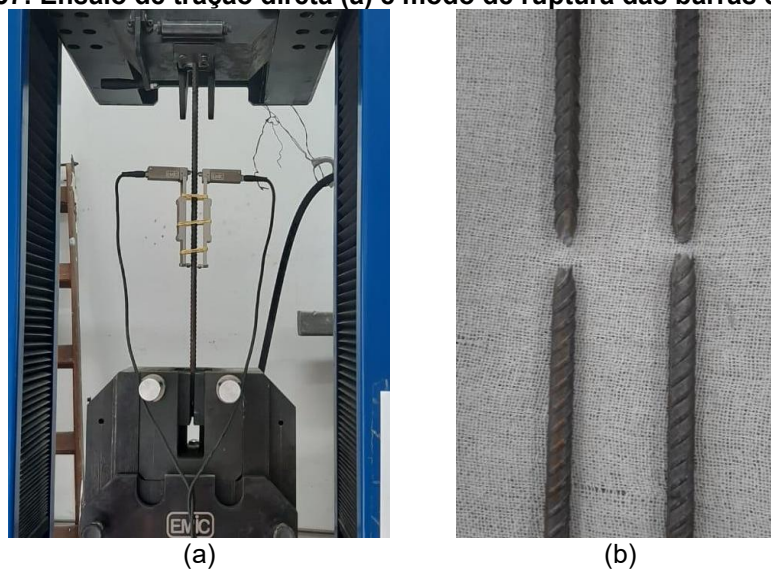


Fonte: Próprio autor

### 3.2.2.2 Aço

As propriedades mecânicas das armaduras de aço foram determinadas por meio de ensaio de tração direta, conforme as recomendações da ABNT NBR 6892-1 (2018). Dessa forma, foram ensaiadas duas amostras de barras com comprimento de 60 cm e diâmetro nominal de 10 mm para cada idade e ambiente de exposição, a fim de determinar o comportamento tensão-deformação e o módulo de elasticidade. Utilizou-se, para isso, extensômetro eletrônico da marca EMIC, com comprimento de leitura de 150 mm e faixa de medição entre 0,0001 e 2,5 mm, posicionado no centro das barras de aço com o auxílio de elásticos de látex. A Figura 57 ilustra o ensaio de tração direta realizado nas barras de aço.

**Figura 57: Ensaio de tração direta (a) e modo de ruptura das barras de aço (b)**



Fonte: Mazzú (2020)

### 3.2.2.3 GFRP

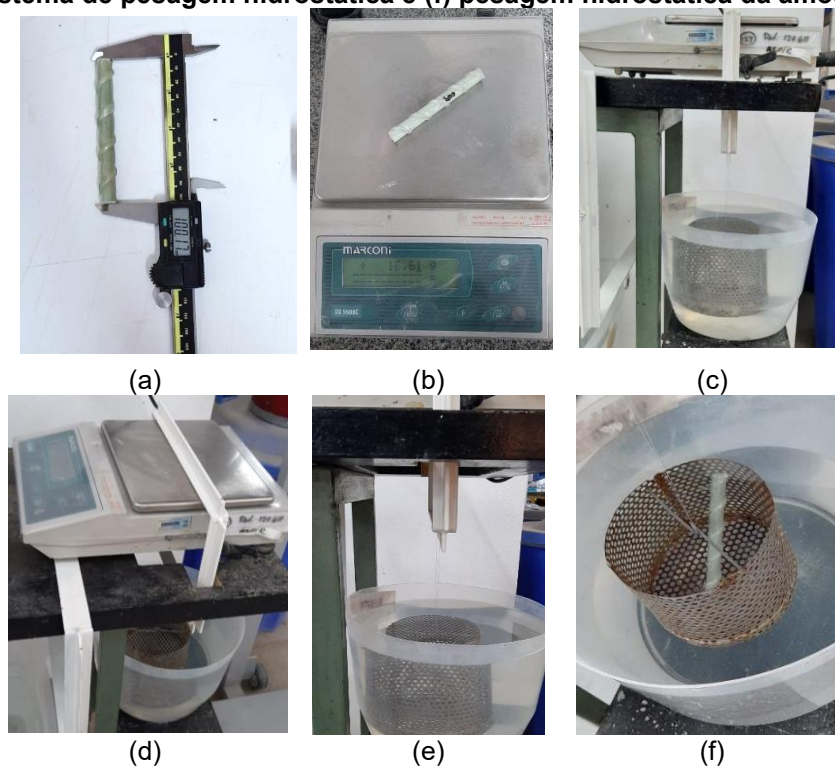
#### 3.2.2.3.1 Determinação do diâmetro efetivo

Foi realizado ensaio para determinação da área efetiva e do diâmetro efetivo das barras de GFRP, parâmetros necessários para o cálculo da resistência à tração das barras. Ensaíram-se 5 corpos de prova com comprimento de 100 mm, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 17201-2 (2025). O comprimento de cada corpo de prova foi medido em 3 pontos distintos com o auxílio de paquímetro digital, obtendo-se o comprimento médio ( $l$ ). Em seguida, aferiu-se a massa aparente do corpo de prova ao ar ( $m_1$ ) e, posteriormente, sua massa aparente quando imerso em água ( $m_2$ ), utilizando balança digital. O diâmetro efetivo ( $\phi_{ef}$ ) foi calculado por meio da Equação 83, considerando a densidade da água ( $\rho$ ) igual a 1 mg/mm<sup>3</sup>. A área efetiva ( $A_{ef}$ ) foi determinada com base na Equação 84. A Figura 58 ilustra a metodologia aplicada para a obtenção da área e do diâmetro efetivos.

$$\phi_{ef} = \sqrt{\frac{4 \cdot (m_1 - m_2)}{\pi \cdot \rho \cdot l}} \quad (83)$$

$$A_{ef} = \frac{\pi \cdot \phi_{ef}^2}{4} \quad (84)$$

**Figura 58: (a) Medição da amostra com paquímetro digital, (b) pesagem da amostra, (c-e) sistema de pesagem hidrostática e (f) pesagem hidrostática da amostra**

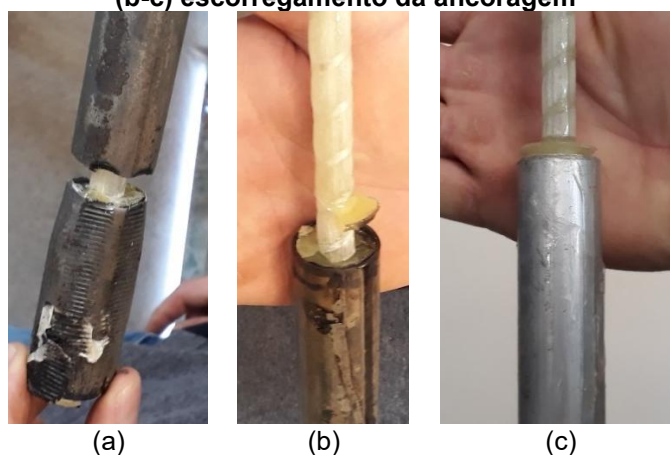


Fonte: Próprio autor

### 3.2.2.3.2 Determinação das propriedades mecânicas

Diferentemente dos ensaios de tração realizados em amostras de aço, nas barras de GFRP é necessária a utilização de ancoragens nas extremidades para evitar o esmagamento. A pesquisa realizada anteriormente (Mazzú, 2020), realizada antes da publicação das diretrizes nacionais para ensaios de tração em barras de GFRP (Prática Recomendada CT 303, 2021; ABNT NBR 17201-3, 2025), apresentou dificuldades para o estabelecimento de uma metodologia de ensaio capaz de provocar a ruptura das barras. Ensaios piloto foram realizados utilizando resina epoxídica e tubos de aço e alumínio com diâmetros de 15 e 25 mm nas ancoragens; entretanto, não foi possível alcançar a ruptura das barras, sendo observado o escorregamento da resina epoxídica no interior do tubo de aço e a ruptura do próprio tubo, conforme ilustrado na Figura 59. A continuidade da pesquisa iniciada por Mazzú (2020) demandou a manutenção e o aprimoramento da metodologia adotada, com a realização de novos ensaios piloto, visando garantir a obtenção confiável das propriedades mecânicas das barras de GFRP.

**Figura 59: Ensaio piloto de tração realizado nas amostras de GFRP: (a) ruptura do tubo de aço, (b-c) escorregamento da ancoragem**

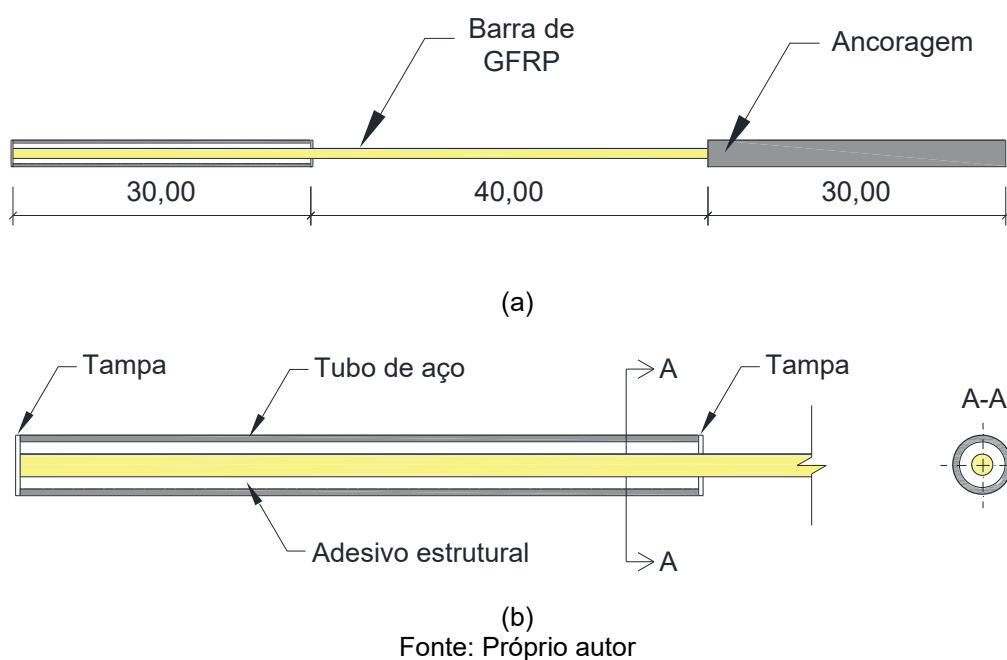


Fonte: Mazzú (2020)

Devido à pandemia de COVID-19, que resultou no fechamento dos laboratórios por mais de um ano, a realização de novos ensaios piloto para adaptação da metodologia sofreu grande atraso, comprometendo a correlação das amostras de GFRP com as idades de ensaio das vigas de concreto armado. Com a reabertura dos laboratórios e a publicação das diretrizes nacionais, foram realizados novos ensaios piloto para consolidar a configuração das amostras e o esquema de ensaio a ser utilizado na próxima etapa experimental deste trabalho. Dessa forma, as propriedades mecânicas das barras de GFRP foram determinadas por meio de ensaio de tração direta, realizado conforme as recomendações da Prática Recomendada CT 303 (2021) e da ABNT NBR 17201-3 (2025). Para as ancoragens, foram utilizados tubos de aço *Schedule 40* com diâmetro externo de 26,7 mm e comprimento de 300 mm, aderidos às

armaduras com adesivo estrutural do tipo *Compound* de média fluidez ou resina epoxídica S&P Resin 50. Recomenda-se que o comprimento livre entre ancoragens não seja inferior à 40 vezes o diâmetro da barra. Assim, considerando que as barras de GFRP apresentaram diâmetro nominal de 10 mm, optou-se por um comprimento livre de 400 mm, totalizando um comprimento de 1000 mm quando somadas as duas ancoragens de 300 mm, conforme apresentado na Figura 60.

**Figura 60: (a) Esquema da amostra de GFRP e (b) detalhe da ancoragem – unidades em centímetros**



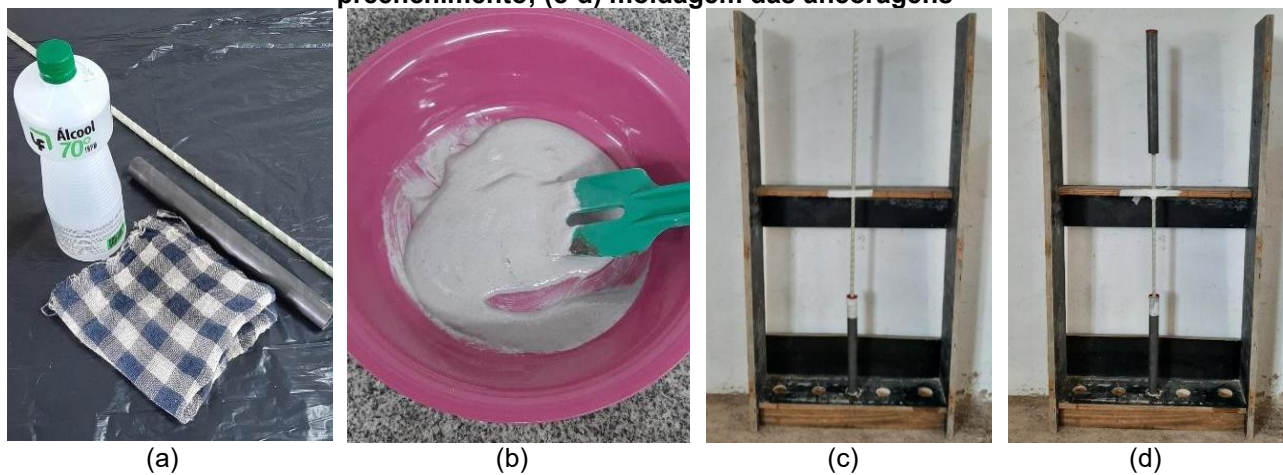
Para a moldagem das amostras, o adesivo estrutural e a resina epoxídica foram vertidos no interior dos tubos de aço posicionados na vertical, utilizando-se um gabinete de madeira como suporte do conjunto. Foram empregados centralizadores circulares nas extremidades dos tubos de aço para conter o material de preenchimento e garantir o posicionamento centralizado das barras no interior dos tubos. Após a cura da primeira extremidade, as barras foram invertidas no gabinete para a preparação das outras extremidades. A Figura 61 ilustra a preparação das amostras.

Para os ensaios de tração uniaxial das barras de GFRP, utilizou-se um extensômetro eletrônico da marca EMIC, com comprimento de leitura de 150 mm e faixa de medição entre 0,0001 e 2,5 mm. A Figura 62 apresenta a execução de um ensaio de tração uniaxial em uma amostra de barra de GFRP.

A resistência à tração ( $f_t$ ) da barra de GFRP foi calculada pela razão entre a força máxima atingida ( $P$ ), em N, e a área efetiva da seção transversal, em  $\text{mm}^2$  (Equação 85). O módulo de elasticidade ( $E_t$ ), em MPa, foi calculado por meio da Equação 86, na qual  $P_1$  e  $P_2$

são as forças, em N, correspondentes às deformações de 0,003 e 0,001 ( $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$ ), respectivamente.

**Figura 61: (a) Preparação da barra de GFRP e do tubo de aço; (b) preparação do material de preenchimento; (c-d) moldagem das ancoragens**



Fonte: Próprio autor

**Figura 62: Execução de um ensaio de tração direta em amostra de barra de GFRP**



Fonte: Próprio autor

$$f_t = \frac{P}{A_{ef}} \quad (85)$$

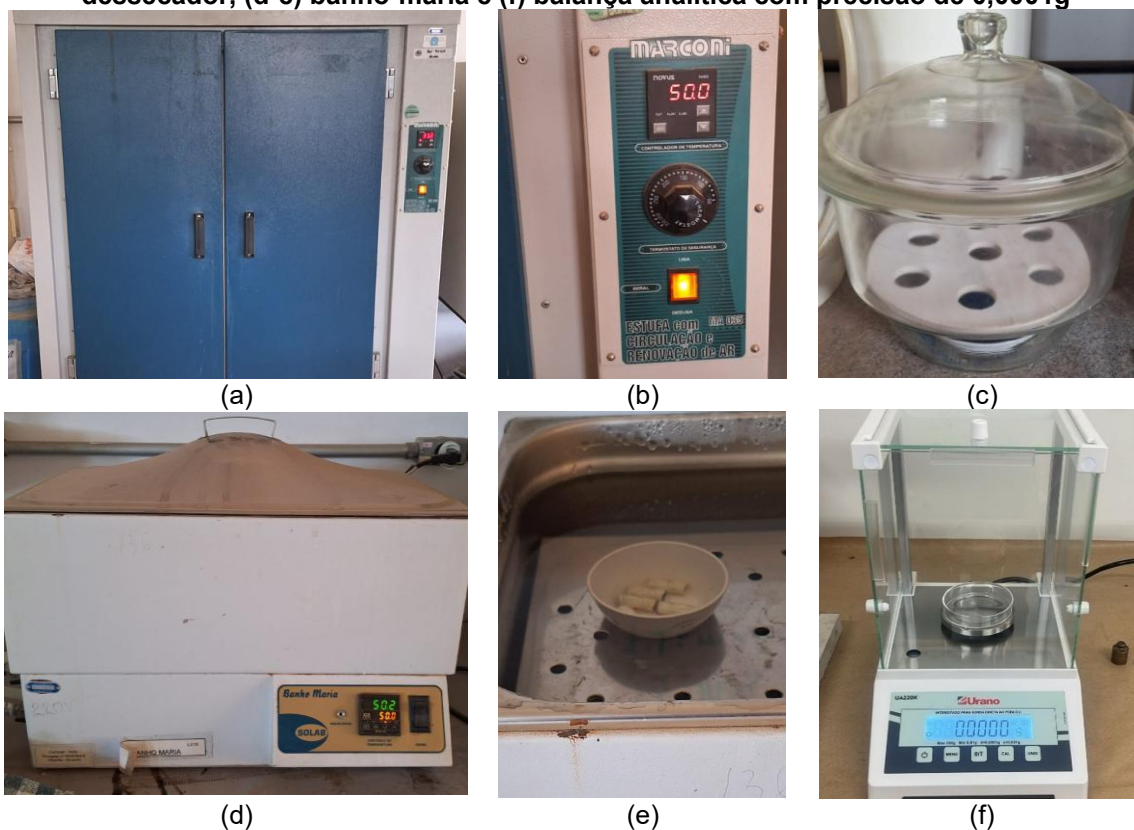
$$E_f = \frac{(P_1 - P_2)}{(\epsilon_1 - \epsilon_2) \cdot A_{ef}} \quad (86)$$

### 3.2.2.3.3 Absorção de água

Foi realizado ensaio de curta duração para determinação a absorção de água (imersão por 24 horas) em amostras de barras de GFRP de referência, conforme os procedimentos da ABNT NBR 17201-11 (2025). Para isso, cinco amostras com comprimento de 25 mm foram submetidas à secagem em estufa a 50 °C por 24 horas. Em seguida, as amostras foram retiradas da estufa e mantidas em dessecador até atingirem a temperatura ambiente, sendo então pesadas em balança com precisão de 0,0001 g para determinação da massa seca ( $m_{seca}$ ). Posteriormente, as amostras foram imersas em água destilada a  $50 \pm 3$  °C durante 24 horas. Após esse período, foram retiradas, secas superficialmente e novamente pesadas com precisão de 0,0001 g, obtendo-se a massa úmida ( $m_{24h}$ ). A variação de massa após 24 horas de imersão foi calculada conforme a Equação 87. O ensaio de absorção foi conduzido no Laboratório de Materiais e Componentes (LMC) da UFSCar, utilizando-se banho-maria para a imersão, estufa ventilada, dessecador e balança analítica com precisão de 0,0001 g (Figura 63).

$$\text{Variação da massa em 24 horas (\%)} = \frac{m_{24h} - m_{seca}}{m_{seca}} \cdot 100 \quad (87)$$

**Figura 63: Equipamentos utilizados no ensaio de absorção: (a-b) estufa ventilada, (c) dessecador, (d-e) banho-maria e (f) balança analítica com precisão de 0,0001g**

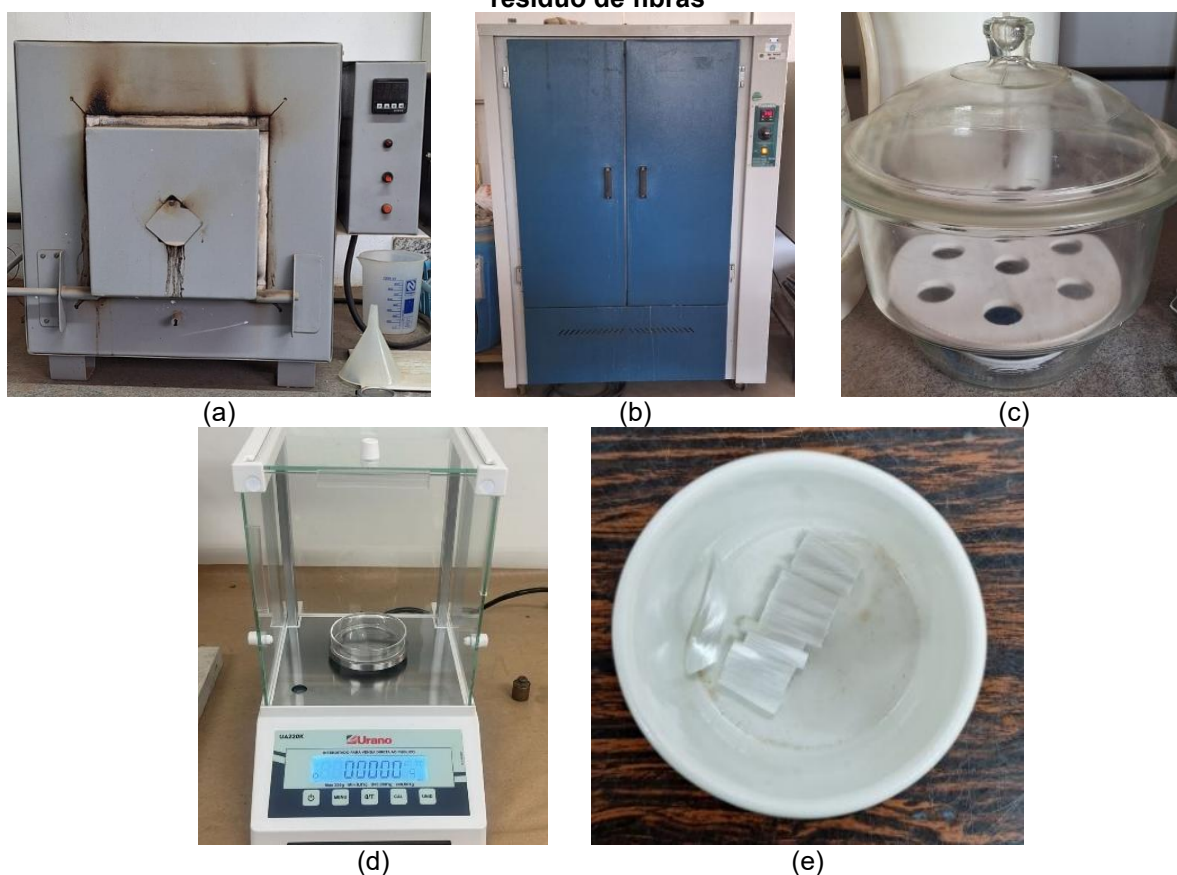


Fonte: Próprio autor

### 3.2.2.3.4 Teor de fibras

Foi realizado ensaio para determinação do teor de fibras das barras de GFRP na condição de referência (sem acondicionamento prévio), seguindo o método da combustão descrito na ABNT NBR 17201-10 (2025). Para isso, foram utilizadas cinco amostras com massa entre 2 e 10 g, bem como cadinhos de porcelana. Inicialmente, os cadinhos foram mantidos em mufla à 600 °C por 10 minutos, resfriados em dessecador contendo sílica e pesados em balança analítica digital com precisão de 0,0001 g, para obtenção da massa dos cadinhos vazios ( $m_1$ ). Em seguida, uma amostra foi disposta em cada cadinho, e os conjuntos foram levados à estufa a 50 °C por 24 horas para secagem. Após esse período, os cadinhos foram novamente resfriados em dessecador e pesados, obtendo-se a massa do cadinho com a amostra seca ( $m_2$ ). Posteriormente, os conjuntos foram mantidos em mufla a 565 °C por 6 horas, para que toda a matriz polimérica fosse queimada, restando apenas as fibras de vidro. Após o resfriamento em dessecador até a temperatura ambiente, os cadinhos foram novamente pesados, obtendo-se a massa do cadinho com o resíduo de fibras ( $m_3$ ). A Figura 64 apresenta os equipamentos e procedimentos utilizados na determinação do teor de fibras. Foram utilizados a mufla, dessecador, estufa e balança do LMC da UFSCar.

**Figura 64: Equipamentos utilizados para a determinação do teor de fibras pelo método da combustão: (a) mufla, (b) estufa, (c) dessecador, (d) balança analítica e (e) cadinho com o resíduo de fibras**



Fonte: Próprio autor

O teor de fibras de vidro ( $M_{\text{fibra}}$ ), em %, de cada amostra foi determinado por meio da Equação 88.

$$M_{\text{fibra}} = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 \quad (88)$$

### 3.2.2.3.5 Composição química da fibra de vidro

Quando uma amostra é irradiada por um feixe de raios X, os átomos presentes emitem radiação secundária, conhecida como fluorescência de raios X. Essa radiação é composta por raios X de energias específicas, características de cada elemento químico, o que permite a identificação qualitativa dos constituintes da amostra. Além disso, como a intensidade dos raios X emitidos está relacionada à concentração dos elementos, é possível realizar a análise quantitativa com base na medição da intensidade dos picos associados a cada energia característica (Laboratório de Caracterização Estrutural, 2025).

Nesse sentido, as fibras de vidro das barras de GFRP foram caracterizadas quimicamente por meio de ensaios de fluorescência de raios-X (FRX), realizados no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) do DEMa da UFSCar, utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva da marca Shimadzu, modelo EDX-720. Inicialmente, foi conduzida a análise qualitativa para identificação dos óxidos presentes nas fibras de vidro, seguida da análise quantitativa para determinação da concentração relativa de cada um. As análises foram realizadas com amostra de barra de GFRP na condição de referência (sem acondicionamento prévio), com diâmetro nominal de 10 mm e comprimento de 15 mm.

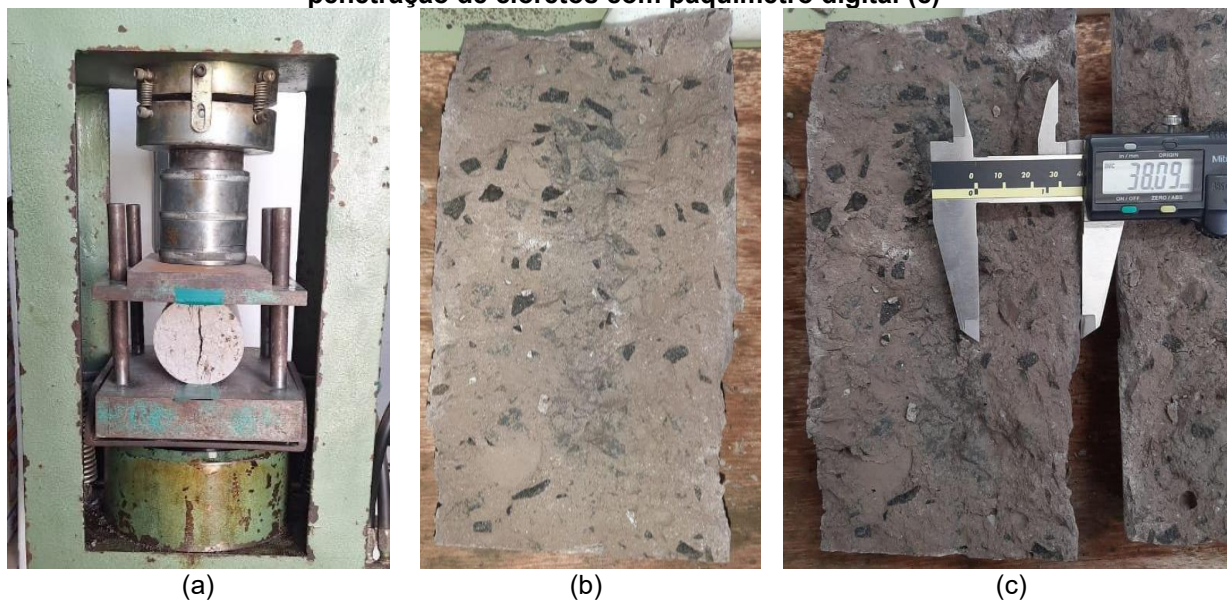
### 3.2.2.4 Profundidade de penetração de cloretos

Foram realizados ensaios colorimétricos para determinação da profundidade de penetração de cloretos em corpos de prova cilíndricos de concreto (diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm), os quais foram mantidos acondicionados juntamente com as vigas no tanque contendo solução salina. O ensaio, baseado na aspersão de solução de nitrato de prata sobre a superfície do concreto fraturado, foi conduzido em 3 corpos de prova para cada idade de exposição (1000, 5000 e 10000 horas).

Para a execução do ensaio, os corpos de prova foram removidos do tanque e fraturados por compressão diametral (Figura 65a). A solução de nitrato de prata foi então aspergida sobre a superfície exposta, promovendo diferenciação visual entre as regiões contaminadas e não contaminadas. A presença de cloretos oriundos da solução salina provoca coloração levemente arroxeadada quando em contato com o nitrato de prata, enquanto as regiões isentas de cloretos apresentam tonalidade cinza-escura (Figura 65b). Após a

revelação da coloração, a profundidade de penetração de cloretos foi medida com o auxílio de paquímetro digital (Figura 65c).

**Figura 65: Fratura do corpo de prova por compressão diametral (a); corpo de prova de concreto após aspersão de solução de nitrato de prata (b); e medida da profundidade de penetração de cloretos com paquímetro digital (c)**



Fonte: Adaptado de Mazzú (2020)

### 3.3 ANÁLISE EXPERIMENTAL – BARRAS DE GFRP

A terceira etapa deste trabalho compreendeu a execução de um programa experimental voltado à análise da durabilidade de barras de GFRP imersas em solução salina. Considerando as dificuldades observadas por Mazzú (2020), bem como os desafios enfrentados na segunda etapa deste trabalho, relacionados à caracterização das barras de GFRP utilizadas como armadura nas vigas de concreto antes e após o acondicionamento, foi adquirido um novo lote de barras e desenvolvido um novo programa experimental. Para isso, barras de GFRP com diâmetro nominal de 10 mm, nas condições protegida e desprotegida, foram imersas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas.

Todas as amostras utilizadas nesta etapa foram fornecidas pelo mesmo fabricante das barras aplicadas nas vigas, porém pertencentes a lotes distintos. Assim, as especificações e propriedades mecânicas informadas pelo fabricante são as mesmas apresentadas item 3.2.1 deste trabalho (Tabela 27).

Esta etapa envolveu uma análise abrangente, contemplando ensaios mecânicos, físico-químicos e microestruturais, com o objetivo de compreender de forma detalhada os mecanismos de degradação das barras de GFRP.

A Tabela 29 e a Figura 66 apresentam, respectivamente, um resumo e o fluxograma do programa experimental desenvolvido.

**Tabela 29: Resumo do programa experimental das barras de GFRP**

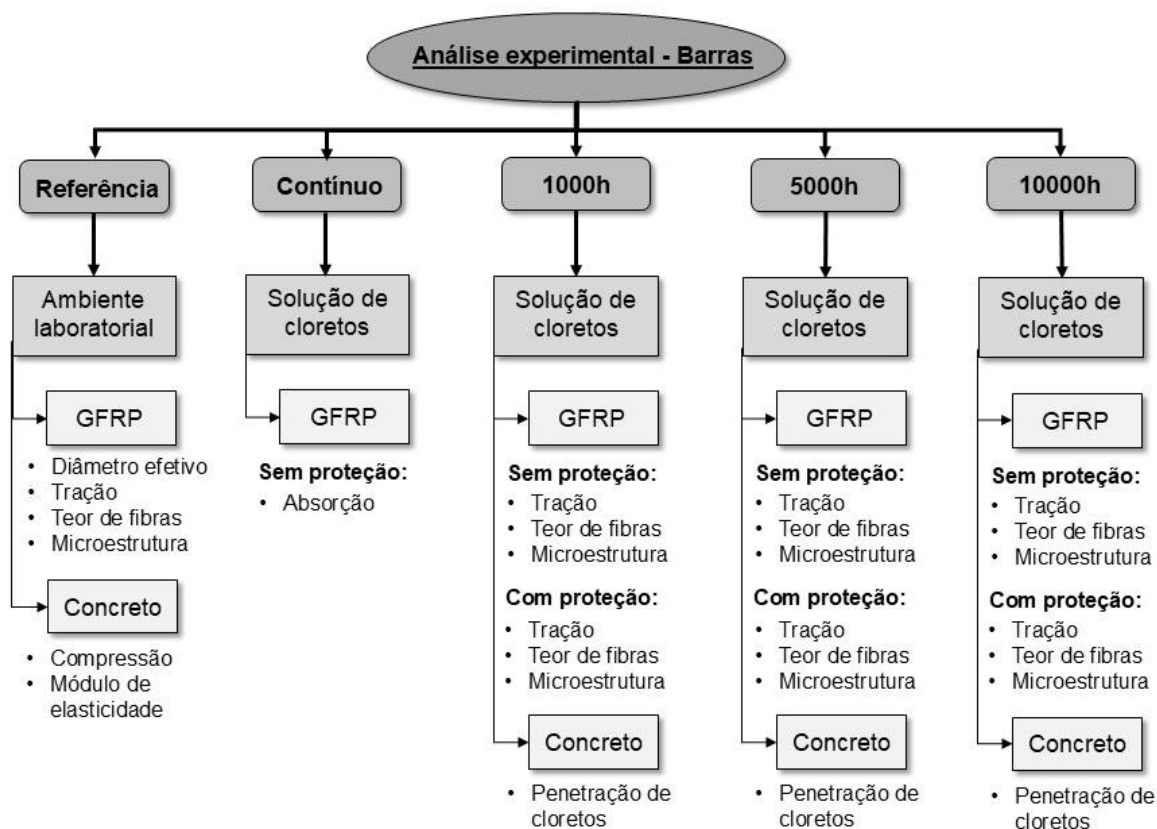
Ambiente de exposição	Idade de ensaio	Quantidade de corpos de prova			
		Barras de GFRP	Comprimento (mm)	Condição	Concreto (Cilindro Ø10x20cm)
Laboratorial	Referência	5	100	Sem proteção	5
		5	1000		
		2	150		
		5	20		
Solução salina	Contínuo	6	25	Sem proteção	-
	1000 h	5	1000	Sem proteção	1
		5	20		
		2	150		
		5	1000	Com proteção	
		5	20		
		2	150		
	5000 h	5	1000	Sem proteção	1
		5	20		
		2	150		
		5	1000	Com proteção	
		5	20		
		2	150		
	10000 h	5	1000	Sem proteção	1
		5	20		
		2	150		
		5	1000	Com proteção	
		5	20		
		2	150		

Fonte: Próprio autor

Previamente à exposição, foram realizados ensaios com amostras de barras de GFRP nas seguintes configurações: cinco amostras com comprimento de 100 mm para determinação do diâmetro efetivo; cinco amostras com 1000 mm para ensaio de tração; cinco amostras com 20 mm para determinação do teor de fibras; e duas amostras com 150 mm para análises microestruturais. As amostras remanescentes foram imersas em solução salina, sendo metade protegida no interior do concreto.

Após 1000, 5000 e 10000 horas de imersão, as barras de GFRP foram avaliadas. Para cada condição (protegida ou desprotegida), foram submetidas a ensaio: cinco amostras com comprimento de 1000 mm (tração), cinco amostras com 20 mm (teor de fibras), e duas amostras com 150 mm (análises microestruturais). Adicionalmente, seis amostras desprotegidas com comprimento de 25 mm foram utilizadas para ensaio de absorção de água de longa duração. Também foram realizados ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto em cinco corpos de prova cilíndricos na condição de referência, bem como determinada a profundidade de penetração de cloretos em um corpo de prova de concreto para cada tempo de imersão em solução salina.

Figura 66: Fluxograma do programa experimental das barras de GFRP



Fonte: Próprio autor

### 3.3.1 MOLDAGEM DA PROTEÇÃO DE CONCRETO

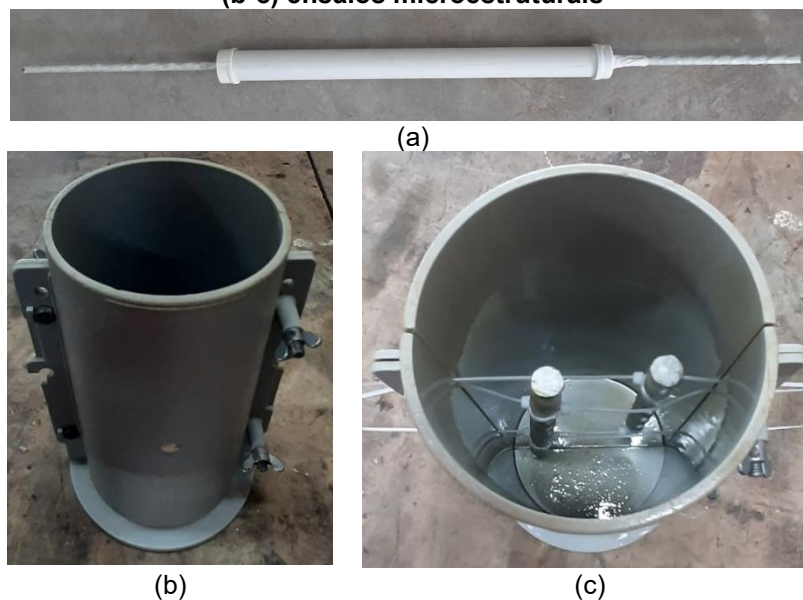
Parte das barras de GFRP utilizadas nesta etapa foi protegida no interior do concreto e, em seguida, imersa em solução salina. Posteriormente, essas barras foram submetidas a ensaios de tração uniaxial, para a determinação do teor de fibras e análises microestruturais.

As amostras destinadas aos ensaios de tração receberam uma camada de concreto em sua região central, com cobertura de 15 mm (valor análogo ao utilizado nas vigas de concreto armado). Para isso, foram empregados moldes confeccionados a partir de tubos de PVC com diâmetro de 40 mm e comprimento de 500 mm (Figura 67a). As extremidades das barras permaneceram livres, com comprimento de 250 mm em cada lado. Já as amostras destinadas aos ensaios microestruturais e à determinação do teor de fibras foram posicionadas, aos pares, no interior de moldes cilíndricos com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm (Figura 67b), sendo fixadas com abraçadeiras de nylon presas aos moldes (Figura 67c). Para facilitar a desmoldagem, aplicou-se desmoldante tanto nos tubos de PVC quanto nos moldes cilíndricos.

O concreto utilizado apresentou resistência nominal de 30 MPa, traço 1:2:3 e fator  $a/c$  de 0,58, sendo moldado *in loco* com o auxílio de betoneira. Foram utilizados 11,25 kg de cimento CP V-ARI, 22,50 kg de areia, 33,75 kg de brita 1 (agregado graúdo com dimensão máxima característica de 19 mm) e 6,55 kg de água, totalizando 0,03 m<sup>3</sup> de concreto

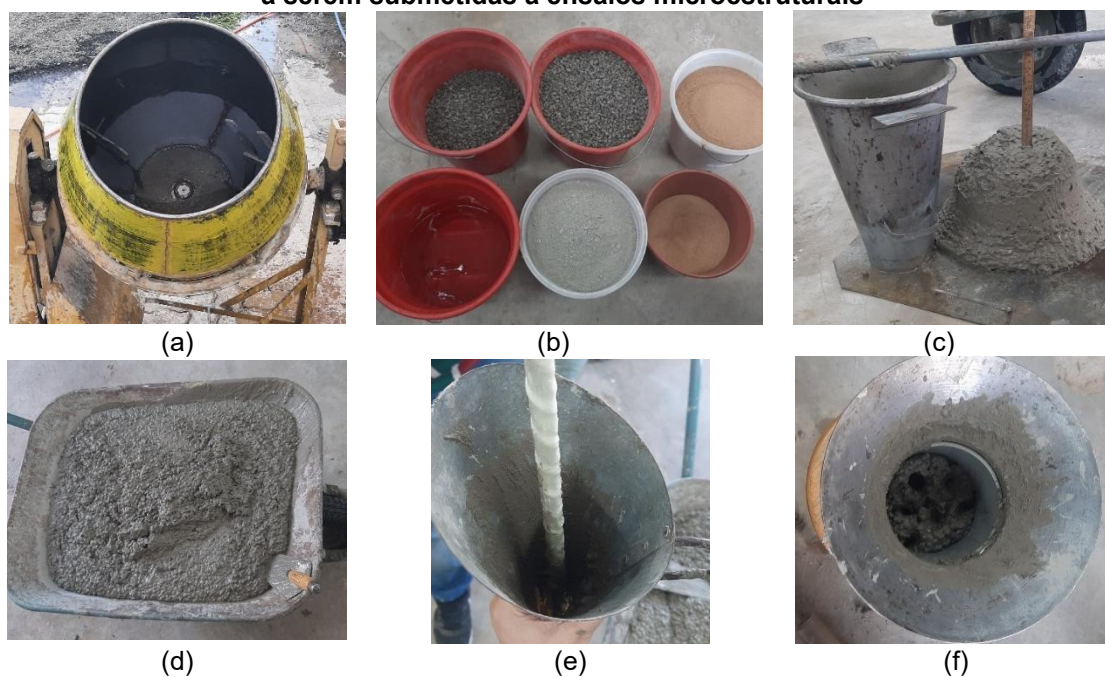
(consumo de cimento de  $375 \text{ kg/m}^3$ ). A Figura 68 ilustra o processo de moldagem das amostras de GFRP protegidas.

**Figura 67: (a) Moldes para as amostras de GFRP protegidas submetidas a ensaio de tração e (b-c) ensaios microestruturais**



Fonte: Próprio autor

**Figura 68: Processo de moldagem das amostras de GFRP protegidas: (a) betoneira, (b) materiais utilizados, (c) ensaio de abatimento de tronco de cone, (d) concreto produzido, (e) moldagem das amostras a serem submetidas a ensaio de tração e (f) moldagem das amostras a serem submetidas a ensaios microestruturais**



Fonte: Próprio autor

Foi realizado ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*) para a determinação da consistência do concreto no início da concretagem, segundo a ABNT NBR 16889 (2020),

e o concreto foi moldado seguindo os procedimentos de moldagem e cura da ABNT NBR 5738 (2015). As amostras foram mantidas cobertas com plástico filme até a desmoldagem, visando reduzir os efeitos de retração do concreto pela evaporação da água. As amostras foram desmoldadas 7 dias após a concretagem e foram armazenadas em ambiente laboratorial até a realização dos ensaios para determinação das propriedades mecânicas do concreto, sendo posteriormente encaminhadas para serem imersas em solução salina.

A Figura 69 apresenta o aspecto final das amostras protegidas e seu acondicionamento em ambiente laboratorial até o início da imersão das barras de GFRP.

**Figura 69: (a-b) Amostras concretadas e (c-d) acondicionadas em ambiente laboratorial após a desmoldagem**



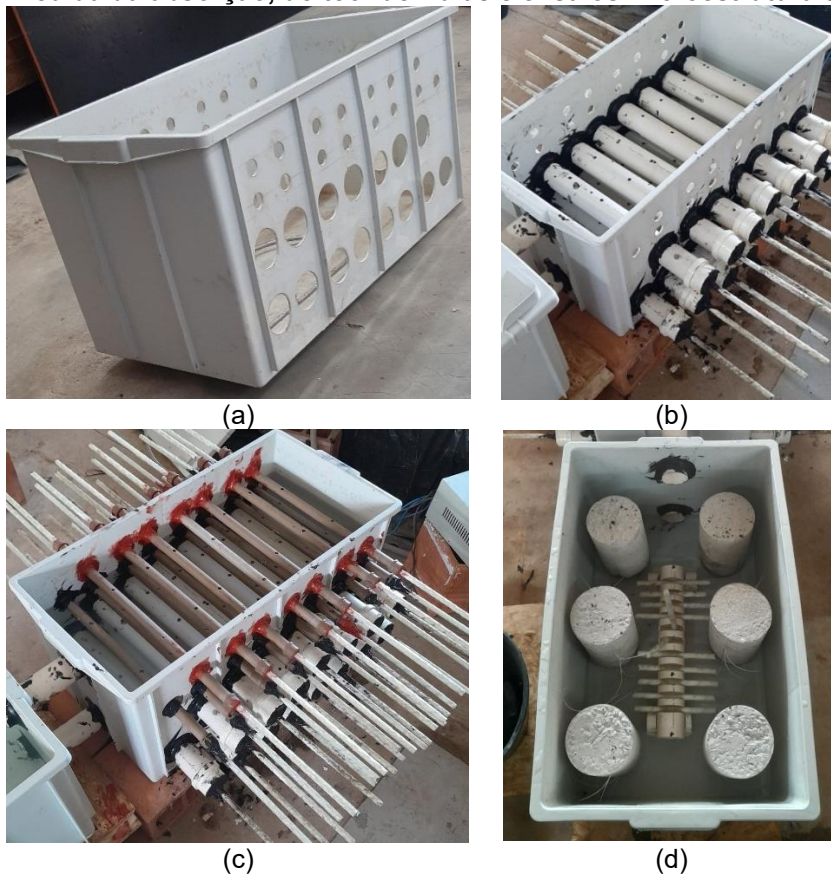
Fonte: Próprio autor

### 3.3.2 AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO

Após a desmoldagem das amostras de GFRP protegidas por concreto, estas foram mantidas em ambiente laboratorial durante 28 dias, idade na qual foram realizados os ensaios para caracterização das propriedades mecânicas do concreto utilizado. Posteriormente, todas as amostras, protegidas e desprotegidas, foram imersas em solução salina e foram ensaiadas para determinação de seu comportamento mecânico e durabilidade nas idades pré-estabelecidas.

As amostras foram dispostas em uma caixa de degradação contendo solução salina de NaCl com concentração de 3,5 % e temperatura de  $50 \pm 3$  °C. Foram utilizadas duas caixas plásticas com capacidade máxima de 60 litros, interligadas por dois canos de PVC com diâmetro de 50 mm e comprimento de 300 mm, permitindo a circulação da solução. Para evitar interferências na ancoragem das amostras de GFRP durante os ensaios de tração, apenas o trecho central (400 mm) permaneceu imerso na solução, mantendo-se 300 mm livres em cada extremidade. Para isso, foram realizados 15 furos de 50 mm e 15 furos de 20 mm em ambas as laterais de uma das caixas. Nestes furos, foram instalados tubos de PVC correspondentes aos respectivos diâmetros, destinados à acomodação das amostras desprotegidas (diâmetro de 10 mm) e protegidas (diâmetro de 40 mm). A fim de garantir o contato com a solução, realizaram-se aberturas nos tubos. Após o posicionamento das amostras, foi aplicado silicone de alta temperatura para vedar todo o sistema. As amostras destinadas aos ensaios de absorção, determinação do teor de fibras e análises microestruturais foram acomodadas na segunda caixa plástica, e então o sistema foi preenchido com a solução salina. A Figura 70 apresenta a montagem da caixa de degradação.

**Figura 70: (a) Furos para passagem das amostras, (b-c) instalação das amostras protegidas e desprotegidas destinadas a ensaios de tração uniaxial, e (d) posicionamento das amostras para medida da absorção, do teor de fibras e ensaios microestruturais**

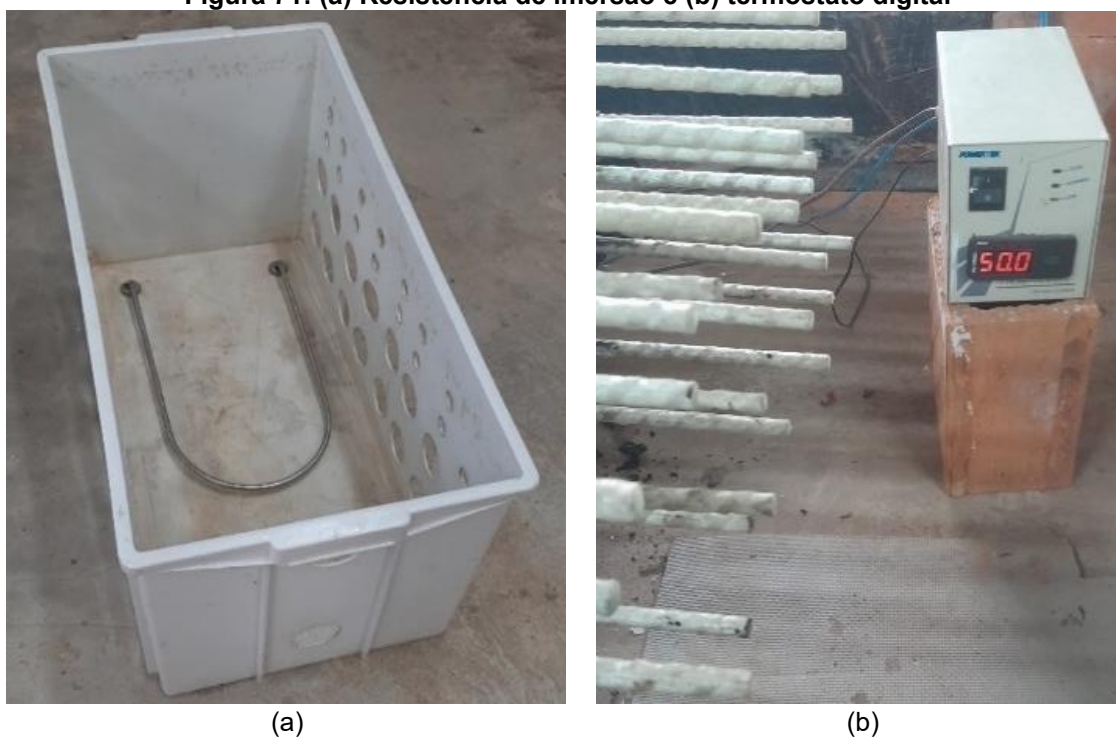


Fonte: Próprio autor

A solução salina foi preparada de maneira gradativa, diluindo-se 350 g de NaCl em 10 litros de água em recipientes plásticos, e foi vertida na caixa de degradação. Desta forma, foram utilizados no total 100 litros de solução.

A temperatura da solução foi elevada e mantida constante com o uso de uma resistência de imersão fabricada em aço inoxidável com 2500 W, ligada a um termostato digital de 16 A com faixa de ajuste de  $-50$  a  $105$  °C. O termostato foi ligado a uma contatora tripolar de 25 A, responsável por acionar o termostato quando a temperatura da solução atingia  $48$  °C, de forma que a temperatura da solução fosse novamente elevada a  $50$  °C. Após atingir  $50$  °C, a contatora cessava o funcionamento do termostato até que a solução naturalmente reduzisse sua temperatura até  $48$  °C. A caixa de degradação foi tampada para minimizar os efeitos da evaporação da água. A manutenção do nível de solução no interior da caixa de degradação foi realizada semanalmente. A Figura 71 apresenta o sistema de aquecimento.

**Figura 71: (a) Resistência de imersão e (b) termostato digital**



Fonte: Próprio autor

### 3.3.3 ENSAIOS EM CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

Os corpos de prova cilíndricos de concreto foram submetidos a ensaios para a caracterização de suas propriedades mecânicas no LSE da UFSCar. Foram também submetidos a ensaio colorimétrico para determinação da profundidade de penetração de cloretos no Laboratório de Materiais e Componentes (LMC) da UFSCar.

### 3.3.3.1 Caracterização das propriedades mecânicas

Foram realizados ensaios para a determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade de corpos de prova cilíndricos de concreto, de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 5739 (2018) e ABNT NBR 8522 (2017), 28 dias após a concretagem. Assim, foram ensaiados cinco corpos de prova, sendo três submetidos à ensaio de compressão axial e dois à ensaio de módulo de elasticidade com posterior ruptura por compressão. Previamente aos ensaios, os corpos de prova foram submetidos à retificação das faces com molhagem superficial, de maneira a se garantir a planicidade da superfície de aplicação de carregamento.

Nos ensaios para determinação do módulo de elasticidade do concreto foram utilizados extensômetros eletrônicos da marca EMIC com comprimento de leitura de 150 mm e faixa de medição entre 0,0001 e 2,5 mm. A Figura 72 apresenta o aspecto dos corpos de prova cilíndricos de concreto após a execução dos ensaios.

**Figura 72: Corpos de prova de concreto após ensaios de caracterização das propriedades mecânicas**



Fonte: Próprio autor

### 3.3.3.2 Determinação da profundidade de penetração de cloretos

Para avaliar o ingresso de cloretos no interior do concreto, foi realizado o ensaio colorimétrico de aspersion de solução de nitrato de prata em um corpo de prova cilíndrico de concreto para cada idade de exposição (1000, 5000 e 10000 horas), conforme descrito no item 3.2.3 deste trabalho.

### 3.3.4 ENSAIOS EM CORPOS DE PROVA DE GFRP

Para avaliar a durabilidade das barras de GFRP protegidas e desprotegidas, foram realizados ensaios para caracterização mecânica, físico-química e microestrutural das barras de GFRP, antes e após a imersão.

#### 3.3.4.1 Determinação do diâmetro efetivo

Para a determinação da resistência à tração da barra de GFRP é necessário conhecer seu diâmetro efetivo. Tendo em vista que as barras de GFRP utilizadas no novo programa

experimental são de um lote diferente do mesmo fabricante, primeiramente foi realizado o ensaio para determinação do diâmetro efetivo das barras de GFRP utilizadas no segundo programa experimental deste trabalho. Para isso, foram utilizadas cinco amostras de GFRP com comprimento de 100 mm, seguindo-se os procedimentos apresentados na ABNT NBR 17201-2 (2025). A metodologia de ensaio encontra-se detalhada no item 3.2.2.3.1.

#### **3.3.4.2 Ensaio de tração**

Foram realizados ensaios de tração uniaxial em cinco barras de GFRP com comprimento de 1000 mm para cada idade e condição, de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 17201-3 (2025). Assim, conforme apresentado no item 3.2.2.3.2, foi realizada ancoragem utilizando-se tubos de aço *Schedule 40* (diâmetros externo e interno de 26,7 e 20,9 mm, respectivamente) com comprimento de 300 mm e resina epoxídica S&P Resin 50. A preparação das amostras de GFRP e a execução do ensaio de tração seguiram a metodologia detalhada no item 3.2.2.3.2.

#### **3.3.4.3 Absorção de água**

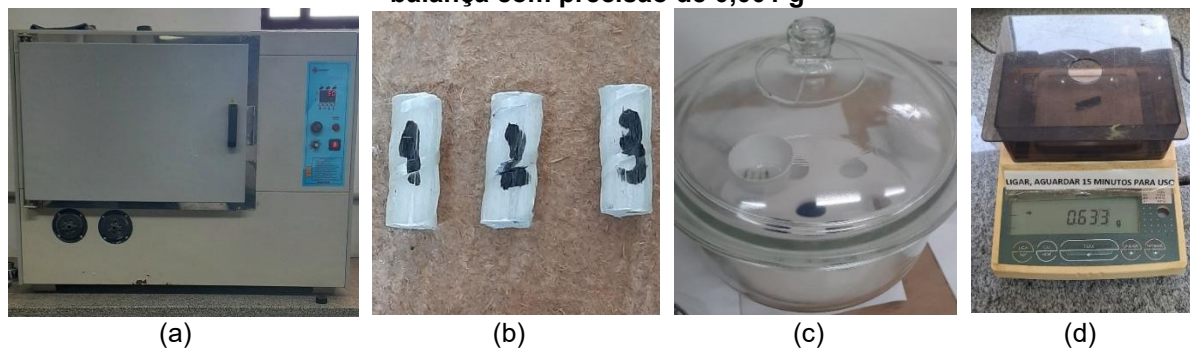
Foi realizado ensaio para verificar a absorção de água, segundo os procedimentos da ABNT NBR 17201-11 (2025). Assim, seguiram-se os procedimentos apresentados no item 3.2.2.3.3 para a determinação da absorção de água após 24 horas de imersão. Para isso, foram utilizadas três amostras de barras de GFRP com comprimento de 25 mm, as quais foram imersas na caixa de degradação (solução salina a  $50 \pm 3$  °C). Para a averiguação da absorção de água na saturação, as amostras foram pesadas ao final da primeira semana de imersão, e, posteriormente, a cada duas semanas até que três pesagens consecutivas apresentassem variações médias inferiores ao maior valor entre 1 % do ganho de massa total ou 5 mg, condição na qual as amostras são consideradas saturadas. A variação da massa da barra foi calculada de acordo com as Equações 89 e 90. Para efeitos de comparação, três amostras de barras de GFRP com comprimento de 25 mm foram imersas em água a 23 °C e submetidas ao mesmo procedimento para avaliação da absorção de água.

$$\text{Variação da massa entre pesagens (\%)} = \frac{m_{i+1} - m_i}{m_i} \cdot 100 \quad (89)$$

$$\text{Variação da massa de longa duração (\%)} = \frac{m_f - m_{seca}}{m_{seca}} \cdot 100 \quad (90)$$

O ensaio de absorção foi realizado utilizando-se a estufa e o dessecador do LMC e a balança do Laboratório de Geotecnia (LabGeo), ambos da UFSCar. A Figura 73 apresenta os equipamentos utilizados para determinação da absorção de água.

**Figura 73: Ensaio de absorção: (a) estufa a 50 °C, (b) amostras de GFRP, (c) dessecador e (d) balança com precisão de 0,001 g**

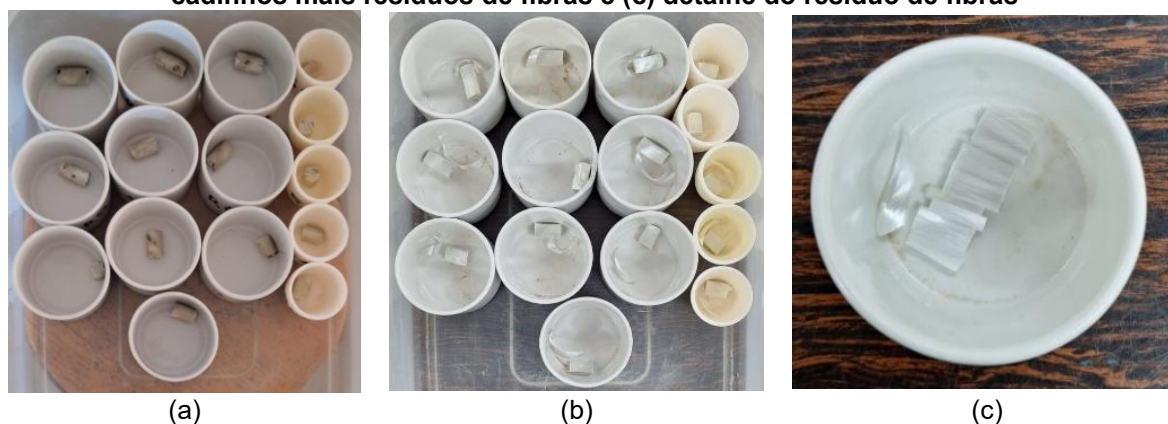


Fonte: Próprio autor

#### 3.3.4.4 Teor de fibras

O teor de fibras das barras foi determinado antes e após os períodos de imersão em solução salina. Assim, foram realizados ensaios para a determinação do teor de fibras pelo método da combustão, segundo os procedimentos da ABNT NBR 17201-10 (2025) apresentados no item 3.2.2.3.4. Foram utilizadas cinco amostras com massa entre 2 e 10 g para cada idade (referência, 1000, 5000 e 10000 horas) e condição de exposição (desprotegida ou protegida). Foram utilizados a mufla, dessecador e estufa do LMC e a balança do Laboratório de Materiais Nanocristalinos do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da UFSCar. A Figura 74 apresenta as etapas do ensaio para a determinação do teor de fibras.

**Figura 74: Ensaio para a determinação do teor de fibras: (a) cadinhos mais amostras, (b) cadinhos mais resíduos de fibras e (c) detalhe do resíduo de fibras**



Fonte: Próprio autor

#### 3.3.4.5 Composição química das fibras de vidro

Foram realizados ensaios FRX com o objetivo de identificar o tipo de fibra de vidro utilizado na produção das barras de GFRP. As análises qualitativa e quantitativa foram conduzidas no LCE da UFSCar, conforme descrito no item 3.2.2.3.5. Para isso, foi utilizada uma amostra de barra de GFRP com diâmetro nominal de 10 mm e comprimento de 15 mm

na condição de referência, bem como duas amostras submetidas a 10000 horas de imersão em solução salina, sendo uma na condição protegida e outra na condição desprotegida.

### **3.3.5 ENSAIOS MICROESTRUTURAIS**

Segundo Wu *et al.* (2023), as razões para a degradação das propriedades mecânicas das barras de GFRP em ambientes agressivos podem ser explicadas a nível microestrutural. Nesse sentido, para melhor analisar a degradação das barras de GFRP frente à ação da solução salina, foram realizados ensaios microestruturais em amostras de referência e em amostras desprotegidas e protegidas após 1000, 5000, e 10000 horas de imersão.

#### **3.3.5.1 MEV**

De acordo com Davalos, Chen e Ray (2011) e Wang *et al.* (2017), o principal mecanismo de degradação das barras de GFRP é a deterioração da interface entre as fibras e a matriz, contudo, ensaios de tração convencionais dificilmente capturam essa deterioração. Assim, foram realizados ensaios MEV em amostras de barras de GFRP de referência e nas condições desprotegida e protegida após 1000, 5000 e 10000 horas de imersão em solução salina para investigar as alterações na microestrutura das barras e analisar a degradação das fibras, matriz ou interface.

Nas idades de ensaio as amostras foram extraídas do ambiente de exposição, foram cortadas e enviadas ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LMEV) da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), onde foram preparadas, fazendo-se o polimento e a deposição de uma camada de ouro-paládio até uma espessura de 6-9 nm, utilizando-se o equipamento *SC7620 Quorum Mini Sputter Coater/Glow Discharge System*, e submetidas à análises utilizando-se o microscópio de varredura *Zeiss EVO-MA10*, operando em tensão de 10 kV.

#### **3.3.5.2 FTIR**

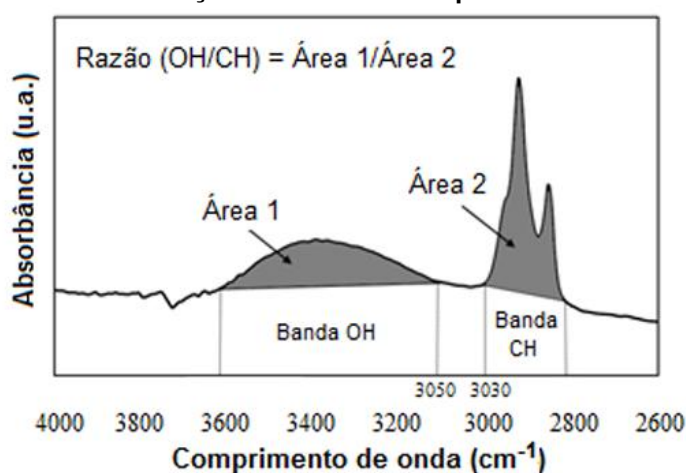
Segundo Wu *et al.* (2023), o ensaio FTIR pode refletir informações sobre vários grupos funcionais nas barras de FRP. Se novos grupos foram gerados, eles podem ser identificados pela comparação das curvas espectrais das amostras condicionadas em relação às amostras referência. A durabilidade da matriz é relacionada, principalmente, à estrutura química das cadeias poliméricas (Mufti *et al.*, 2007). As ligações mais fracas em uma resina do tipo vinil éster são os grupos éster.

Assim, ensaios FTIR foram realizados para identificar as alterações químicas nas barras de GFRP após 1000, 5000 e 10000 horas de imersão em solução salina, em comparação com a referência. Assim, para cada tempo de imersão, uma amostra foi submetida à análise utilizando-se o um espectrômetro *PerkinElmer*, modelo *Frontier*, no modo

de Refletância Total Atenuada (ATR), com resolução de  $4\text{ cm}^{-1}$  na região entre  $4000\text{ cm}^{-1}$  a  $600\text{ cm}^{-1}$ . As análises foram realizadas na Central Analítica Multiusuário de Medianeira (CEANMED), sediada no Campus de Medianeira da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Segundo Mufti *et al.* (2007) e Wu *et al.* (2023), as alterações na razão OH/CH podem ser utilizadas para identificar e avaliar a ocorrência de reação de hidrólise nas barras de FRP, uma vez que esta reação aumenta a proporção dos grupos OH. A posição do grupo OH no espectrograma está entre  $3000$  e  $3500\text{ cm}^{-1}$ , enquanto a posição do grupo CH está entre  $2930$  e  $2890$  (Noobut, Koenig, 1999; Ngono, Maréchal, 2001; Benmokrane *et al.*, 2017a; Benmokrane *et al.*, 2018; Moura, 2021). Dessa forma, a razão OH/CH foi determinada com base na razão entre as áreas correspondentes aos picos de OH e CH nos espectros, tal como proposto por Benmokrane *et al.* (2017a), as quais foram obtidas conforme apresentado na Figura 75.

**Figura 75: Determinação da razão OH/CH por meio de ensaio FTIR**



Fonte: Moura (2021)

Segundo Sun *et al.* (2023), quando a degradação devido à hidrólise ocorre, a intensidade do pico correspondente ao C=O (em torno de  $1720\text{ cm}^{-1}$ ) decresce em comparação à referência. Kamal e Boulfiza (2011) observaram que o espectro de C=O muda consistentemente com a hidrólise da ligação de éster, que é quebrada na presença de  $\text{OH}^-$ . Como abordado na literatura, na reação de hidrólise os íons  $\text{OH}^-$  reagem com o éster das resinas e formam álcool e sal de ácido carboxílico, resultando na diminuição dos picos de absorção da ligação éster (C=O) e no aumento dos picos de absorção correspondentes às raízes de ácido carboxílico ( $\text{COO}^-$ ), em torno de  $1600\text{ cm}^{-1}$  (Sun *et al.*, 2023). Manalo *et al.* (2020b) constataram que, quando ocorre degradação por hidrólise, os picos de C=O e  $\text{COO}^-$  se alteram significativamente em comparação aos picos dos anéis aromáticos e do grupo metila, que permanecem constantes. De acordo com Fergani *et al.* (2018), uma vez que a

intensidade de um espectro FTIR pode ser influenciada por diversos parâmetros, as mudanças em uma banca podem ser quantificadas por meio de sua razão com os picos do grupo aromático, os quais são muito estáveis e não se decompõem ou reagem facilmente com outras substâncias. Assim, as razões entre as áreas sob o espectro FTIR correspondentes aos picos de C=O e o anel aromático, bem como entre o COO<sup>-</sup> e o anel aromático podem ser utilizadas para avaliar reações de hidrólise e oxidação, respectivamente (Sun *et al.*, 2023).

Já Visco, Brancato e Campo (2011) explicam que é possível quantificar as alterações hidrolíticas decorrentes do envelhecimento por meio da determinação dos índices de hidrólise calculados como a razão entre as áreas sob os picos correspondentes ao estiramento do grupo éster (C-O éster, 1190-1340 cm<sup>-1</sup>), ao estiramento da ligação éster (C=O, 1650-1790 cm<sup>-1</sup>) e ao estiramento do grupo álcool (C-O álcool, ~1040 cm<sup>-1</sup> para matriz do tipo vinil éster), em relação ao estiramento CH<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub> (2750-3130 cm<sup>-1</sup>). Caso seja observada a redução nos picos relacionados ao estiramento do grupo éster e da ligação éster (C-O éster e C=O), é evidenciada a ruptura da ligação éster devido à degradação hidrolítica.

### 3.3.5.3 TGA

Foram realizados ensaios termogravimétricos (TGA) para avaliar a estabilidade térmica da matriz polimérica, por meio dos quais a variação da massa das amostras com o aumento da temperatura foi aferida. Sabe-se que a fibra de vidro pode permanecer estável até 1000 °C, de modo que os resultados do ensaio TGA podem refletir o conteúdo de resina da amostra (Wang *et al.*, 2024).

Assim, para cada período de imersão em solução salina (referência, 1000, 5000 e 10000 horas) e cada condição (desprotegida ou protegida), uma amostra de barra de GFRP com aproximadamente 6 mg foi disposta em um cadinho de platina e submetida a temperaturas na faixa entre 100 e 900 °C, sob atmosfera de N<sub>2</sub> a 20 mL/min. A perda de massa com o aumento da temperatura foi registrada e um gráfico de perda de massa *versus* temperatura foi construído. Os ensaios foram realizados na CEANMED, no Campus de Medianeira da UTFPR, utilizando-se um analisador térmico simultâneo *STA6000-PerkinElmer*, operando a uma taxa de 20 °C/min.

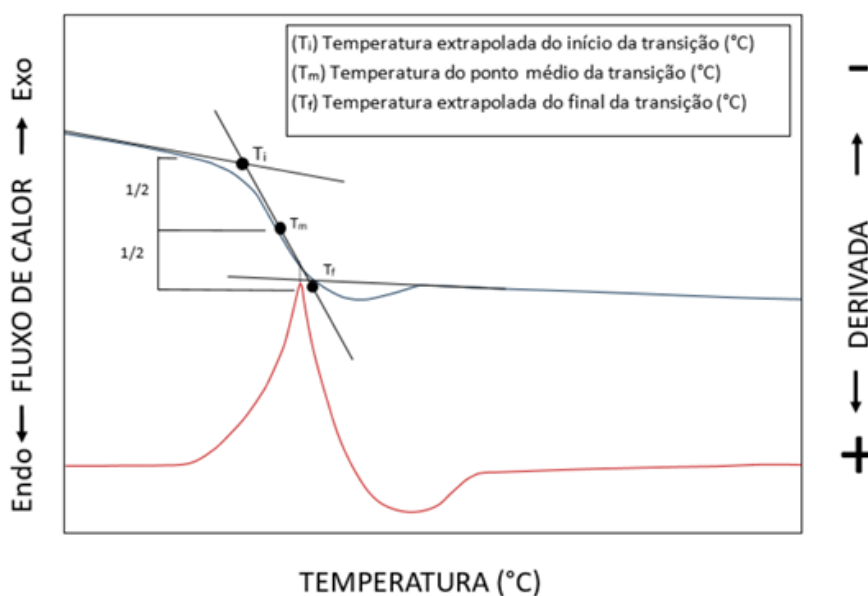
### 3.3.5.4 DSC

A calorimetria exploratória diferencial (DSC – *Differential Scanning Calorimetry*) é uma ferramenta essencial para avaliar a estabilidade térmica das barras de B/GFRP. Segundo ABNT NBR 17201-8 (2025), essa técnica de análise térmica determina as temperaturas e o fluxo de calor associados com as transições dos materiais em função da temperatura e do tempo. Os principais parâmetros obtidos durante esse ensaio são a T<sub>g</sub>, processo de cura,

temperatura de fusão, cristalinidade, relaxamento e estabilidade térmica (Robert, Benmokrane, 2010).

Foram realizados ensaios DSC em uma amostra de GFRP com aproximadamente 30 mg para cada idade e condição de exposição, seguindo-se os procedimentos da ABNT NBR 17201-8 (2025). Os ensaios foram realizados no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM), localizado na UFSCar, utilizando-se equipamento DSC modelo 214 Polyma, Netzsch, e cadinhos de alumínio. Foram realizados ciclos de aquecimento, entre 30 e 200 °C, utilizando-se taxa de aquecimento de 10 °C/min em atmosfera de nitrogênio (50 mL/min). Foi determinada a temperatura do ponto médio ( $T_m$ ), conforme a Figura 76, a qual é a desejada para a definição da  $T_g$ .

**Figura 76: Curva típica de fluxo de calor por temperatura e sua derivada em função do tempo por temperatura**



Fonte: ABNT NBR 17201-8 (2025)

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas as abordagens metodológicas teórica e experimentais adotados no desenvolvimento deste trabalho, abrangendo tanto a análise do comportamento mecânico e da durabilidade de vigas de concreto com armaduras de aço e de GFRP, quanto a avaliação da durabilidade de barras de GFRP, quando imersas em solução salina. Foram descritos os procedimentos de moldagem, acondicionamento e ensaio das vigas e corpos de prova, bem como os métodos empregados na caracterização física, mecânica, físico-química e microestrutural das barras de GFRP. A metodologia adotada foi estruturada de modo a atender os objetivos geral e específicos propostos neste trabalho.

# 4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da análise teórica e das análises experimentais. Como mencionado anteriormente, este trabalho dá continuidade ao estudo iniciado por Mazzú (2020), no qual foram realizados ensaios em vigas e corpos de prova de referência e após 1000 horas de exposição a ambiente laboratorial e à solução salina. No escopo da presente pesquisa, incluem-se os resultados de caracterização dos materiais e dos ensaios de flexão em três pontos de vigas de concreto armado, após 5000 e 10000 horas de exposição aos mesmos ambientes, além dos resultados do programa experimental voltado à avaliação da durabilidade das barras de GFRP imersas em solução salina.

Inicialmente, são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais utilizados na produção das vigas (concreto, aço e GFRP), os quais serviram como parâmetros de entrada dos modelos de dimensionamento. Em seguida, são apresentados os resultados teóricos obtidos com a aplicação desses modelos, os resultados dos ensaios de flexão em três pontos das vigas de concreto com armaduras de aço e de GFRP, e, por fim, os resultados da análise experimental da durabilidade das barras de GFRP.

## 4.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL DAS VIGAS – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

### 4.1.1 CONCRETO

Conforme Mazzú (2020), o concreto utilizado apresentou resistência à compressão nominal média de 30 MPa. Para reduzir a variabilidade das propriedades do concreto, os corpos de prova cilíndricos e as vigas foram moldados com o mesmo lote, o qual apresentou abatimentos de 180 mm e 160 mm em ensaios de abatimento de tronco de cone realizados no início e durante a concretagem, respectivamente.

Foram realizados ensaios de compressão e módulo de elasticidade nos corpos de prova de concreto após 5000 e 10000 horas de exposição à ambiente laboratorial e à solução salina, sendo utilizados três corpos de prova para determinação da resistência à compressão e dois para determinação do módulo de elasticidade. A Tabela 30 apresenta os resultados obtidos, bem como os resultados de Mazzú (2020), a qual ensaiou corpos de prova de concreto 45 dias após a concretagem e após 1000 horas de exposição à ambiente laboratorial e à solução salina.

Na Tabela 30,  $f_{ci}$  e  $E_{ci}$  são a resistência à compressão e módulo de elasticidade obtidos para cada corpo de prova,  $f_{cm}$  e  $E_{cm}$  são a resistência à compressão e módulo de elasticidade médios, DP é o desvio padrão e COV é o coeficiente de variação.

Tabela 30: Resultados das propriedades mecânicas do concreto

Ambiente de exposição	Idade	Amostras	Resistência à compressão (MPa)				Módulo de elasticidade (GPa)			
			$f_{ci}$	$f_{cm}$	DP	COV (%)	$E_{ci}$	$E_{cm}$	DP	COV (%)
Laboratorial (MAZZÚ, 2020)	45 dias	CP1	29,07	32,8	2,7	8,3	-	-	-	-
		CP2	35,56				-			
		CP3	33,75				-			
		CP4	-	-	-	-	-	-	-	
		CP5	-	-	-	-	-	-	-	
Laboratorial (MAZZÚ, 2020)	1000h (87 dias)	CP1	33,58	33,5	0,6	1,6	-	-	-	-
		CP2	34,11				-			
		CP3	32,78				-			
		CP4	-	-	-	34,78	34,5	0,3	0,8	
		CP5	-	-	-	34,21				
Solução salina (MAZZÚ, 2020)	1000h (87 dias)	CP1	34,86	34,6	0,3	0,8	-	-	-	-
		CP2	34,33				-			
		CP3	**				-			
		CP4	-	-	-	40,68	37,8	2,8	7,5	
		CP5	-	-	-	34,99				
Laboratorial	5000h (254 dias)	CP1	31,88	31,8	1,1	3,4	-	-	-	-
		CP2	33,09				-			
		CP3	30,44				-			
		CP4	-	-	-	38,52	32,8	5,7	17,4	
		CP5	-	-	-	27,09				
Solução salina	5000h (254 dias)	CP1	36,41	36,2	0,5	1,4	-	-	-	-
		CP2	36,62				-			
		CP3	35,49				-			
		CP4	-	-	-	34,32	33,8	0,6	1,6	
		CP5	-	-	-	33,21				
Laboratorial	10000h (764 dias*)	CP1	25,13	25,1	0,6	2,3	-	-	-	-
		CP2	25,85				-			
		CP3	24,42				-			
		CP4	-	-	-	27,08	25,7	1,4	5,6	
		CP5	-	-	-	24,22				
Solução salina	10000h (764 dias*)	CP1	36,26	38,2	1,4	3,7	-	-	-	-
		CP2	38,74				-			
		CP3	39,60				-			
		CP4	-	-	-	41,95	41,0	1,0	2,3	
		CP5	-	-	-	40,02				

\*462 + 302 (302 dias a mais devido ao fechamento dos laboratórios em virtude da pandemia de COVID-19)

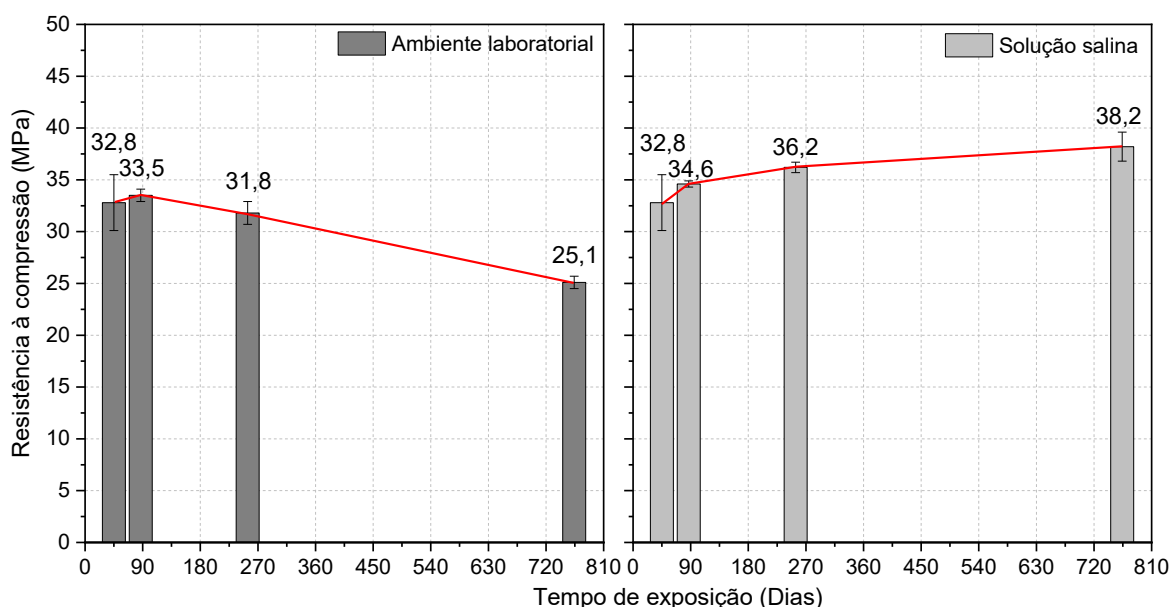
\*\* - Amostra perdida

Segundo Mazzú (2020), devido à indisponibilidade do laboratório não foi possível realizar os ensaios para determinação do módulo de elasticidade do concreto na idade de 45 dias após a concretagem. Além disso, devido ao fechamento dos laboratórios em virtude da

pandemia de COVID-19, os ensaios realizados após 10000 horas de exposição sofreram um atraso de 302 dias. Durante o período de espera, as vigas permaneceram imersas na solução salina, contudo, o tanque de condicionamento permaneceu desligado, com a solução em temperatura ambiente.

A Figura 77 apresenta a evolução da resistência à compressão do concreto em função do tempo de exposição a cada um dos ambientes. Para o ambiente laboratorial (Figura 77a), não são observadas variações expressivas nas idades iniciais (45, 87 e 254 dias), entretanto, após 764 dias obteve-se resistência à compressão aproximadamente 21 % inferior. Com relação à imersão em solução salina (Figura 77b), nota-se uma tendência de aumento na resistência à compressão ao longo do tempo de exposição, com aumentos de aproximadamente 5, 10 e 16 % após 87, 254 e 764 dias de exposição, respectivamente, em relação à idade de referência (45 dias). De acordo com Wang *et al.* (2023) este aumento ao longo do tempo acontece porque as reações de hidratação continuam ocorrendo nos materiais cimentícios após os efeitos da exposição. Mukherjee e Arwika (2005) imergiram cilindros de concreto em água a 60 °C e observaram um aumento da resistência à compressão ao longo do tempo, com ganho de aproximadamente 22 % após 9 meses de imersão.

**Figura 77: Resistência à compressão do concreto em função do tempo de exposição, para ambiente laboratorial e solução salina**



Pela Tabela 30 observa-se que os módulos de elasticidade do concreto apresentaram valores superiores para as amostras imersas em solução salina, em relação às mantidas em ambiente laboratorial. Assim, percebe-se que a umidade proveniente da saturação dos corpos de prova age de maneira a aumentar a resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto. Guo e Waldron (2001) idealizaram um modelo matemático baseado principalmente

na teoria da elasticidade para explicar a influência da umidade em parâmetros físicos do concreto, o qual demonstrou que a resistência à compressão é o fator que sofre maior influência da umidade.

#### 4.1.2 AÇO

As barras de aço CA-50 com diâmetro de 10 mm utilizadas como armadura longitudinal das vigas tiveram suas propriedades mecânicas determinadas por meio de ensaios de tração axial.

Ao longo do desenvolvimento de seu trabalho, Mazzú (2020) realizou adaptações na metodologia experimental após já terem sido adquiridos os materiais para confecção das vigas. Assim, a quantidade de corpos de prova de aço CA-50 com diâmetro de 10 mm do mesmo lote utilizado para a confecção das armaduras das vigas acabou por ser inferior à necessária para contemplar todas as idades de ensaio e ambientes de exposição. Considerando-se que o ambiente laboratorial não altera as propriedades da barra, não foram ensaiadas amostras mantidas nesse ambiente durante 5000 e 10000 horas. Foi ensaiado apenas um par de corpos de prova com comprimento de 60 cm, o qual foi mantido imerso no tanque com solução salina durante 5000 horas. Por este mesmo motivo não foram realizados ensaios de tração em amostras de barra de aço após 10000 horas de exposição.

Na Tabela 31 são apresentados os resultados médios obtidos experimentalmente neste trabalho e por Mazzú (2020), sendo  $f_y$  a tensão de escoamento,  $\epsilon_{sy}$  a deformação de escoamento,  $E_s$  o módulo de elasticidade,  $f_u$  a tensão última e  $\Delta L$  o alongamento do corpo de prova na ruptura. A Figura 78 apresenta as curvas médias de tensão *versus* deformação dos corpos de prova de aço ensaiados por Mazzú (2020) e ensaiados neste trabalho.

**Tabela 31: Resultados médios das propriedades mecânicas do aço**

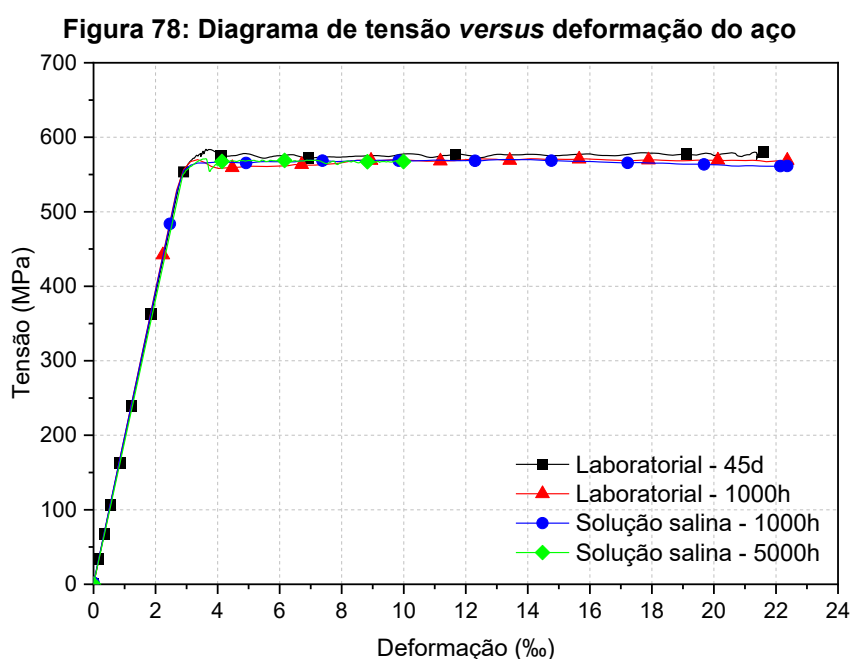
Ambiente de exposição	Idade	$f_y$ (MPa)	$\epsilon_{sy}$ (‰)	$E_s$ (GPa)	$f_u$ (MPa)	$\Delta L$ (%)
Laboratorial (MAZZÚ, 2020)	45 dias	565,35	3,07	194,33	580,86	8,87
Laboratorial (MAZZÚ, 2020)	1000h (87 dias)	563,36	3,02	197,47	568,86	8,48
Solução salina (MAZZÚ (2020)	1000h (87 dias)	555,85	2,99	195,80	571,61	8,64
Solução salina	5000h (254 dias)	549,69	2,88	190,96	571,11	5,59

Conforme pode ser observado na Tabela 31, os resultados laboratoriais de referência e após 1000 horas não apresentam diferenças expressivas, e, por este motivo, foi priorizado o ensaio dos corpos de prova mantidos sob a influência de solução salina.

Analisando-se os resultados obtidos por Mazzú (2020), nota-se que após 1000 horas de exposição não foram observadas alterações nas propriedades mecânicas do aço, sendo

que tal período de exposição não foi suficiente para degradar as propriedades do material. Este fato se deve à total imersão das amostras na solução salina, uma vez que, segundo Helene (1999), além da presença de um eletrólito e uma diferença de potencial, é necessário que exista oxigênio para que ocorra a corrosão.

Entretanto, as barras de aço ensaiadas após 5000 horas de imersão em solução salina apresentaram diminuição de aproximadamente 35 % no alongamento do corpo de prova. Devido à problemas com o posicionamento do extensômetro eletrônico durante o ensaio, a curva tensão *versus* deformação do aço mantido durante 5000 horas em solução salina foi interrompida com deformação de cerca de 10 ‰.



### 4.1.3 GFRP

#### 4.1.3.1 Diâmetro efetivo

As barras de GFRP utilizadas como armadura nas vigas de concreto fazem parte do lote adquirido por Mazzú (2020) e tiveram seu diâmetro efetivo determinado, o qual foi utilizado para obtenção das propriedades mecânicas da barra. Para isso, foram utilizados 5 corpos de prova de GFRP com comprimento de aproximadamente 100 mm, os quais não foram submetidos a nenhum tipo de exposição ambiental, sendo armazenados em ambiente laboratorial (interno e protegido) até o momento do ensaio.

A Tabela 32 apresenta os resultados obtidos, sendo  $l$  o comprimento médio de cada corpo de prova,  $m_1$  a massa do corpo de prova seco,  $m_2$  a massa do corpo de prova imerso em água,  $\phi_{ef}$  o diâmetro efetivo,  $A_{ef}$  a área efetiva e  $\rho_f$  a densidade do corpo de prova (calculada como a razão entre massa e volume -  $m_1/(A_{ef} \cdot l)$ ).

**Tabela 32: Resultados do diâmetro efetivo da barra de GFRP**

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
$l_1$ (mm)	103,80	105,39	105,27	105,36	103,95
$l_2$ (mm)	103,71	105,78	105,46	105,52	104,03
$l_3$ (mm)	103,60	105,42	105,17	105,95	103,98
$l$ (mm)	103,70	105,53	105,30	105,61	103,99
$m_1$ (g)	14,53	14,75	14,76	14,92	14,58
$m_2$ (g)	7,31	7,37	7,40	7,49	7,29
$\phi_{ef}$ (mm)	9,42	9,44	9,43	9,46	9,45
$A_{ef}$ (mm <sup>2</sup> )	69,62	69,93	69,90	70,35	70,11
$\rho_f$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,01	2,00	2,01	2,01	2,00
$\phi_{ef,m\acute{e}dio}$ (mm) = 9,44					
$A_{ef,m\acute{e}dia}$ (mm <sup>2</sup> ) = 69,98					
$\phi_{nominal}$ (mm) = 8,00					

Pode-se observar na Tabela 32 que foi obtido diâmetro efetivo médio de 9,44 mm e área efetiva média de 69,98 mm<sup>2</sup>. Comparando-se a área efetiva média obtida com os limites apresentados na ABNT NBR 17201-1 (2025) (disponíveis na Tabela 10), nota-se que essa se encontra no intervalo entre 47,2 e 70,7 mm<sup>2</sup>. Portanto, o diâmetro nominal corrigido das barras de GFRP utilizadas como armadura nas vigas de concreto é de 8 mm.

#### **4.1.3.2 Propriedades mecânicas**

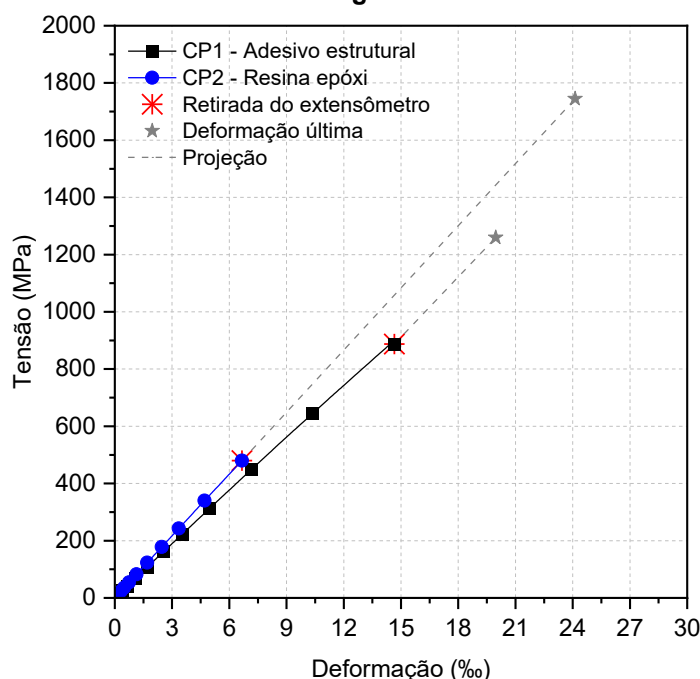
Com o retorno das atividades laboratoriais após o isolamento pela pandemia de COVID-19, foram realizados novos ensaios piloto para adequação da metodologia de ensaio utilizada para a caracterização das barras de GFRP. Assim, foram ensaiadas duas amostras de GFRP com comprimento de 100 cm e ancoragens de 30 cm, preparadas com tubos *Schedule 40*, em cada extremidade (comprimento livre de 40 cm). Uma das amostras foi preparada com o uso de adesivo do tipo *Compound* de média fluidez e a outra com resina epoxídica S&P Resin 50 para ancoragem das barras nos tubos de aço.

A Tabela 33 apresenta os resultados obtidos após o ensaio de tração direta nas duas amostras de GFRP e a Figura 79 apresenta os diagramas de tensão *versus* deformação dos corpos de prova ensaiados, bem como a estimativa de deformação última à tração (calculada pela divisão entre os valores experimentais da resistência à tração,  $f_r$ , e do módulo de elasticidade,  $E_f$ ). As tensões de tração foram determinadas por meio da divisão entre a força registrada e a área efetiva média, a qual foi obtida no ensaio para determinação do diâmetro efetivo. Observando-se a Figura 79 é possível notar que as barras de GFRP apresentaram comportamento elástico linear até a ruptura.

**Tabela 33: Resultados da resistência à tração da barra de GFRP**

CP	Ancoragem	Duração do ensaio (min)	$f_f^*$ (MPa)	$E_f$ (GPa)	$\varepsilon_f^{**}$ (‰)	Modo de ruptura
CP1	Adesivo estrutural	1,65	1259,91	63,10	19,97	Ruptura da barra no interior da ancoragem
CP2	Resina epóxi	4,15	1744,83	72,32	24,13	Ruptura da barra na região central
Média			1502,37	67,71	22,05	-
DP			242,46	4,61	2,08	-
COV (%)			16,14	6,81	9,43	-

\* valor máximo obtido no ensaio; \*\* estimativa calculada com o uso da Lei de Hooke

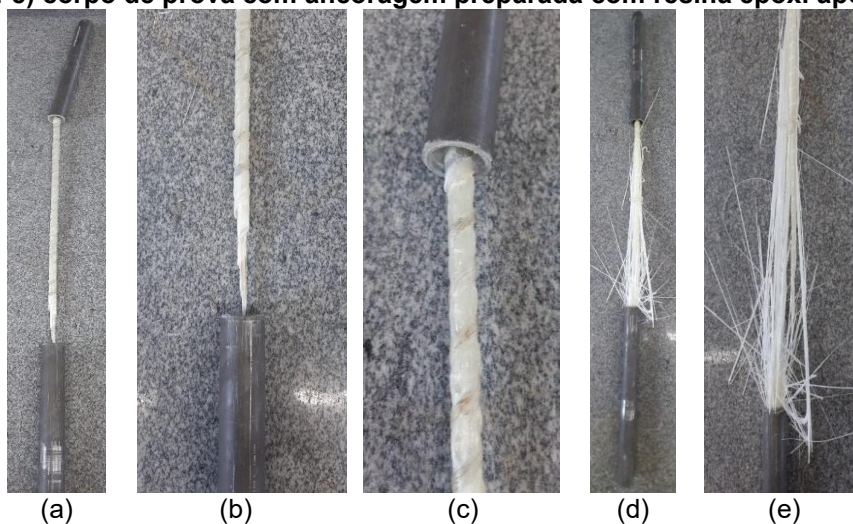
**Figura 79: Diagrama de tensão versus deformação das barras de GFRP utilizadas como armadura nas vigas de concreto**

O corpo de prova cuja ancoragem foi preparada com adesivo estrutural apresentou ruptura da barra no interior da ancoragem. Tendo em vista que a ABNT NBR 17201-3 (2025) indica que a ruptura deve ocorrer no comprimento livre do corpo de prova, o ensaio da barra de GFRP com ancoragem preparada com adesivo estrutural foi invalidado. Já o corpo de prova com ancoragem preparada com resina epoxídica apresentou ruptura no comprimento livre com desagregação das fibras, tal como apresentado na Figura 80.

Observa-se na Tabela 33 que ambos os corpos de prova obedeceram aos valores mínimos requeridos pela ABNT NBR 17201-1 (2025) para a resistência à tração (maior que 800 MPa), módulo de elasticidade (maior que 45 GPa) e deformação à tração (maior que 11 ‰). Além disso, nota-se que a resistência à tração e o módulo de elasticidade foram superiores aos valores fornecidos pelo fabricante (resistência à tração de 1047 MPa e módulo de elasticidade de 48 GPa) para ambos os corpos de prova. Contudo, o alongamento do corpo de prova com ancoragem preparada com adesivo estrutural foi inferior ao fornecido pelo

fabricante (21,1 %). Observa-se, ainda, que os ensaios tiveram duração entre 1 e 10 minutos, tal como recomenda a ABNT NBR 17201-3 (2025).

**Figura 80: (a-c) Corpo de prova com ancoragem preparada com adesivo estrutural após a ruptura; (d-e) corpo de prova com ancoragem preparada com resina epóxi após a ruptura**



A pandemia de COVID-19 impactou no andamento da pesquisa devido ao fechamento dos laboratórios e perdeu-se a correlação das amostras de GFRP com as idades de ensaio das vigas de concreto armado. Assim, como os melhores resultados de propriedades mecânicas e modo de ruptura foram obtidos com o uso de resina epoxídica para a fabricação dos corpos de prova, esta metodologia foi aplicada para o ensaio das amostras utilizadas no novo programa experimental, o qual envolveu a análise da durabilidade das barras de GFRP.

#### 4.1.3.3 Absorção de água após 24 horas de imersão

Foi realizado ensaio para a determinação da absorção de água das barras de GFRP após 24 horas de imersão em água à 50 °C, segundo as disposições da ABNT NBR 17201-11 (2025). A Tabela 34 apresenta os resultados obtidos, sendo o tempo 0 h correspondente às amostras secas e o tempo 24 h correspondente às amostras imersas durante 24 horas.

**Tabela 34: Absorção de água das barras de GFRP após 24 horas de imersão**

Tempo (h)	Massa (g)					Absorção (%)				
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
0	4,084	3,867	4,039	3,887	4,172	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
24	4,090	3,875	4,045	3,90	4,180	0,147	0,220	0,161	0,226	0,180
	Média					0,187				
	DP					0,032				
	COV (%)					16,876				

A ABNT NBR 17201-1 (2025) limita a absorção de água após 24 horas de imersão em um valor igual a 0,25 %. Como pode ser visto na Tabela 34, todos os corpos de prova individualmente apresentaram absorção abaixo do limite, bem como a absorção média, a qual foi igual a 0,187 %. O fabricante apresenta um valor de referência para a absorção das barras, igual a 0,515 % (Tabela 27), contudo, não informa se tal valor é associado à absorção após 24 horas de imersão ou à absorção na saturação.

#### 4.1.3.4 Teor de fibras

O teor de fibras de vidro das barras de GFRP utilizadas como armadura nas vigas foi determinado de acordo com as recomendações da ABNT NBR 17201-10 (2025). A Tabela 35 apresenta os resultados obtidos, sendo CP os corpos de prova ensaiados,  $m_1$  a massa dos cadinhos,  $m_2$  a massa dos cadinhos mais os corpos de prova,  $m_3$  a massa dos cadinhos mais o resíduo de fibras e  $M_{\text{fibra}}$  o teor de fibras.

**Tabela 35: Teor de fibras das barras de GFRP**

CP	$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	$m_3$ (g)	$M_{\text{fibra}}$ (%)
1	73,4172	76,8884	76,0938	77,1088
2	74,6445	78,0468	77,2713	77,2066
3	71,1358	74,1233	73,4443	77,2720
4	79,8107	82,7401	82,0740	77,2616
5	71,3292	74,9350	74,1092	77,0980
			Média	77,1894
			DP	0,0737
			COV (%)	0,0955

A ABNT NBR 17201-1 (2025) preconiza que as barras de GFRP devem ser produzidas com teor de fibras mínimo de 75 %. Conforme apresentado na Tabela 35, todos os corpos de prova individualmente atenderam ao teor de fibras mínimo requerido, bem como o teor de fibras médio, o qual foi igual a aproximadamente 77 %.

#### 4.1.3.5 Composição química das fibras de vidro

Segundo o fabricante, as barras de GFRP foram produzidas com fibras de vidro álcali resistentes (AR). Foi realizado ensaio FRX para determinar a composição química das fibras de vidro, na forma de óxidos. A Tabela 36 apresenta as quantidades dos principais óxidos encontrados nas fibras de vidro.

Comparando-se os resultados apresentados na Tabela 36 com a composição química de fibras de vidro do tipo E, ECR e AR (Tabela 5), nota-se que as fibras de vidro não são do tipo AR, uma vez que não apresentam dióxido de zircônio ( $ZrO_2$ ) em sua composição. Os resultados obtidos demonstram composição química mais próxima de fibras de vidro do tipo

E, as quais apresentam baixa resistência química e alta sensibilidade ao ambiente alcalino (Cousin *et al.*, 2019; Micelli, Aiello, 2019).

**Tabela 36: Composição química das fibras de vidro (% em massa), na forma de óxidos**

Óxido	Quantidade (%)
SiO <sub>2</sub>	50,67
CaO	29,39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,58
MgO	2,29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,45
K <sub>2</sub> O	0,39
SrO	0,15
Ag <sub>2</sub> O	0,04
MnO	0,02
SO <sub>3</sub>	0,01
ZrO <sub>2</sub>	0,01

#### 4.1.4 PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS

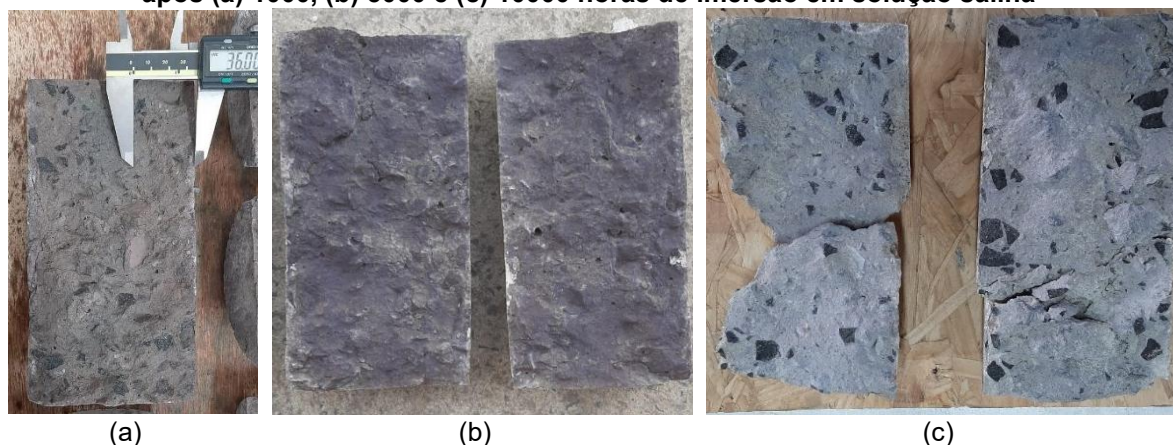
Para a determinação da profundidade de penetração de cloretos, foi realizada a aspersão de nitrato de prata na superfície de 3 corpos de prova de concreto mantidos imersos em solução salina durante 5000 e 10000 horas. Assim, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral, a solução foi aspergida na superfície fraturada, e a profundidade de penetração de cloretos foi medida após a mudança de coloração com o auxílio de paquímetro digital.

A Tabela 37 apresenta os resultados obtidos por Mazzú (2020) e neste trabalho, e a Figura 81 apresenta os corpos de prova após a aspersão do nitrato de prata.

**Tabela 37: Resultados médios da medida da profundidade de penetração de cloretos**

Idade de ensaio	Amostra	Profundidade média de penetração de cloretos (mm)	Desvio padrão (mm)	Coefficiente de variação (%)
1000 horas (MAZZÚ, 2020)	1	34,89	0,45	1,29
	2	36,42	0,61	1,68
	3	36,91	0,50	1,36
5000 horas	1	50,00	0,00	0,00
	2	50,00	0,00	0,00
	3	50,00	0,00	0,00
10000 horas	1	50,00	0,00	0,00
	2	50,00	0,00	0,00
	3	50,00	0,00	0,00

**Figura 81: Medida da profundidade de penetração de cloretos em corpos de prova de concreto após (a) 1000, (b) 5000 e (c) 10000 horas de imersão em solução salina**



A Tabela 37 mostra que, após 5000 e 10000 horas de imersão, foram medidas profundidades de penetração de cloretos de 50 mm a partir de cada uma das faces dos corpos de prova de concreto em direção ao centro, totalizando 100 mm (valor correspondente ao seu diâmetro). Considerando que, nas vigas, foi adotado cobrimento de concreto de 15 mm, conclui-se que a frente de penetração de cloretos já havia atingido as armaduras longitudinais positivas após apenas 1000 horas de imersão, uma vez que, nessa idade, foram observadas profundidades de penetração entre 34 e 37 mm.

## 4.2 ANÁLISE TEÓRICA

A análise teórica envolveu o estudo dos modelos de dimensionamento de diferentes normas técnicas, visando a compreensão dos procedimentos e conceitos envolvidos por meio da comparação de cada modelo aos resultados experimentais obtidos por Mazzú (2020). Após serem assimilados os conceitos necessários, foram selecionadas duas normas técnicas para o dimensionamento de vigas com barras de aço e duas normas técnicas para o dimensionamento de vigas com barras de GFRP. Nesse sentido, foram determinadas as capacidades resistentes expectáveis das vigas de concreto com armadura de aço e de GFRP ensaiadas na primeira etapa de análise experimental deste trabalho.

### 4.2.1 ESTUDO DOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO

Como apresentado no item 3.1.1 deste trabalho, os procedimentos de dimensionamento do ACI 440.11 (2022), CAN CSA S806 (2012), FIB *Bulletin* 40 (2007), SP 295.1325800 (2017) e ABNT NBR 17196 (2025) foram aplicados para as vigas ensaiadas por Mazzú (2020). A Tabela 38 apresenta os resultados experimentais obtidos por Mazzú (2020) para as vigas de concreto com armadura de GFRP de referência (V\_LAB\_GFRP\_45d) e ensaiadas após 1000 horas de exposição a ambiente laboratorial (V\_LAB\_GFRP\_1000h) e

solução salina (V\_ACP\_GFRP\_1000h), bem como os resultados teóricos obtidos com a aplicação dos procedimentos de cada norma técnica.

Ressalta-se que os resultados teóricos foram obtidos tanto de maneira a simular um projeto real, quanto a realidade de laboratório, na qual as condições e o ambiente são controlados. Desta maneira, os coeficientes de redução da resistência dos materiais (ou o coeficiente de redução da capacidade resistente, no caso do ACI 440.11, 2022) de cada norma foram aplicados (CR) e, também, desconsiderados (SR).

**Tabela 38: Resultados teóricos para obtidos para as vigas de Mazzú (2020)**

Viga	Modelo	Modo de ruína	Força resistida (kN)		Diferença (%)	
			SR	CR	SR	CR
V_LAB_GFRP_45d	Experimental – Mazzú (2020)	A	35,60		-	
	ACI 440.11 (2022)	A	26,06	16,94	26,80	52,42
	CAN CSA S806 (2012)	A	27,99	21,49	21,38	39,63
	FIB <i>Bulletin</i> 40 (2007)	A	30,32	23,75	14,83	33,29
	SP 295.1325800 (2017)	A	30,32	25,91	14,83	27,22
	ABNT NBR 17196 (2025)	A	27,52	22,43	22,70	36,99
V_LAB_GFRP_1000h	Experimental - Mazzú (2020)	A	37,00		-	
	ACI 440.11 (2022)	A	26,30	17,10	26,12	51,97
	CAN CSA S806 (2012)	A	28,29	21,73	20,53	38,96
	FIB <i>Bulletin</i> 40 (2007)	A	30,70	24,06	13,76	32,42
	SP 295.1325800 (2017)	A	30,70	26,25	13,76	26,26
	ABNT NBR 17196 (2025)	A	27,87	22,72	21,71	36,18
V_ACP_GFRP_1000h	Experimental – Mazzú (2020)	A	33,10		-	
	ACI 440.11 (2022)	A	26,68	17,34	25,06	51,29
	CAN CSA S806 (2012)	A	28,77	22,12	19,19	37,87
	FIB <i>Bulletin</i> 40 (2007)	B	21,75	17,40	38,90	51,12
	SP 295.1325800 (2017)	A	31,29	26,77	12,11	24,80
	ABNT NBR 17196 (2025)	A	28,42	23,18	20,17	34,89

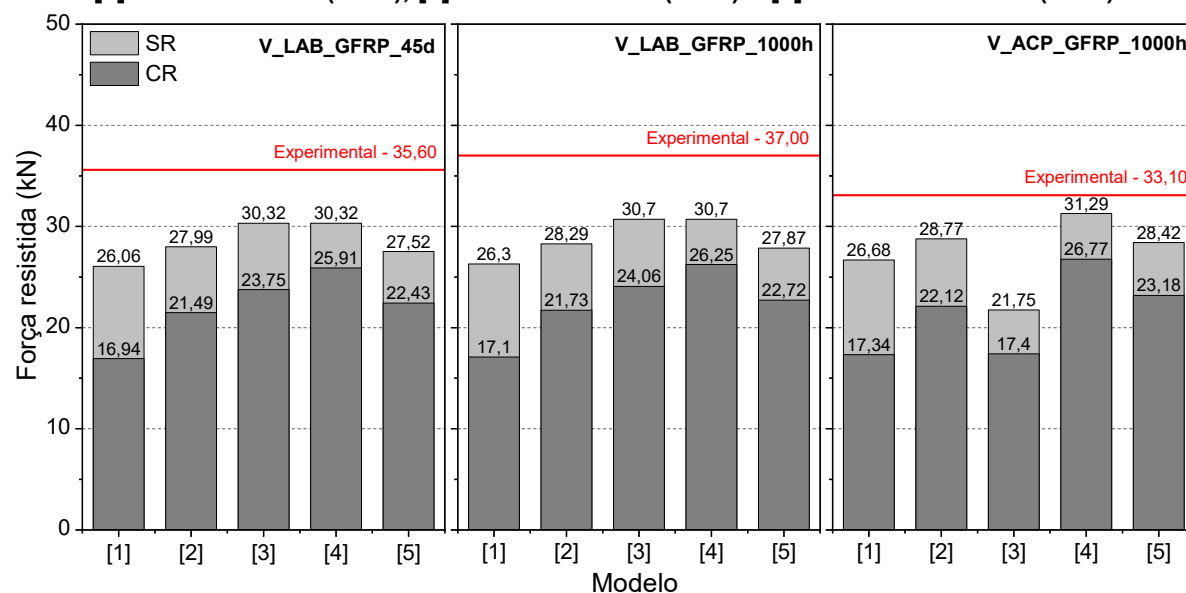
A: Esmagamento do concreto; B: Ruptura da barra de GFRP; SR: Sem redução; CR: Com redução

A Figura 82 representa graficamente os resultados teóricos de força resistida obtidos com a aplicação de cada modelo, com e sem a aplicação dos coeficientes de redução (CR e SR, respectivamente), sendo [1], [2], [3], [4] e [5] referentes aos modelos ACI 440.11 (2022), CAN CSA S806 (2012), FIB *Bulletin* 40 (2007), SP 295.1325800 (2017) e ABNT NBR 17196 (2025), respectivamente.

A Tabela 38 mostra que todos os modelos previram corretamente o modo de ruína das vigas V\_LAB\_GFRP\_45d (referência), caracterizado pelo esmagamento do concreto. Em relação à força resistida, observa-se que, quando os coeficientes de redução não são considerados, a diferença em relação ao resultado experimental é menor do que quando esses coeficientes são aplicados, como ilustra a Figura 82. Isso ocorre porque os coeficientes de redução visam garantir a segurança do dimensionamento, assegurando que a capacidade

resistente estimada seja inferior a real, proporcionando uma margem de segurança adequada. Desconsiderando-se os respectivos coeficientes de redução de cada modelo, observa-se que os resultados obtidos pelos modelos FIB *Bulletin* 40 (2007) e SP 295.1325800 (2017) são idênticos entre si e apresentam menor diferença em relação aos valores experimentais (14,83 %). Por outro lado, o modelo mais conservador é o ACI 440.11 (2022), cuja estimativa apresenta uma diferença de 26,80 %. Os demais modelos se diferenciam quanto à abordagem para o diagrama retangular equivalente de tensões no concreto, apresentando parâmetros distintos para a determinação da tensão de compressão e da profundidade da linha neutra. Como cada modelo utiliza coeficientes de redução específicos, a aplicação desses fatores faz com que os resultados obtidos pelos modelos FIB *Bulletin* 40 (2007) e SP 295.1325800 (2017), antes coincidentes, passem a divergir, apresentando diferenças de 33,29 % e 27,22 %, respectivamente, em relação aos valores experimentais. O modelo ACI 440.11 (2022) permanece como o mais conservador, com diferença de 52,42 %, devido ao fato de a redução incidir diretamente sobre a capacidade resistente estimada, e não sobre as propriedades dos materiais. Ressalta-se que todos esses resultados foram obtidos sem considerar a ação do ambiente, uma vez que as vigas de referência foram ensaiadas 45 dias após a concretagem, sem exposição a agentes agressivos.

**Figura 82: Gráfico de força resistida pelas vigas V\_LAB\_GFRP\_45d, V\_LAB\_GFRP\_1000h e V\_ACP\_GFRP\_1000h em função dos modelos [1] ACI 440.11 (2022), [2] CAN CSA S806 (2012), [3] FIB *Bulletin* 40 (2007), [4] SP 295.1325800 (2017) e [5] ABNT NBR 17196 (2025)**



A Tabela 38 mostra que, para as vigas V\_LAB\_GFRP\_1000h, todos os modelos também previram corretamente o modo de ruína observado experimentalmente. Quando se desconsidera a aplicação dos coeficientes de redução, os modelos FIB *Bulletin* 40 (2007) e SP 295.1325800 (2017) fornecem resultados idênticos, com diferença de 13,76 % em relação

ao valor experimental, ainda que considerem de forma distinta a exposição ambiental. Isso ocorre porque, em todos os modelos, a exposição ambiental afeta apenas a resistência à tração da barra de GFRP, parâmetro que não influencia a capacidade resistente teórica da viga quando o modo de ruína está associado ao esmagamento do concreto. Esse mesmo raciocínio justifica a boa aproximação obtida com o modelo CAN CSA S806 (2012), que não considera a exposição ambiental, mas ainda assim apresenta diferença de apenas 20,53 % em relação ao valor experimental. Como apresentado na Figura 82, ao se aplicar os coeficientes de redução, os resultados dos modelos FIB *Bulletin* 40 (2007) e SP 295.1325800 (2017) passam a divergir, devido às diferentes abordagens adotadas por cada norma. Nessa condição, o SP 295.1325800 (2017) apresenta o resultado menos conservador (diferença de 26,26 %). O modelo ACI 440.11 (2022) continua sendo o mais conservador (diferença de 51,97 %), enquanto o modelo CAN CSA S806 (2012), mesmo sem considerar a exposição ambiental, fornece o segundo resultado mais conservador (diferença de 38,96 %), em razão da significativa redução imposta à resistência à compressão do concreto por seu coeficiente de segurança.

Para as vigas V\_ACP\_GFRP\_1000h, observa-se na Tabela 38 que todos os modelos, com exceção do FIB *Bulletin* 40 (2007), previram corretamente o modo de ruína experimental, baseado no esmagamento do concreto. No caso do FIB *Bulletin* 40 (2007), a consideração da exposição ambiental reduziu a resistência à tração da barra de GFRP a tal ponto que o modo de ruína previsto passou a ser a ruptura da armadura, tornando-o o modelo mais conservador quando desconsiderados os coeficientes de redução (diferença de 38,90 %). Com a aplicação dos coeficientes de redução, conforme ilustrado na Figura 82, o modelo SP 295.1325800 (2017) apresenta os resultados menos conservadores (diferença de 24,80 %), seguido pela ABNT NBR 17196 (2025) (diferença de 34,89 %) e pelo CAN CSA S806 (2012) (diferença de 37,87 %), o que se deve às diferentes abordagens na redução da resistência à compressão do concreto de cada modelo adotadas por cada modelo. Considerando que o FIB *Bulletin* 40 (2007) manteve a previsão de ruptura da barra de GFRP, seu resultado passou a ser o segundo mais conservador (diferença de 51,12 %), ficando atrás apenas do modelo ACI 440.11 (2022), cuja diferença foi de 51,29 %.

É importante destacar que, embora adotem filosofias de dimensionamento semelhantes, os modelos analisados diferem quanto aos parâmetros utilizados no diagrama retangular de tensões no concreto, bem como nos coeficientes de redução aplicados para garantir a segurança do dimensionamento, o que impacta diretamente os resultados obtidos.

No que se refere à exposição ambiental, após 1000 horas, ainda que todos os modelos considerem reduções nas propriedades do GFRP devido à ação ambiental, essas reduções não influenciam diretamente no cálculo da capacidade resistente teórica quando o modo de ruína é controlado pelo esmagamento do concreto, uma vez que, nesse caso, são as

propriedades do concreto que determinam a resistência última. Assim, quando o modo de ruína é baseado no esmagamento do concreto, a forma como a exposição ambiental é tratada nos modelos não altera significativamente os resultados de capacidade resistente. Por outro lado, se o modo de ruína for a ruptura da barra de FRP, a metodologia adotada para considerar a exposição ambiental torna-se crucial, pois as propriedades mecânicas do FRP influenciam diretamente a capacidade resistente estimada.

De acordo com Micelli e Nanni (2004) e Gooranorimi e Nanni (2017), compreender o comportamento de longo prazo e a durabilidade das barras de GFRP em diferentes condições ambientais agressivas é fundamental para promover a ampla aceitação de sua utilização em estruturas de infraestrutura civil.

#### **4.2.2 PREVISÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE**

As vigas de concreto com armadura de aço e de GFRP ensaiadas neste trabalho tiveram sua capacidade resistente determinada com base em diferentes modelos de cálculo. Para as armaduras de aço, utilizaram-se os modelos do ACI 318 (2019) e da ABNT NBR 6118 (2023). Para as armaduras de GFRP, aplicaram-se os modelos do ACI 440.11 (2022) e da ABNT NBR 17196 (2025). A Tabela 39 e Tabela 40 apresentam os resultados de momento resistente ( $M$ ) e força máxima resistida ( $F$ ) obtidos com a aplicação desses modelos. Foram consideradas duas condições: com e sem a aplicação dos coeficientes de redução. Nas normas brasileiras, os coeficientes incidem sobre a resistência dos materiais, e nas normas americanas, sobre a capacidade resistente da seção. A força máxima resistida foi calculada com base no esquema de carregamento utilizado nos ensaios. As vigas foram bi apoiadas e submetidas a uma carga concentrada aplicada no meio do vão, configurando um ensaio de flexão em três pontos.

A determinação da capacidade resistente das vigas foi necessária para prever o comportamento esperado em ensaio. Isso permitiu identificar o modo de ruína e estimar a força máxima a ser aplicada, contribuindo para um melhor controle durante a execução dos ensaios. Para o cálculo da capacidade resistente esperada, utilizaram-se as características geométricas das vigas ensaiadas e as propriedades mecânicas dos materiais, sempre que possível, determinadas experimentalmente. No entanto, devido a dificuldades na realização dos ensaios de tração nas amostras de GFRP, conforme já discutido, foram adotadas as propriedades fornecidas pelo fabricante. No caso das vigas com armadura de aço expostas ao ambiente laboratorial e à solução salina durante 10000 horas, também não foi possível realizar o ensaio de tração das amostras de aço. Nessa situação, foram utilizadas as propriedades determinadas experimentalmente após 5000 horas de exposição.

**Tabela 39: Resultados teóricos para as vigas de concreto armado com barras de aço**

Viga	Norma	Configuração	$f_c'/f_{cm}$ (MPa)	$f_y/f_{yk}$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	Modo de ruína	M (kN·m)	F (kN)
V_LAB_S_5000h	ACI 318 (2019)	Com redução	31,8	563,4	197,5	Escoamento do aço	12,85	22,35
		Sem redução					14,28	24,83
	ABNT NBR 6118 (2023)	Com redução				12,19	21,20	
		Sem redução				14,28	24,83	
V_ACP_S_5000h	ACI 318 (2019)	Com redução	36,2	549,7	190,9	Escoamento do aço	12,69	22,07
		Sem redução					14,10	24,52
	ABNT NBR 6118 (2023)	Com redução				12,07	20,99	
		Sem redução				14,10	24,52	
V_LAB_S_10000h	ACI 318 (2019)	Com redução	25,1	563,4	197,5	Escoamento do aço	12,56	21,85
		Sem redução					13,96	24,27
	ABNT NBR 6118 (2023)	Com redução				11,85	20,61	
		Sem redução				13,96	24,27	
V_ACP_S_10000h	ACI 318 (2019)	Com redução	38,2	549,7	190,9	Escoamento do aço	12,74	22,15
		Sem redução					14,15	24,62
	ABNT NBR 6118 (2023)	Com redução				12,13	21,09	
		Sem redução				14,15	24,62	

**Tabela 40: Resultados teóricos para as vigas de concreto armado com barras de GFRP**

Viga	Norma	Configuração	$f_c'/f_{cm}$ (MPa)	$f_{fu}^*$ (MPa)	$E_f$ (GPa)	Modo de ruína	M (kN·m)	F (kN)
V_LAB_GFRP_5000h	ACI 440.11 (2022)	Com redução	31,8	1047	48	Esmagamento do concreto	9,61	16,71
		Sem redução					14,78	25,70
	ABNT NBR 17196 (2025)	Com redução				12,66	22,01	
		Sem redução				15,53	27,02	
V_ACP_GFRP_5000h	ACI 440.11 (2022)	Com redução	36,2	1047	48	Esmagamento do concreto	10,17	17,68
		Sem redução					15,64	27,20
	ABNT NBR 17196 (2025)	Com redução				13,70	23,83	
		Sem redução				16,79	29,19	
V_LAB_GFRP_10000h	ACI 440.11 (2022)	Com redução	25,1	1047	48	Esmagamento do concreto	8,49	14,77
		Sem redução					13,06	22,72
	ABNT NBR 17196 (2025)	Com redução				10,92	18,99	
		Sem redução				13,46	23,40	
V_ACP_GFRP_10000h	ACI 440.11 (2022)	Com redução	38,2	1047	48	Esmagamento do concreto	10,39	18,07
		Sem redução					15,99	27,81
	ABNT NBR 17196 (2025)	Com redução				14,16	24,63	
		Sem redução				17,33	30,14	

Quando se desconsideram os coeficientes de minoração das resistências e da capacidade resistente (Tabela 39), os resultados obtidos com a aplicação dos modelos de cálculo do ACI 318 (2019) e da ABNT NBR 6118 (2023) são idênticos. Isso ocorre porque, exceto pela forma como tratam os coeficientes de redução, os modelos de cálculo dessas

normas são equivalentes. No entanto, ao se aplicar os coeficientes de redução previstos por cada norma, os resultados passam a diferir. O ACI 318 (2019) aplica a redução diretamente sobre a capacidade resistente da seção, enquanto a ABNT NBR 6118 (2023) reduz as resistências dos materiais (concreto e aço). Dessa forma, os resultados obtidos com a ABNT NBR 6118 (2023), embora próximos aos do ACI 318 (2019), são ligeiramente mais conservadores.

Na Tabela 40, observa-se que os resultados obtidos com o modelo de dimensionamento do ACI 440.11 (2022) são mais conservadores do que os obtidos com a ABNT NBR 17196 (2025), mesmo sem a aplicação dos coeficientes de redução. Essa diferença decorre de abordagens distintas quanto ao valor de  $\varepsilon_{cu}$  (3,5 ‰ na norma brasileira e 3,0 ‰ na norma americana) e ao parâmetro que define a altura do diagrama retangular de tensões no concreto comprimido ( $\lambda$  e  $\beta_1$ , respectivamente). Quando os coeficientes de redução são aplicados, a diferença entre os resultados se acentua. A capacidade resistente obtida com o ACI 440.11 (2022) se reduz em cerca de 35 %, enquanto, com a ABNT NBR 17196 (2025), essa redução é de aproximadamente 18 %.

Desconsiderando-se os coeficientes de redução, nota-se que a capacidade resistente das vigas com armadura de aço e de GFRP é semelhante, com leve superioridade para as vigas com GFRP. No entanto, há uma diferença importante nos modos de ruína previstos. As vigas com armadura de aço têm o comportamento governado pelo escoamento do aço, enquanto nas vigas com GFRP o modo de ruína está associado ao esmagamento do concreto. Isso indica que o comportamento esperado das vigas com armadura de GFRP é mais frágil em comparação ao das vigas com armadura de aço.

Os resultados discutidos neste item foram comparados aos dados experimentais obtidos por meio de ensaios de flexão em três pontos, os quais serão apresentados posteriormente. A íntegra dos resultados e a memória de cálculo encontram-se no Apêndice B.

### **4.3 ANÁLISE EXPERIMENTAL DAS VIGAS – ENSAIOS DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS**

A primeira etapa de análise experimental consistiu no ensaio de flexão de três pontos de vigas de concreto armado com barras de aço e de GFRP mantidas durante 5000 e 10000 horas em ambiente laboratorial e imersas em solução salina, visando avaliar o comportamento mecânico e a durabilidade após a aplicação do protocolo de condicionamento acelerado do ACI 440.9R (2015), modificado para vigas de concreto armado. Para isso, o comportamento mecânico das vigas com armadura de aço e de GFRP foi comparado aos resultados iniciais de Mazzú (2020). O critério de parada seguido nos ensaios foi o mesmo utilizado por Mazzú (2020). As vigas com armadura de aço, as quais possuíam modo de ruína baseado no escoamento da armadura de aço, foram ensaiadas até que se obtivesse deslocamento vertical

a meio vão próximo de 80 mm. Já as vigas com armadura de GFRP foram ensaiadas até que se observasse a ruptura da armadura, o que ocorreu com deslocamento vertical a meio vão em torno de 75 mm.

Na Tabela 41 e Tabela 42 constam os resultados obtidos para as vigas ensaiadas neste trabalho considerando o instante de abertura da primeira fissura, o início do escoamento da armadura (no caso do aço), o início do esmagamento do concreto e o instante em que a força máxima foi atingida, sendo  $F$  a força aplicada (kN),  $\delta$  o deslocamento vertical a meio vão (mm),  $\varepsilon_{s/f}$  a deformação na armadura de aço ou GFRP (‰) e  $\varepsilon_c$  a deformação no concreto (‰).

Devido ao fechamento dos laboratórios em virtude da pandemia de COVID-19, os ensaios das vigas após 10000 horas de exposição sofreram atraso e foram realizados 302 dias após a data prevista. As vigas mantidas em ambiente laboratorial permaneceram neste ambiente até que os ensaios pudessem ser realizados. Já as vigas imersas em solução salina foram mantidas no tanque em funcionamento até completar as 10000 horas de exposição, sendo o tanque posteriormente desligado até que fosse possível a realização dos ensaios. Além disso, uma das vigas com armadura de GFRP mantida em ambiente laboratorial foi danificada durante o tempo de espera, não sendo possível a realização do ensaio de flexão em três pontos. Assim, após 10000 horas de exposição a ambiente laboratorial apenas um exemplar com armadura longitudinal de GFRP foi ensaiado.

**Tabela 41: Resultados experimentais obtidos para as vigas considerando o instante de abertura da primeira fissura e de registro da força máxima**

Vigas	Primeira fissura				Força máxima			
	F kN	$\delta$ mm	$\varepsilon_{s/f}$ ‰	$\varepsilon_c$ ‰	F kN	$\delta$ mm	$\varepsilon_{s/f}$ ‰	$\varepsilon_c$ ‰
V1_LAB_S_5000h	6,2	1,8	*	-0,2	28,3	80,0	*	*
V2_LAB_S_5000h	5,7	1,1	*	*	27,8	81,4	*	*
V1_LAB_GFRP_5000h	4,9	1,1	0,1	-0,2	38,1	75,5	*	*
V2_LAB_GFRP_5000h	4,2	0,8	0,1	-0,1	37,3	84,4	*	*
V1_ACP_S_5000h	7,9	1,6	0,1	-0,2	27,4	80,9	*	*
V2_ACP_S_5000h	7,0	1,6	*	-0,2	27,4	80,0	*	*
V1_ACP_GFRP_5000h	4,6	1,0	*	*	32,8	67,4	*	*
V2_ACP_GFRP_5000h	4,7	0,9	*	*	29,7	59,1	*	*
V1_LAB_S_10000h	5,5	1,4	*	-0,1	27,0	80,4	*	*
V2_LAB_S_10000h	4,9	1,6	0,1	-0,1	26,4	80,2	*	*
V1_LAB_GFRP_10000h	5,0	0,9	0,1	-0,1	36,3	80,4	*	*
V1_ACP_S_10000h	7,6	1,4	*	-0,2	27,2	79,7	*	*
V2_ACP_S_10000h	7,7	1,6	*	-0,2	26,7	63,6	*	*
V1_ACP_GFRP_10000h	5,1	1,5	*	-0,2	37,3	72,4	*	*
V2_ACP_GFRP_10000h	4,8	1,7	*	-0,2	32,8	66,4	*	*

\* extensômetro mecanicamente danificado

**Tabela 42: Resultados experimentais obtidos para as vigas considerando o início de escoamento da armadura e do esmagamento do concreto**

Vigas	Escoamento da armadura				Esmagamento do concreto			
	F kN	$\delta$ mm	$\epsilon_{s/f}$ ‰	$\epsilon_c$ ‰	F kN	$\delta$ mm	$\epsilon_{s/f}$ ‰	$\epsilon_c$ ‰
V1_LAB_S_5000h	26,2	13,6	*	-1,2	26,9	25,2	*	-3,5
V2_LAB_S_5000h	25,2	13,0	*	*	26,3	29,2	*	*
V1_LAB_GFRP_5000h	-	-	-	-	23,5	38,9	10,8	-3,0
V2_LAB_GFRP_5000h	-	-	-	-	26,1	45,9	*	-3,1
V1_ACP_S_5000h	26,8	12,1	2,4	-1,2	26,8	24,6	*	*
V2_ACP_S_5000h	25,9	12,1	*	-1,2	26,9	19,9	*	-3,3
V1_ACP_GFRP_5000h	-	-	-	-	27,8	47,1	*	*
V2_ACP_GFRP_5000h	-	-	-	-	25,1	45,0	*	*
V1_LAB_S_10000h	25,8	13,2	*	-1,1	27,5	26,9	*	-2,9
V2_LAB_S_10000h	23,3	13,8	2,5	-1,3	24,0	19,2	2,5	-2,7
V1_LAB_GFRP_10000h	-	-	-	-	24,5	42,6	*	-3,6
V1_ACP_S_10000h	26,4	11,9	*	-1,3	27,3	20,0	*	-3,1
V2_ACP_S_10000h	23,8	10,1	*	-1,0	26,1	25,0	*	-3,8
V1_ACP_GFRP_10000h	-	-	-	-	28,8	46,3	*	-1,9
V2_ACP_GFRP_10000h	-	-	-	-	30,7	56,0	*	-2,0

\* extensômetro mecanicamente danificado

Conforme pode ser visto nas Tabela 41 e Tabela 42, foram encontradas dificuldades na aferição das deformações no concreto e na armadura longitudinal devido a danos nos extensômetros que comprometeram a leitura. Os extensômetros responsáveis pelo registro das deformações das armaduras longitudinais foram aplicados antes da concretagem e foram protegidos para evitar avarias. Entretanto, a presença da água de amassamento do concreto e mesmo as operações de concretagem das vigas acabaram por comprometer o funcionamento de parte dos extensômetros, prejudicando a obtenção das deformações nas armaduras longitudinais. Além disso, com a evolução da aplicação de carregamento durante os ensaios, o escoamento do aço e a ruptura das fibras de vidro do GFRP também impactaram o funcionamento destes extensômetros. Quanto aos extensômetros instalados no concreto comprimido, entre as operações de instrumentação e posicionamento das vigas na máquina de ensaios, alguns sofreram danos mecânicos que comprometeram seu funcionamento. Ainda, o surgimento de fissuras de esmagamento do concreto comprometeu o funcionamento dos extensômetros ao longo dos ensaios, com a evolução do carregamento aplicado.

A Tabela 43 apresenta os valores de rigidez à flexão das vigas nos dois primeiros estágios do comportamento estrutural, sendo o primeiro estágio correspondente ao concreto não fissurado ( $K_1$ ) e o segundo estágio ao concreto fissurado com a armadura em regime elástico-linear ( $K_2$ ). Esses valores foram obtidos a partir da inclinação das curvas força *versus* deslocamento em cada estágio, utilizando-se os valores de força e deslocamento registrados

no momento da abertura da primeira fissura, que delimita o final do primeiro estágio, e no início do escoamento do aço ou do esmagamento do concreto, que caracteriza o final do segundo estágio, conforme o tipo de armadura empregada. São apresentados também os índices de ductilidade das vigas, os quais foram calculados por meio da razão entre o deslocamento vertical correspondente à força máxima ( $\delta_{\text{máx}}$ ) e o deslocamento vertical relativo ao início do escoamento do aço ou ao início do esmagamento do concreto ( $\delta_{y/c}$ ), dependendo do tipo de armadura.

**Tabela 43: Rigidez e ductilidade das vigas de concreto armado**

Vigas	Rigidez		Ductilidade
	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	$\delta_{\text{máx}}/\delta_{y/c}$
V1_LAB_S_5000h	3,4	1,69	5,88
V2_LAB_S_5000h	5,2	1,64	6,26
V1_LAB_GFRP_5000h	4,5	0,49	1,94
V2_LAB_GFRP_5000h	5,3	0,49	1,84
V1_ACP_S_5000h	4,9	1,8	6,69
V2_ACP_S_5000h	4,4	1,8	6,61
V1_ACP_GFRP_5000h	4,6	0,5	1,43
V2_ACP_GFRP_5000h	5,2	0,46	1,31
V1_LAB_S_10000h	3,9	1,72	6,09
V2_LAB_S_10000h	3,1	1,51	5,81
V1_LAB_GFRP_10000h	5,6	0,47	1,89
V1_ACP_S_10000h	5,4	1,79	6,70
V2_ACP_S_10000h	4,8	1,89	6,30
V1_ACP_GFRP_10000h	3,4	0,53	1,56
V2_ACP_GFRP_10000h	2,8	0,48	1,19

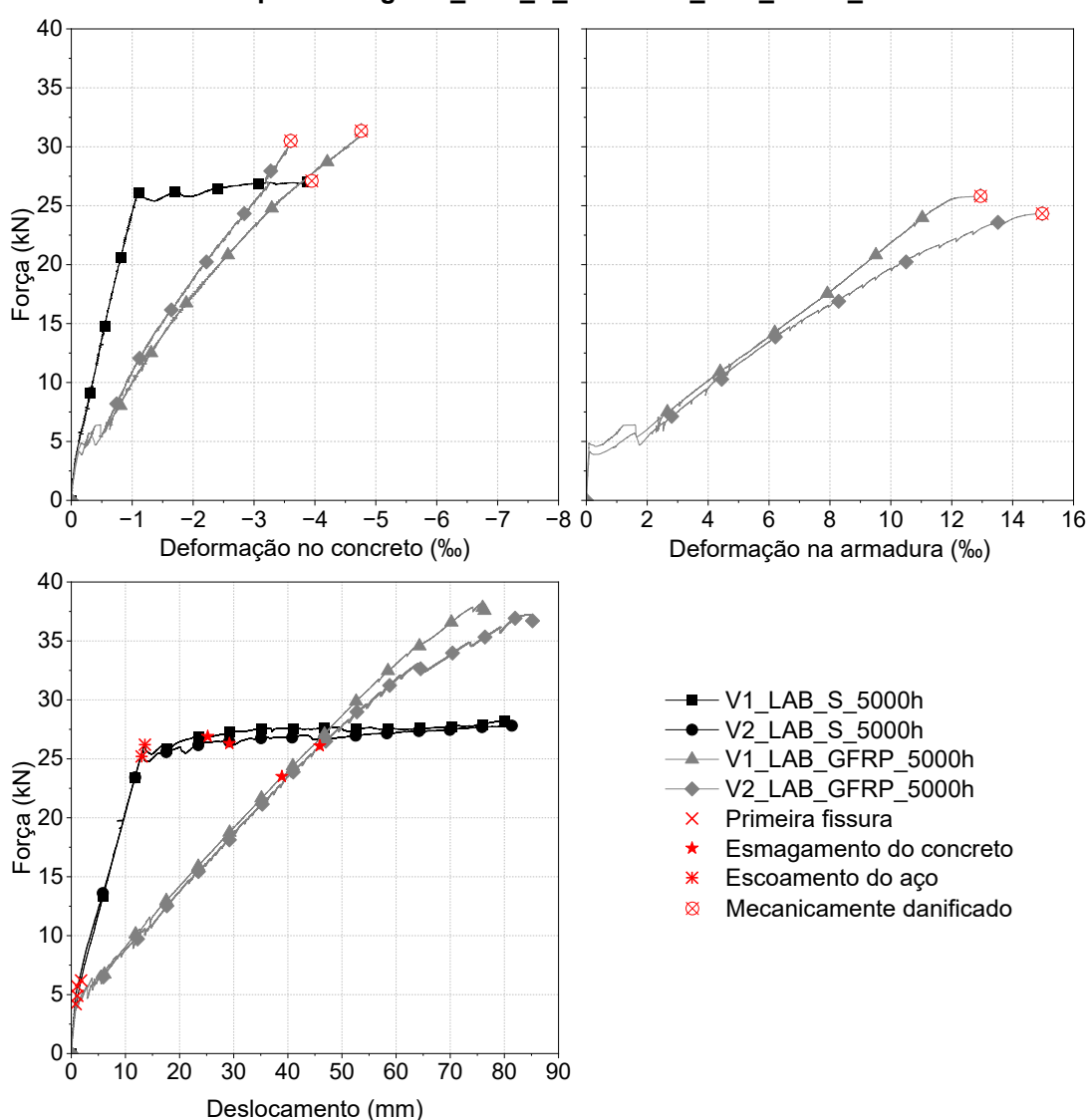
É possível observar na Tabela 43 que, para todas as vigas, houve redução da rigidez no segundo estágio em relação ao primeiro, em decorrência da fissuração do concreto, sendo essa redução mais expressiva nas vigas com armadura de GFRP. Além disso, nota-se que as vigas com armadura de GFRP apresentaram ductilidade entre 70 e 80 % inferior àquela observada nas vigas com armadura de aço, em função do comportamento frágil do material compósito. Contudo, como as vigas com armadura de GFRP apresentaram modo de ruptura baseado no esmagamento do concreto, ainda se verifica ductilidade nos elementos, associada ao desenvolvimento do comportamento plástico do concreto comprimido.

#### 4.3.1 EXPOSIÇÃO DE 5000 HORAS A AMBIENTE LABORATORIAL

Na Figura 83 são apresentados os gráficos de força *versus* deformação no concreto e na armadura e força *versus* deslocamento vertical das vigas de concreto com armadura longitudinal positiva de aço e de GFRP mantidas durante 5000 horas em ambiente laboratorial

(V\_LAB\_S\_5000h e V\_LAB\_GFRP\_5000h). Encontra-se apresentada apenas a curva força *versus* deformação no concreto para a V1\_LAB\_S\_5000h, uma vez que dificuldades foram encontradas na aferição das deformações pelos extensômetros da viga V2\_LAB\_S\_5000h, por motivos já mencionados. Também não foram registradas as deformações nas armaduras de aço das vigas V\_LAB\_S\_5000h, impossibilitando a obtenção das curvas força *versus* deformação na armadura destas vigas. É possível notar que o comportamento da barra de GFRP é elástico linear, e, por este motivo, as deformações no concreto e da armadura apresentam curvas com tendência linear até a ruptura.

**Figura 83: Força *versus* deformação no concreto e na armadura e Força *versus* deslocamento vertical para as vigas V\_LAB\_S\_5000h e V\_LAB\_GFRP\_5000h**



Observando-se a Figura 83, nota-se o comportamento típico de vigas de concreto com armadura de aço convencionais submetidas à flexão, o qual pode ser dividido em três estágios distintos. O primeiro estágio é definido pelo concreto não fissurado, trabalhando com

comportamento elástico-linear até a abertura da primeira fissura. A partir deste momento, inicia-se o segundo estágio, caracterizado pelo concreto fissurado e consequente redução da rigidez do elemento, tendo início a solicitação da armadura de aço, a qual trabalha no regime elástico-linear até o escoamento. Posteriormente, tem-se o terceiro estágio, o qual se inicia com o escoamento da armadura de aço, configurando o patamar de escoamento da armadura até a finalização do ensaio.

As vigas V\_LAB\_S\_5000h apresentaram a abertura da primeira fissura sob força média de 6,0 kN e deslocamento vertical médio de 1,5 mm, com redução da rigidez em aproximadamente 61 %, em relação ao estágio não fissurado. Observou-se que o escoamento da armadura ocorreu sob força média de 25,9 kN e deslocamento vertical médio de 13,3 mm, e o esmagamento do concreto ocorreu no ponto de aplicação de carregamento sob força média de 26,6 kN e deslocamento vertical médio de 27,2 mm. O modo de ruína das vigas V\_LAB\_S\_5000h foi baseado no escoamento da armadura longitudinal com posterior esmagamento do concreto comprimido.

As vigas V\_LAB\_GFRP\_5000h também apresentaram comportamento mecânico dividido em três estágios. O primeiro estágio, assim como nas vigas com armadura de aço, corresponde ao concreto não fissurado, em regime elástico-linear, resistindo aos esforços aplicados. Com a abertura da primeira fissura, tem início o segundo estágio, no qual a armadura passa a ser solicitada e o concreto passa a atuar fissurado, observando-se uma redução da rigidez do elemento em torno de 90 %. Nesse estágio, a armadura trabalha em regime elástico-linear e o elemento apresenta comportamento aproximadamente linear até o início do esmagamento do concreto, momento em que se inicia o terceiro estágio. Esse último estágio é caracterizado pelo desenvolvimento do comportamento plástico do concreto comprimido, com leve desvio da linearidade global da resposta estrutural, até a ruptura da armadura longitudinal. A abertura da primeira fissura foi observada sob força média de 4,6 kN e deslocamento longitudinal médio de 1 kN, e o esmagamento do concreto foi observado sob força média de 24,8 kN e deslocamento vertical médio de 42,4 mm. O modo de ruína que governa o comportamento das vigas V\_LAB\_GFRP\_5000h é o esmagamento do concreto com posterior ruptura da barra de GFRP.

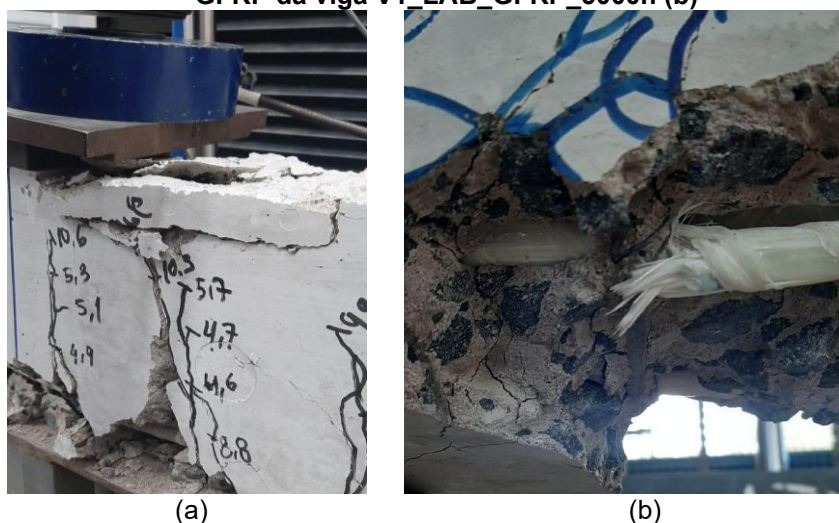
A Figura 84 apresenta o esmagamento do concreto comprimido da viga V1\_LAB\_S\_5000h ao final do ensaio, enquanto a Figura 85 apresenta o esmagamento do concreto comprimido da viga V2\_LAB\_GFRP\_5000h e a ruptura da armadura da viga V1\_LAB\_GFRP\_5000h ao final dos ensaios.

No Apêndice C.1 encontram-se os gráficos complementares obtidos nos ensaios de flexão de três pontos das vigas V\_LAB\_S\_5000h e V\_LAB\_GFRP\_5000h.

Figura 84: Esmagamento do concreto comprimido – V1\_LAB\_S\_5000h



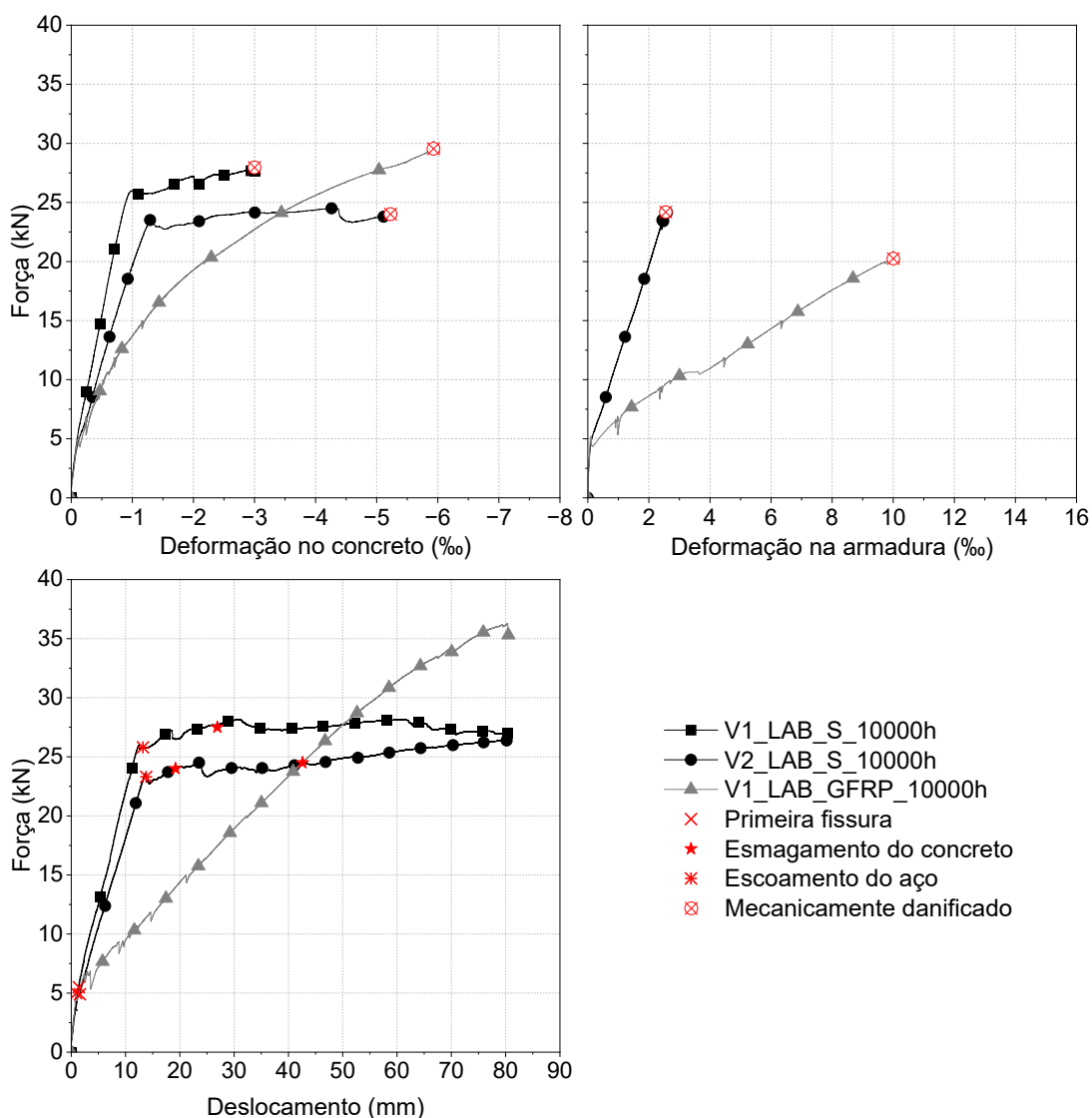
Figura 85: Esmagamento do concreto da viga V2\_LAB\_GFRP\_5000h (a) e ruptura da barra de GFRP da viga V1\_LAB\_GFRP\_5000h (b)



#### 4.3.2 EXPOSIÇÃO DE 10000 HORAS A AMBIENTE LABORATORIAL

Na Figura 86 são apresentados os gráficos de força *versus* deformação no concreto e na armadura e força *versus* deslocamento vertical das vigas de concreto com armadura longitudinal positiva de aço e de GFRP mantidas durante 10000 horas em ambiente laboratorial (V\_LAB\_S\_10000h e V\_LAB\_GFRP\_10000h). Devido à danos no extensômetro instalado na armadura de aço da viga V1\_LAB\_S\_10000h, foi possível apenas a obtenção da curva de força *versus* deformação na armadura para a viga V2\_LAB\_S\_10000h. Para esta idade e ambiente de exposição foi ensaiada apenas uma viga com armadura de GFRP, devido à danificação do seu par no período de fechamento dos laboratórios durante a pandemia de COVID-19.

**Figura 86: Força versus deformação no concreto e na armadura e Força versus deslocamento vertical para as vigas V\_LAB\_S\_10000h e V\_LAB\_GFRP\_10000h**



Por meio da Figura 86 verifica-se o comportamento típicos de vigas de concreto com armadura de aço, dividido nos três estágios já expostos. Nota-se a formação de patamar de escoamento do aço em ambas as vigas, entretanto, apesar da força final ser muito próxima para as duas vigas, a viga V2\_LAB\_S\_10000h apresentou força de início de escoamento cerca de 10 % superior à viga V1\_LAB\_S\_10000h. As vigas V\_LAB\_S\_10000h apresentaram a primeira fissura sob força média de 5,2 kN e deslocamento vertical médio de 1,5 mm, com redução da rigidez do elemento pós-fissuração em torno de 54 %. O início do escoamento do aço foi observado sob força média de 24,6 kN e deslocamento vertical médio de 13,5 mm, enquanto o esmagamento do concreto foi observado sob força média de 25,8 kN e deslocamento vertical médio de 23,1 mm. O modo de ruína das vigas V\_LAB\_S\_10000h foi baseado no escoamento da armadura longitudinal de aço seguido do esmagamento do concreto no ponto de aplicação de carregamento, junto à face superior das vigas.

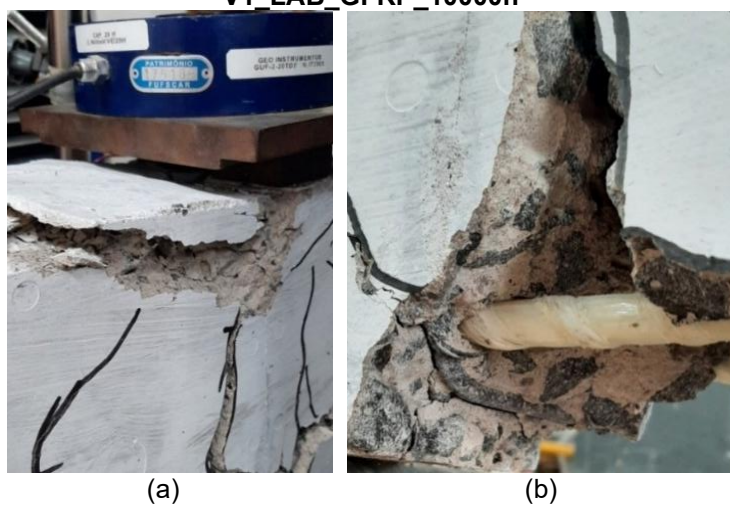
O comportamento típico de vigas de concreto com armadura de GFRP submetidas à flexão pode ser visto na Figura 86, caracterizado pelos três estágios já discutidos. A fissuração do concreto teve início sob força média de 5,0 kN e deslocamento vertical médio de 0,9 mm, com redução da rigidez do elemento em cerca de 92 %. Observou-se o início do esmagamento do concreto comprimido sob força média de 24,5 kN e deslocamento vertical médio de 42,6 mm, bem como a ruptura da barra de GFRP ao término do ensaio. Desta forma, o modo de ruína foi baseado no esmagamento do concreto comprimido com posterior ruptura da armadura de GFRP. A Figura 87 ilustra o esmagamento do concreto na viga V1\_LAB\_S\_10000h, enquanto a Figura 88 evidencia o esmagamento do concreto e a ruptura da barra de GFRP na região do estribo da viga V1\_LAB\_GFRP\_10000h.

No Apêndice C.1 encontram-se os gráficos complementares obtidos nos ensaios de flexão de três pontos das vigas V\_LAB\_S\_10000h e V\_LAB\_GFRP\_10000h.

**Figura 87: Esmagamento do concreto comprimido – V1\_LAB\_S\_10000h**



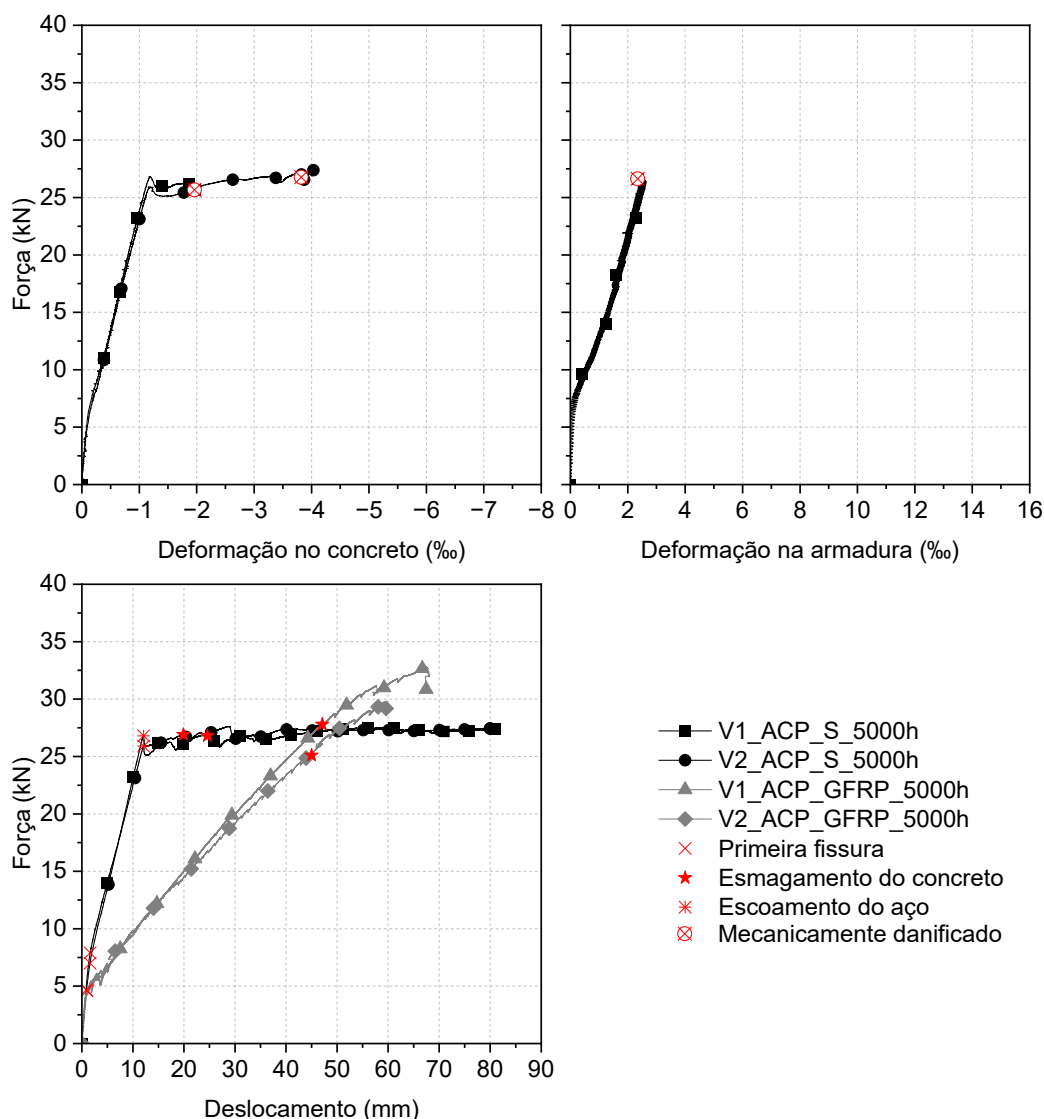
**Figura 88: Esmagamento do concreto (a) e ruptura da barra de GFRP (b) da viga V1\_LAB\_GFRP\_10000h**



### 4.3.3 EXPOSIÇÃO DE 5000 HORAS A SOLUÇÃO SALINA

Na Figura 89 encontram-se os gráficos de força *versus* deformação no concreto e na armadura e força *versus* deslocamento vertical das vigas de concreto com armadura longitudinal positiva de aço e de GFRP mantidas durante 5000 horas em solução salina (V\_ACP\_S\_5000h e V\_ACP\_GFRP\_5000h).

**Figura 89: Força *versus* deformação no concreto e na armadura e Força *versus* deslocamento vertical para as vigas V\_ACP\_S\_5000h e V\_ACP\_GFRP\_5000h**



É possível observar que o extensômetro responsável por aferir a deformação no concreto da viga V1\_ACP\_S\_5000h foi mecanicamente danificado logo após o início do escoamento. Entretanto, ainda assim foi possível registrar o comportamento típico das vigas com armadura de aço, para as quais a deformação no concreto segue o comportamento da armadura de aço, apresentando patamar no qual a deformação aumenta sem incrementos de força aplicada, tal como também pode ser observado para a viga V2\_ACP\_S\_500h. Com

relação à armadura de aço, nota-se que não foi possível registrar as deformações no aço da viga V2\_ACP\_S\_5000h uma vez que o extensômetro foi danificado antes da execução do ensaio. A leitura das deformações na armadura da V1\_ACP\_5000h foi realizada até o momento do escoamento do aço, momento no qual o extensômetro foi danificado. Os extensômetros responsáveis por aferir as deformações no concreto e na armadura longitudinal das vigas com armadura de GFRP foram mecanicamente danificados antes da realização dos ensaios, possivelmente devido à umidade proveniente do ambiente de exposição. Por esse motivo, não foi possível obter os gráficos de força *versus* deformação no concreto e na armadura de GFRP.

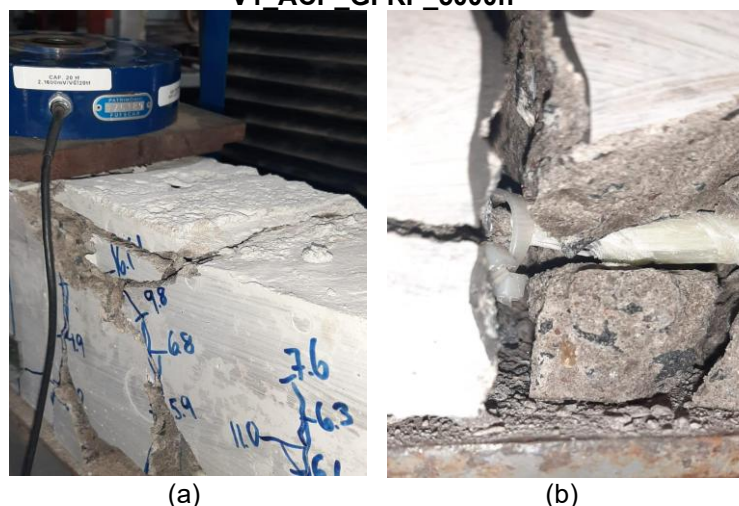
É possível verificar o comportamento típico de vigas fletidas com armadura de aço, baseado nos três estágios de carregamento distintos. Assim, as vigas apresentaram inicialmente comportamento elástico-linear, com o concreto resistindo aos esforços impostos até força e deslocamentos verticais médios de 7,5 kN e 1,6 mm, respectivamente, sendo observada a abertura da primeira fissura. A partir deste ponto, houve redução de aproximadamente 61 % na rigidez da viga, tendo em vista que o concreto passou a trabalhar fissurado e a armadura de aço passou a resistir aos esforços de tração com comportamento elástico-linear até o início do escoamento, o qual se deu com força e deslocamento vertical médios de 26,4 kN e 12,1 mm, respectivamente. Após o escoamento do aço foi observada a formação de patamar até a finalização do ensaio, ocorrendo o início do esmagamento do concreto com força média de 26,9 kN e deslocamento vertical médio de 22,3 mm. O modo de ruína das vigas V\_ACP\_S\_5000h foi governado pelo escoamento da armadura longitudinal de aço com posterior esmagamento do concreto comprimido.

Na Figura 89 também é possível observar o comportamento típico das vigas de concreto com armadura de GFRP submetidas à flexão, caracterizado por três estágios distintos. No primeiro estágio o concreto trabalha em regime elástico-linear, resistindo à totalidade dos esforços de tração e compressão impostos. A partir da abertura da primeira fissura com força e deslocamento vertical médios de 4,7 kN e 1,0 mm, respectivamente, ocorreu uma redução de aproximadamente 90 % na rigidez do elemento e teve início o segundo estágio de carregamento, no qual o concreto passou a trabalhar fissurado, resistindo aos esforços de compressão, e a armadura passou a resistir aos esforços de tração. Neste estágio, observou-se o comportamento linear até o esmagamento do concreto comprimido com força média de 26,5 kN e deslocamento vertical médio de 46,1 mm. O terceiro estágio teve início com o esmagamento do concreto, sendo observado um desvio da linearidade do comportamento mecânico em função da plastificação do concreto comprimido, e se encerrou com a ruptura da armadura de GFRP tracionada. O modo de ruína das vigas V\_ACP\_GFRP\_5000h foi governado pelo esmagamento do concreto seguido da ruptura da

barra de GFRP. A Figura 90 apresenta o esmagamento do concreto comprimido e a ruptura da armadura da viga V1\_ACP\_GFRP\_5000h.

No Apêndice C.2 são apresentados os gráficos complementares obtidos para as vigas V\_ACP\_S\_5000h e V\_ACP\_GFRP\_5000h.

**Figura 90: Esmagamento do concreto (a) e ruptura da barra de GFRP (b) da viga V1\_ACP\_GFRP\_5000h**

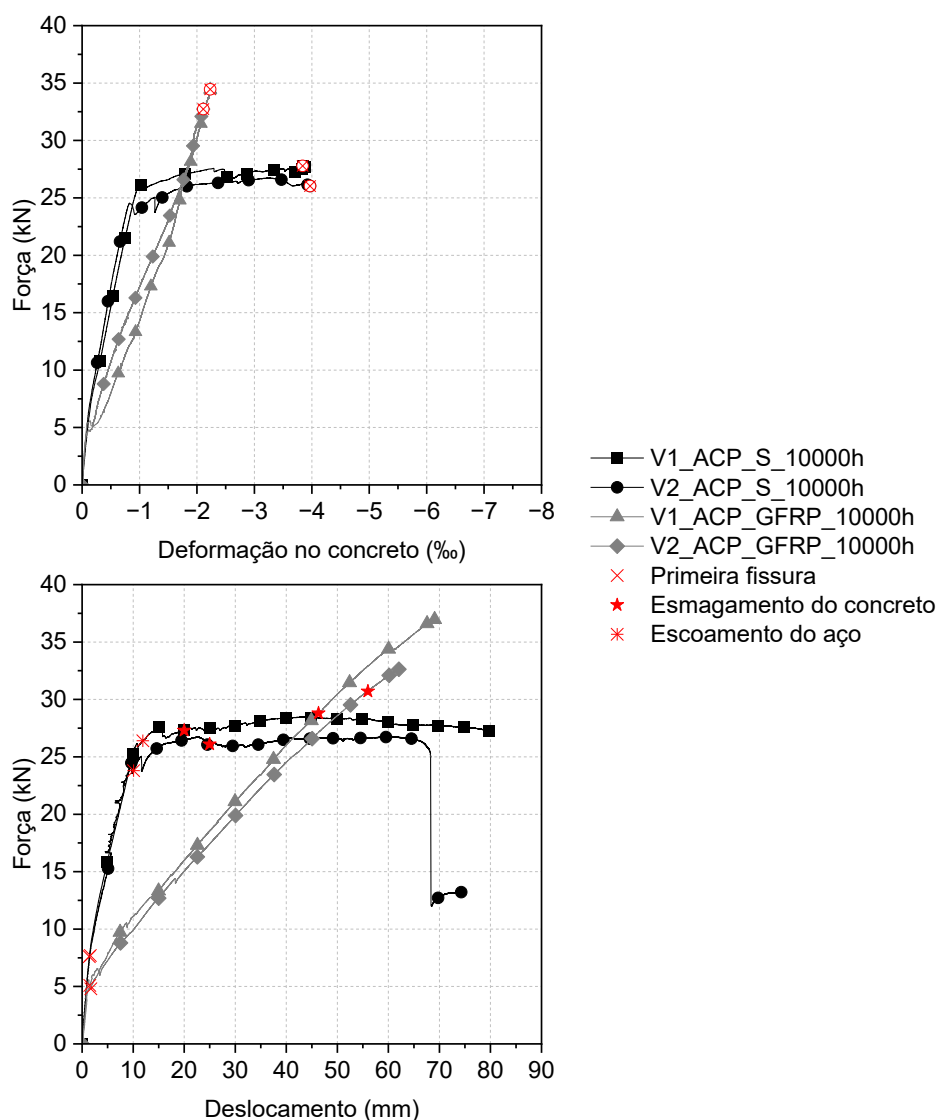


#### 4.3.4 EXPOSIÇÃO DE 10000 HORAS A SOLUÇÃO SALINA

Na Figura 91 encontram-se os gráficos de força *versus* deformação no concreto e força *versus* deslocamento vertical das vigas de concreto com armadura longitudinal positiva de aço e de GFRP mantidas durante 10000 horas em solução salina (V\_ACP\_S\_10000h e V\_ACP\_GFRP\_10000h). Não foi possível a obtenção dos gráficos de força *versus* deformação no aço, uma vez que os extensômetros instalados nas armaduras das vigas antes da concretagem encontraram-se danificados, possivelmente devido à ação da solução.

O comportamento típico de vigas de concreto com armadura de aço submetidas à flexão encontra-se registrado na Figura 91, sendo possível observar a formação de patamar de escoamento do aço. Verifica-se o comportamento elástico-linear até o surgimento da primeira fissura com força e deslocamento médios de 7,7 kN e 1,5 mm, respectivamente. Subsequentemente, a armadura de aço passou a ser solicitada, com o concreto resistindo aos esforços de compressão. Nesse estágio, verificou-se a redução de aproximadamente 64 % na rigidez do elemento e comportamento linear até o escoamento do aço, o que ocorreu com força e deslocamento médios de 25,1 kN e 11,0 mm, respectivamente. No último estágio de carregamento nota-se a formação de patamar até a finalização do ensaio, sendo observado esmagamento no concreto com força e deslocamento médios de 26,7 kN e 22,5 mm, respectivamente.

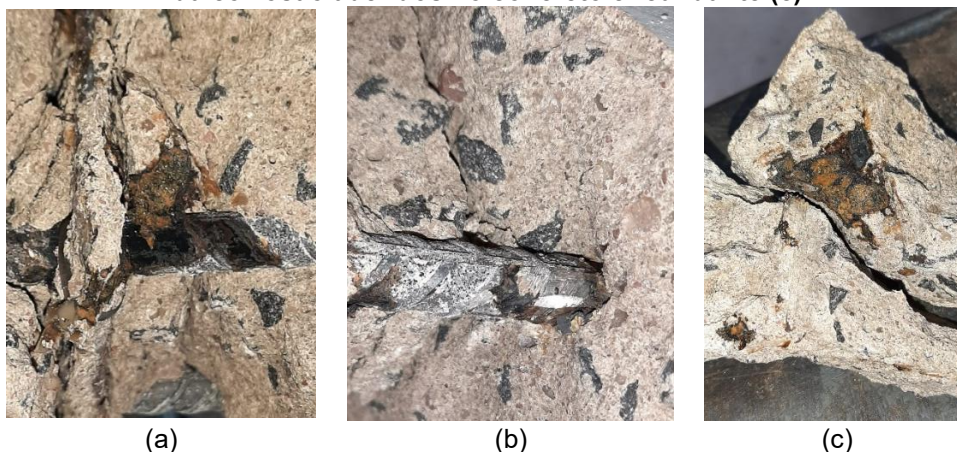
**Figura 91: Força versus deformação no concreto e Força versus deslocamento vertical para as vigas V\_ACP\_S\_10000h e V\_ACP\_GFRP\_10000h**



Devido à degradação do aço pela ação da corrosão desencadeada pela presença de cloretos na solução, a armadura longitudinal da viga V2\_ACP\_S\_10000h apresentou falha quando atingiu força e deslocamento de 24,8 kN e 68,3 mm, respectivamente. Neste ponto, a força resistida caiu para 12 kN, entretanto, a viga continuou a suportar carregamento até atingir força e deslocamento médios de 13,2 kN e 74,3 mm, respectivamente, momento no qual a armadura de aço apresentou ruptura. A Figura 92 evidencia a corrosão instalada na armadura longitudinal da viga V2\_ACP\_S\_10000h.

De forma geral, o modo de ruína obtido para as vigas V\_ACP\_S\_10000h baseou-se no escoamento do aço com posterior esmagamento do concreto.

**Figura 92: Corrosão instalada na armadura de aço da viga V2\_ACP\_S\_10000h (a-b) e produtos da corrosão aderidos no concreto circundante (c)**



Observando-se a Figura 91 verifica-se ainda o comportamento típico de vigas de concreto com armadura de GFRP submetidas à flexão. Assim, o primeiro estágio é caracterizado pelo concreto resistindo à totalidade dos esforços e trabalhando com comportamento elástico-linear, e é finalizado com a abertura da primeira fissura com força e deslocamento médios de 5,0 kN e 1,6 mm, respectivamente. Em seguida, verificou-se uma redução de rigidez do elemento em torno de 84 %, iniciando-se o segundo estágio de carregamento. No segundo estágio, observou-se comportamento linear até o esmagamento do concreto, o que ocorreu com força média de 29,8 kN e deslocamento vertical médio de 51,2 mm. No terceiro estágio verificou-se a plastificação do concreto e a ruptura da barra de GFRP ao término do ensaio. O modo de ruína das vigas V\_ACP\_GFRP\_10000h foi baseado no esmagamento do concreto comprimido com posterior ruptura da barra de GFRP (Figura 93).

No Apêndice C.2 encontram-se apresentados os gráficos complementares das vigas V\_ACP\_S\_10000h e V\_ACP\_GFRP\_10000h.

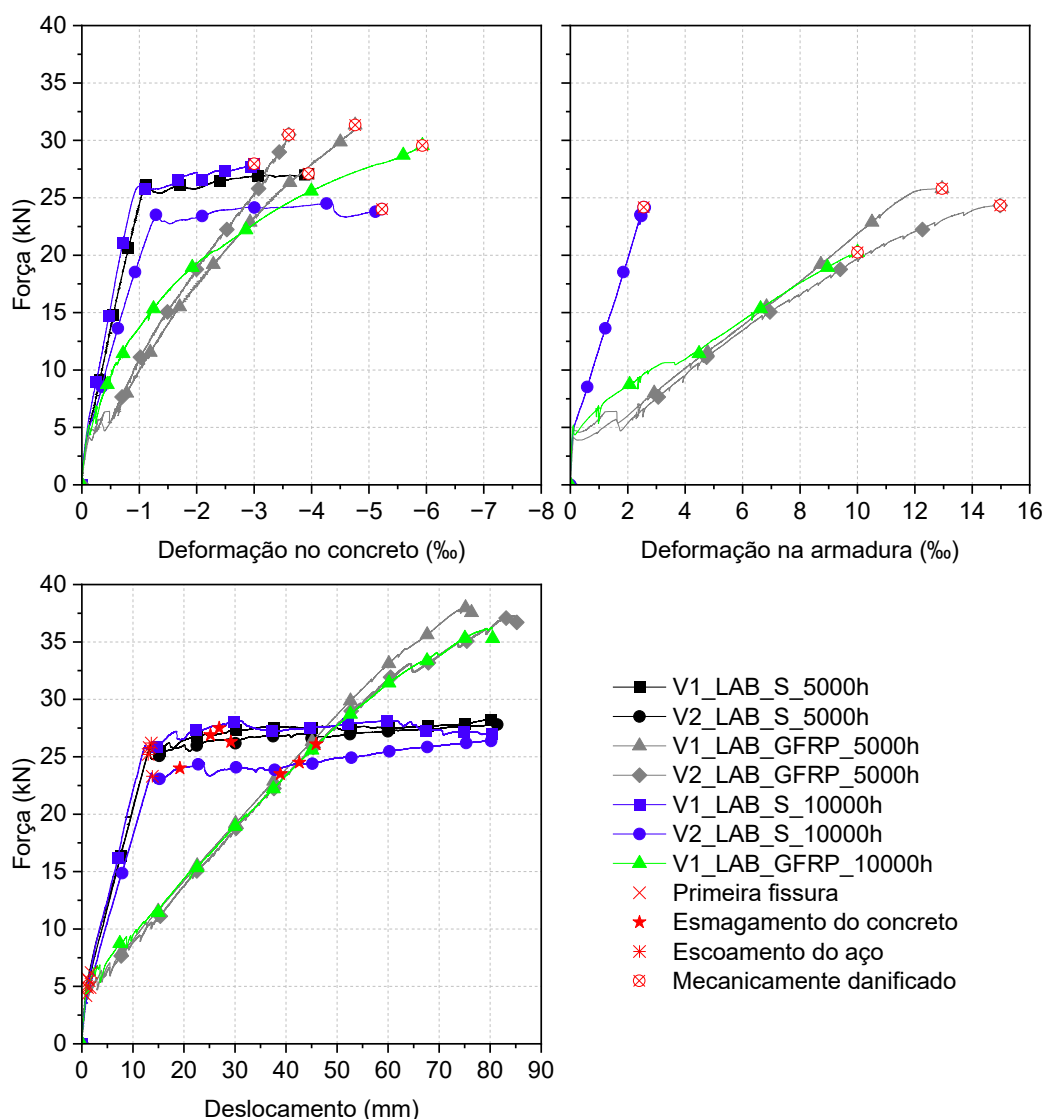
**Figura 93: Ruptura da armadura de GFRP da viga V2\_ACP\_GFRP\_10000h**



#### 4.3.5 COMPARAÇÃO ENTRE VIGAS COM ARMADURA DE AÇO E DE GFRP

Na Figura 94 são apresentados os gráficos comparativos de força *versus* deformação no concreto e na armadura e força *versus* deslocamento vertical das vigas V\_LAB\_S\_5000h, V\_LAB\_GFRP\_5000h, V\_LAB\_S\_10000h e V\_LAB\_GFRP\_10000h. Algumas curvas de força *versus* deformação no concreto e na armadura não puderam ser elaboradas devido aos problemas relacionados à aquisição das deformações já comentados.

**Figura 94: Força *versus* deformação no concreto e na armadura e Força *versus* deslocamento vertical para as vigas V\_LAB\_S\_5000h, V\_LAB\_GFRP\_5000h, V\_LAB\_S\_10000h e V\_LAB\_GFRP\_10000h**



Observando-se a Figura 94 nota-se que o comportamento das deformações no concreto segue o padrão da curva força *versus* deslocamento do elemento, sendo que as curvas relacionadas às vigas com armadura de aço apresentam patamar e as curvas relacionadas às vigas com armadura de GFRP apresentam comportamento aproximadamente linear. Após o início da fissuração, as deformações apresentadas pelo concreto das vigas com

armadura de GFRP são superiores às deformações apresentadas pelo concreto das vigas com armadura de aço para um mesmo valor de força aplicada. Este fato se deve à menor rigidez do elemento armado com barras de GFRP, tendo em vista que o módulo de elasticidade deste material é cerca de 4 vezes inferior ao módulo de elasticidade do aço. Pelo mesmo motivo, nota-se que, após a fissuração, as deformações na armadura de GFRP são superiores às deformações na armadura de aço para um mesmo nível de força aplicada.

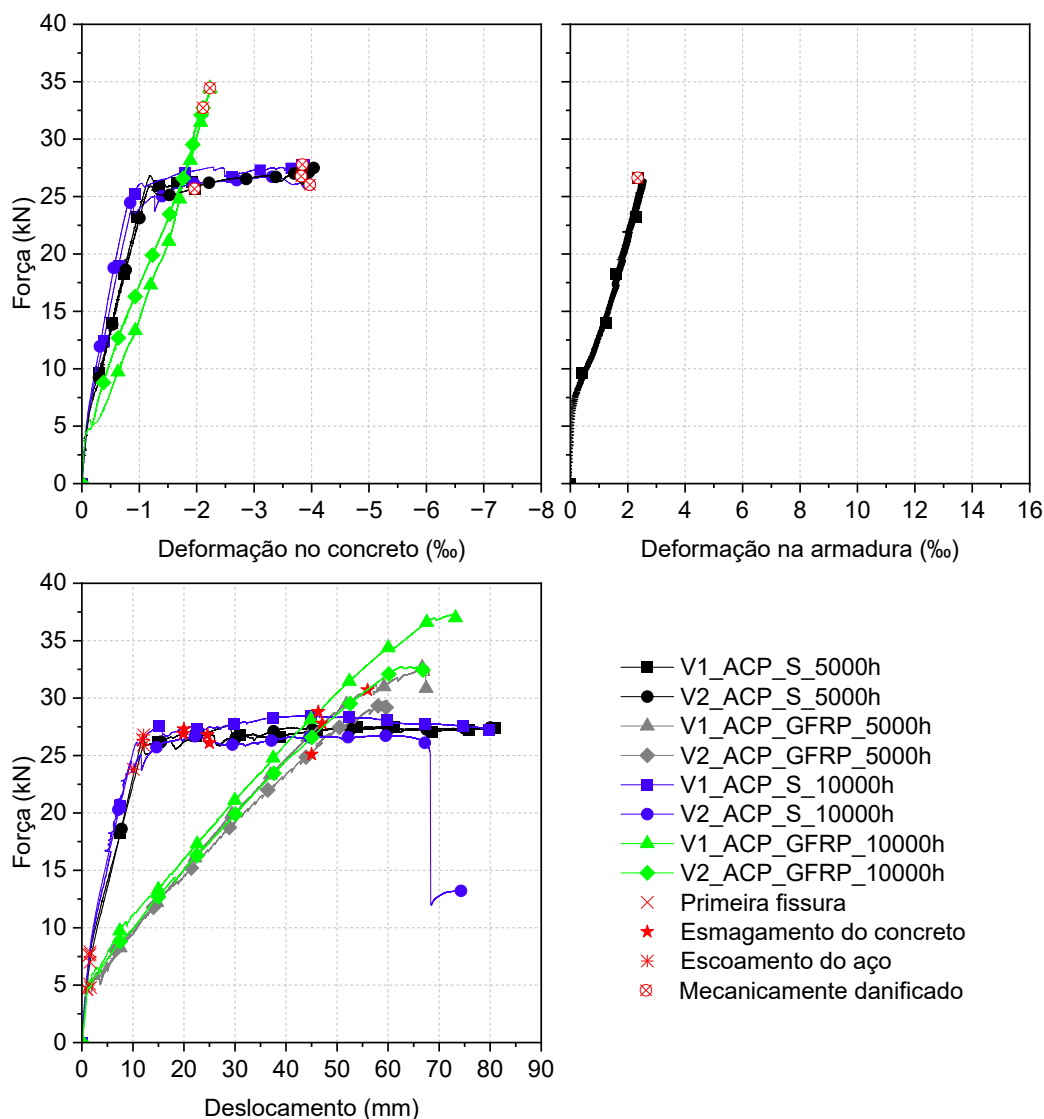
Com relação às curvas força *versus* deslocamento, observa-se que até o momento da abertura da primeira fissura as vigas se comportam de forma análoga, com rigidez semelhante, uma vez que o concreto é quem resiste aos esforços impostos, trabalhando em regime elástico, e a armadura ainda não foi solicitada. Com o início da fissuração, a armadura longitudinal passa a ser solicitada e o comportamento da armadura influencia o comportamento do elemento estrutural como um todo. Assim, tendo em vista o menor módulo de elasticidade do GFRP, tem-se uma diferença de aproximadamente 71 % na rigidez das vigas V\_LAB\_GFRP\_5000h e V\_LAB\_GFRP\_10000h em relação às vigas V\_LAB\_S\_5000h e V\_LAB\_S\_10000h.

Observa-se as diferenças nos comportamentos das vigas com armadura de aço e de GFRP, sendo que as primeiras apresentam a formação de patamar no qual o deslocamento vertical aumenta sem grandes incrementos de força aplicada, caracterizando o escoamento do aço, e a segunda apresenta comportamento aproximadamente linear até a ruptura. As vigas V\_LAB\_GFRP\_5000h e V\_LAB\_GFRP\_10000h apresentam capacidade resistente superior, em cerca de 34 % e 36 %, às vigas V\_LAB\_S\_5000h e V\_LAB\_S\_10000h, respectivamente. Entretanto, tais vigas apresentam maiores deslocamentos para um mesmo valor de força aplicada devido ao menor módulo de elasticidade do GFRP.

Na Figura 95 são apresentados os gráficos comparativos de força *versus* deformação no concreto e na armadura e força *versus* deslocamento vertical das vigas V\_ACP\_S\_5000h, V\_ACP\_GFRP\_5000h, V\_ACP\_S\_10000h e V\_ACP\_GFRP\_10000h. Foi possível apenas a produção do gráfico de força *versus* deformação na armadura da viga V1\_ACP\_S\_5000h devido à avaria dos extensômetros instalados nas armaduras das demais vigas devido ao período de exposição à solução salina.

Conforme pode ser visto na Figura 95, antes do início da fissuração as deformações no concreto são muito próximas para todas as vigas, uma vez que este atua sozinho resistindo aos esforços impostos. Entretanto, após a fissuração, o concreto passa a resistir aos esforços de compressão e a armadura passa a atuar resistindo aos esforços de tração. A partir de então, o comportamento das deformações no concreto é influenciado pelas características das armaduras. Nas vigas com armadura de GFRP observam-se maiores deformações no concreto para um mesmo valor de força aplicada, em relação às vigas com armadura de aço, devido à menor rigidez desses elementos.

**Figura 95: Força versus deformação no concreto e na armadura e Força versus deslocamento vertical para as vigas V\_ACP\_S\_5000h, V\_ACP\_GFRP\_5000h, V\_ACP\_S\_10000h e V\_ACP\_GFRP\_10000h**

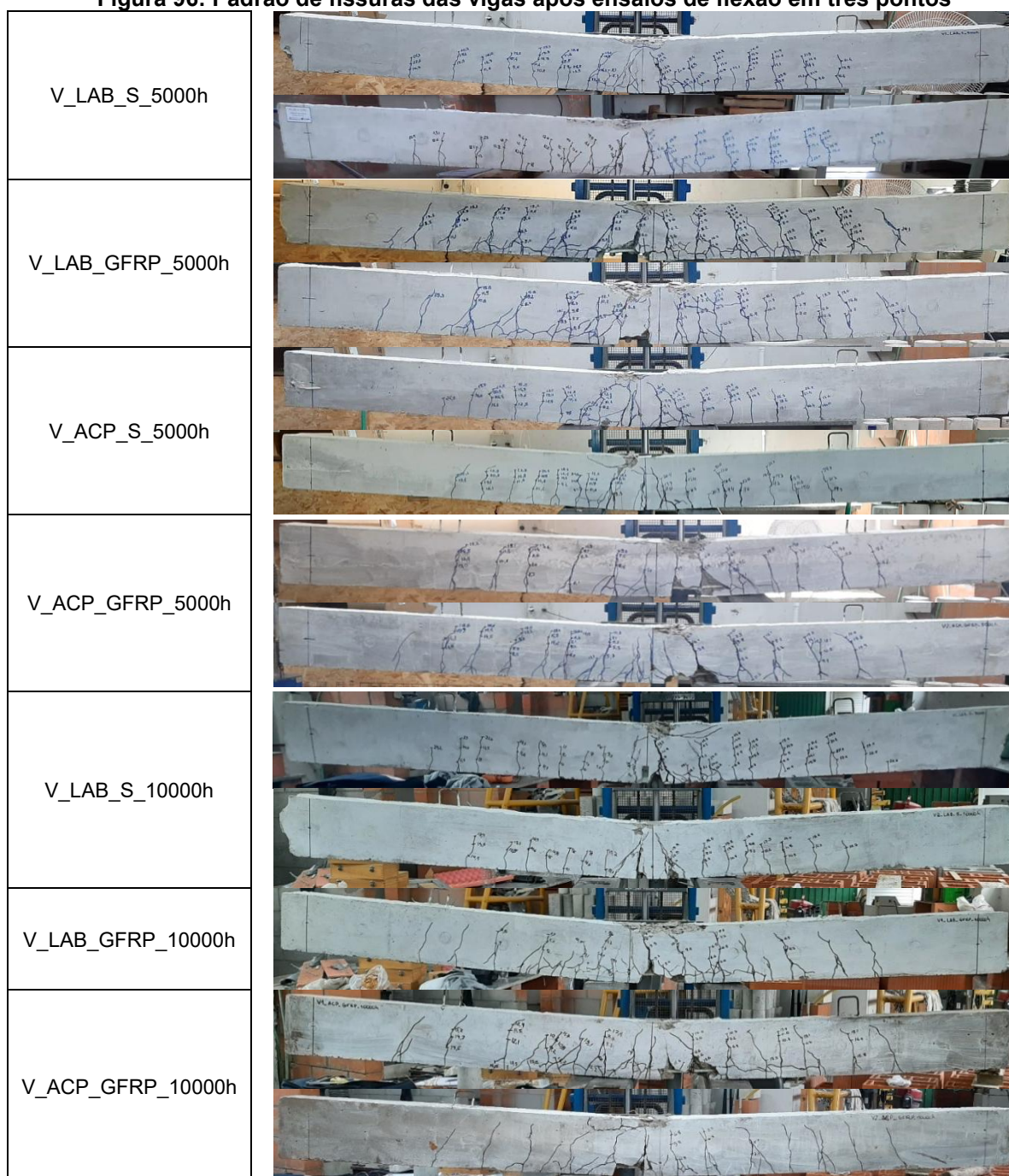


Com relação às curvas de força *versus* deslocamento, é possível verificar que até o início da fissuração todas as vigas apresentam comportamento similar. Após a fissuração, observa-se rigidez cerca de 73 % inferior para as vigas V\_ACP\_GFRP\_5000h e V\_ACP\_GFRP\_10000h em relação às vigas V\_ACP\_S\_5000h e V\_ACP\_S\_10000h. Após a fissuração, o comportamento das vigas com armadura de aço passa a ser elástico-linear até o início do escoamento do aço, com posterior formação de patamar. Já o comportamento das vigas com armadura de GFRP permanece aproximadamente linear até a ruptura, observando-se um pequeno desvio da linearidade após o início do esmagamento do concreto, em função da plastificação do material comprimido. Apesar das vigas V\_ACP\_GFRP\_5000h e V\_ACP\_GFRP\_10000h apresentarem maiores deslocamentos verticais para um mesmo valor de força aplicada, essas apresentaram capacidade resistente aproximadamente 14 % e 30 % superior, em relação às vigas V\_ACP\_S\_5000h e V\_ACP\_S\_10000h, respectivamente. Nota-

se que, para um mesmo nível de força (considerando o trecho linear das curvas), o deslocamento vertical das vigas com armadura de GFRP é aproximadamente 3 vezes maior quando comparado às vigas com armadura de aço, tanto para as vigas mantidas em ambiente laboratorial quanto imersas em solução salina, corroborando a afirmação de Shanour *et al.* (2014).

Na Figura 96 encontra-se apresentado o padrão de fissuração das vigas, com exceção das vigas V\_ACP\_S\_10000h cujas imagens foram perdidas.

**Figura 96: Padrão de fissuras das vigas após ensaios de flexão em três pontos**



Tendo em vista que a relação entre os módulos de elasticidade do GFRP e do aço é igual a aproximadamente um quarto, tal como afirma Ifrahim, Sangi e Ahmad (2023), as vigas com armadura de GFRP apresentaram menor rigidez à flexão, maiores deslocamentos e maiores aberturas de fissura em relação às vigas com armadura de aço.

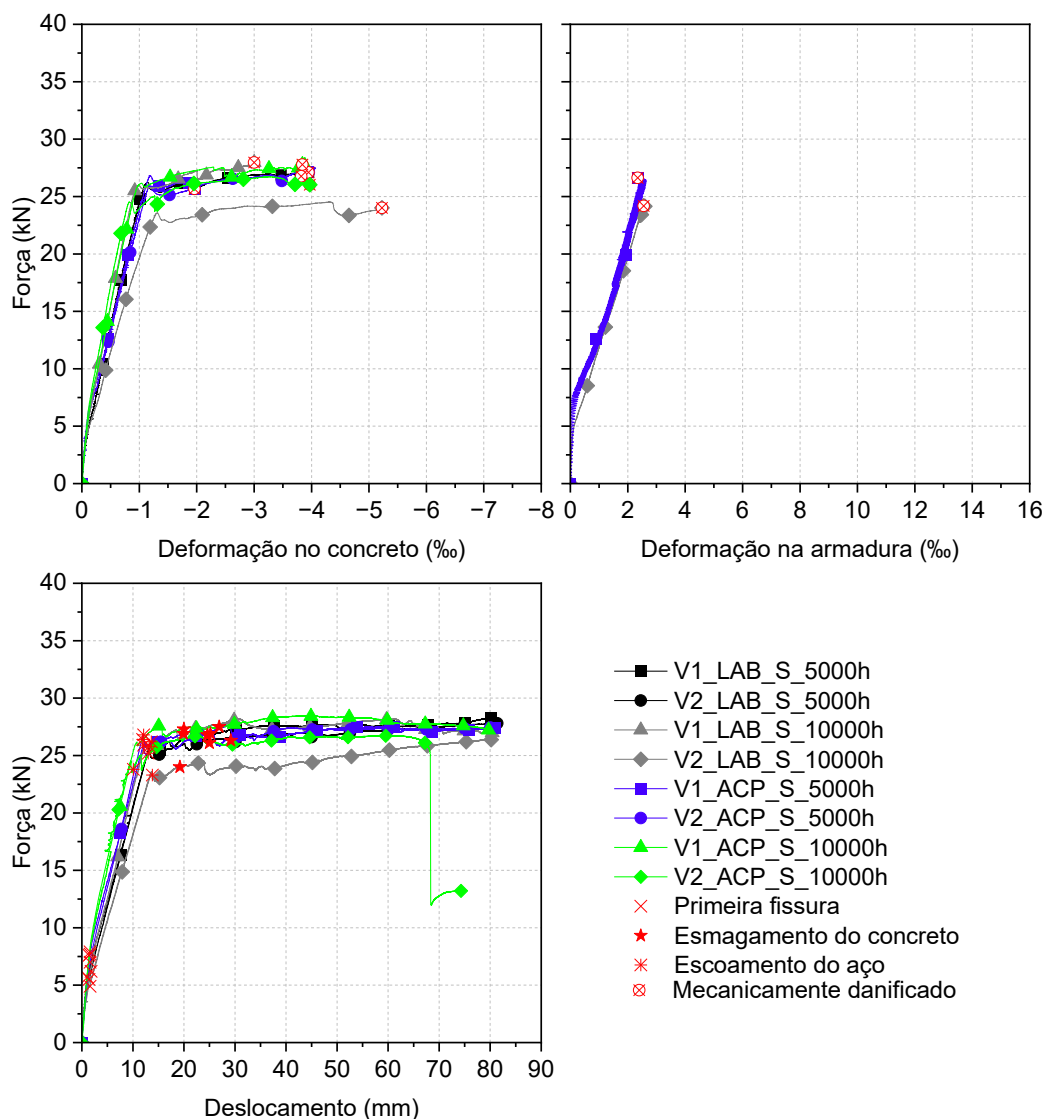
Todas as vigas apresentaram a abertura da primeira fissura a meio vão, a partir da face inferior, devido aos esforços de flexão no local de máximo momento fletor. Com o aumento da força aplicada, as fissuras localizadas a meio vão aumentaram e se dirigiram à face superior das vigas, além de novas fissuras surgirem em direção aos apoios devido à atuação conjunta do momento fletor e esforço cortante. Conforme pode ser visto na Figura 96, as vigas com armadura de GFRP apresentaram menor profundidade de linha neutra e fissuras com maior comprimento e abertura devido ao menor módulo de elasticidade do GFRP, tal como visto na literatura (Kaszynska, Blyszko, Olczyk, 2017; Abdelkarim *et al.*, 2019).

#### **4.3.6 COMPARAÇÃO ENTRE AMBIENTES DE EXPOSIÇÃO**

Na Figura 97 são apresentados os gráficos comparativos de força *versus* deformação no concreto e na armadura e força *versus* deslocamento vertical das vigas V\_LAB\_S\_5000h, V\_ACP\_S\_5000h, V\_LAB\_S\_10000h e V\_ACP\_S\_10000h. Ressalta-se que os já referidos problemas relacionados à danificação de extensômetros impossibilitaram a elaboração de algumas curvas de força *versus* deformação no concreto e na armadura.

Observa-se na Figura 97 que a deformação no concreto das vigas com armadura de aço apresenta um comportamento semelhante em ambos os ambientes de exposição, excetuando-se a viga V2\_LAB\_S\_10000h, cujo concreto exibiu deformações ligeiramente superiores na região linear da curva, antes do início do escoamento do aço. Nota-se que a inclinação do trecho linear das curvas de força *versus* deformação no concreto apresenta pequenas diferenças, sendo as curvas das vigas V\_ACP\_S\_10000h as que possuem maior inclinação e as curvas das vigas V\_LAB\_S\_10000h as que possuem menor inclinação. Isso se deve ao maior módulo de elasticidade do concreto das vigas V\_ACP\_S\_5000h e V\_ACP\_S\_10000h (33,8 GPa e 41,0 GPa, respectivamente) em comparação com as vigas V\_LAB\_S\_5000h e V\_LAB\_S\_10000h (32,8 GPa e 25,7 GPa, respectivamente). A presença de umidade proveniente da imersão das vigas e corpos de prova em solução salina acarreta o aumento das propriedades mecânicas do concreto (resistência à compressão e módulo de elasticidade), não sendo observadas degradações em função da exposição acelerada. Não foi possível estabelecer comparações entre os ambientes de exposição quanto às deformações das armaduras, tendo em vista à impossibilidade de obtenção da maior parte das curvas.

**Figura 97: Força versus deformação no concreto e na armadura e Força versus deslocamento vertical para as vigas V\_LAB\_S\_5000h, V\_LAB\_S\_10000h, V\_ACP\_S\_5000h e V\_ACP\_S\_10000h**



O comportamento das vigas em relação às curvas força *versus* deslocamento é bastante similar. As vigas V\_LAB\_S\_5000h e V\_LAB\_S\_10000h apresentaram início de fissuração, escoamento da armadura de aço e esmagamento do concreto com forças médias de 6,0 kN, 25,9 kN e 26,6 kN, e 5,2 kN, 24,6 kN e 25,8 kN, respectivamente. Já as vigas V\_ACP\_S\_5000h e V\_ACP\_S\_10000h registraram esses mesmos eventos com forças médias de 7,5 kN, 26,4 kN e 26,9 kN, e 7,7 kN, 25,1 kN e 26,7 kN, respectivamente. A força máxima resistida pelas vigas também foi muito similar, sendo obtidos valores médios de 28,1 kN, 26,7 kN, 27,4 kN e 27,0 kN para as vigas V\_LAB\_S\_5000h, V\_LAB\_S\_10000h, V\_ACP\_S\_5000h e V\_ACP\_S\_10000h, respectivamente. Entretanto, observou-se a ruptura da armadura de aço da viga V2\_ACP\_S\_10000h com deslocamento vertical de cerca de 75 mm devido à corrosão induzida pela presença de cloretos provenientes da solução salina.

Segundo Graeff (2007), ainda que um nível crítico de cloretos atinja a armadura, pode não haver disponibilidade suficiente de oxigênio para desencadear o processo corrosivo, mesmo que a armadura esteja despassivada. Como a exposição acelerada das vigas à solução salina se deu por sua imersão na solução, entende-se que o processo corrosivo não foi iniciado durante a exposição, uma vez que, nessa situação não havia o oxigênio necessário para tal. Todavia, o fechamento dos laboratórios causado pela pandemia de COVID-19 implicou no desligamento do tanque de degradação após atingir as 10000 horas, permanecendo nesta condição durante 302 dias. Neste período em que o tanque permaneceu desligado, a dificuldade de acesso para manutenção acarretou a flutuação do nível de solução, possibilitando o ingresso do oxigênio necessário para iniciação do processo corrosivo na armadura de aço. Assim, a aplicação do protocolo de acondicionamento acelerado do ACI 440.9R (2015) em vigas com armadura de aço, isto é, a imersão das vigas em solução salina à temperatura de  $50 \pm 3$  °C, não foi eficiente para acelerar a degradação das vigas com armadura de aço.

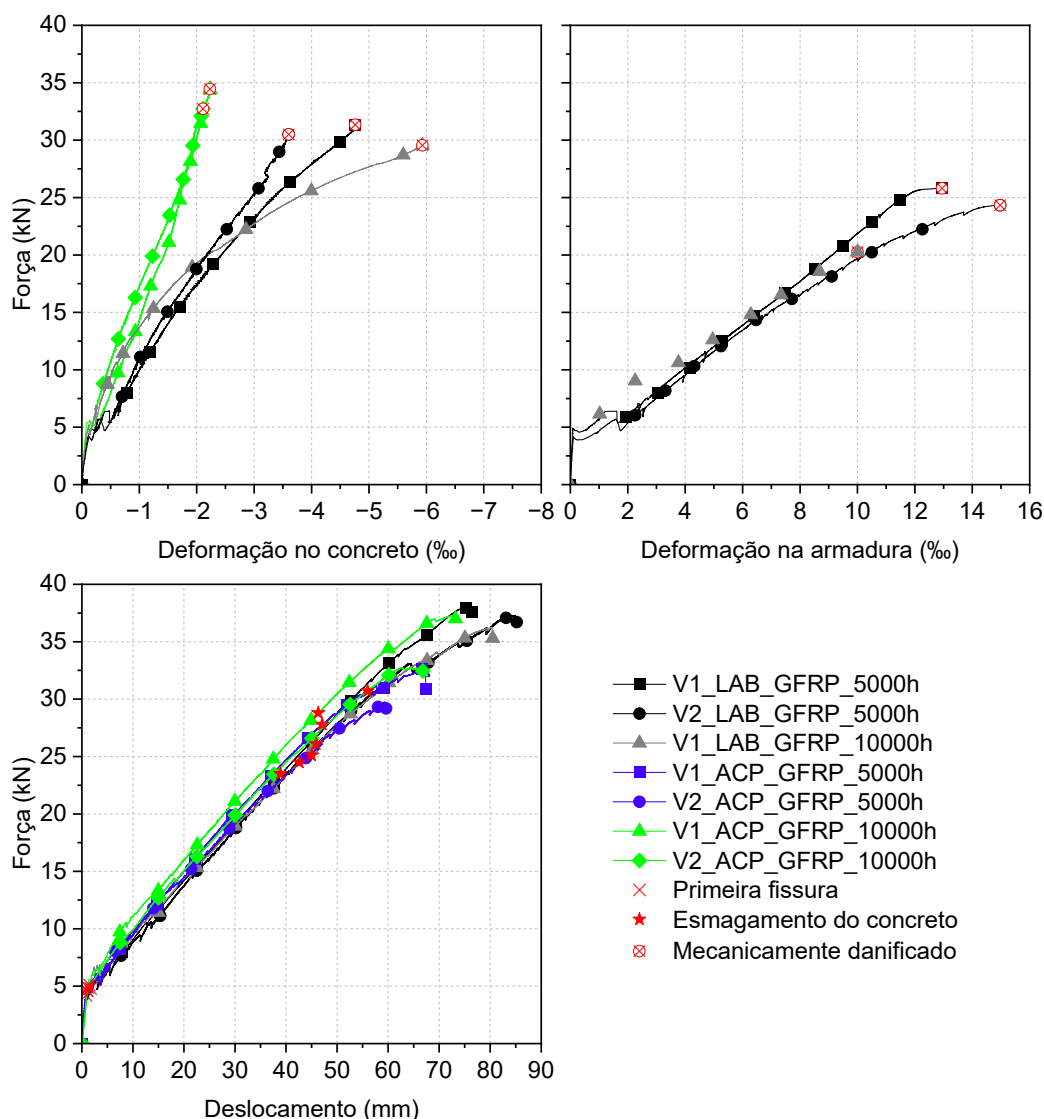
Na Figura 98 encontram-se os gráficos comparativos de força *versus* deformação no concreto e na armadura e força *versus* deslocamento vertical das vigas V\_LAB\_GFRP\_5000h, V\_LAB\_GFRP\_10000h, V\_ACP\_GFRP\_5000h e V\_ACP\_GFRP\_10000h. Não foi possível a obtenção das curvas de força *versus* deformação no concreto e na armadura de algumas vigas devido à problemas com a danificação dos extensômetros, conforme já abordado.

Na Figura 98 é possível perceber que as vigas com armadura de GFRP mantidas em solução salina durante 10000 horas (V\_ACP\_GFRP\_10000h) apresentaram menores deformações no concreto para um mesmo valor de força aplicada em relação às vigas mantidas em ambiente laboratorial (V\_LAB\_GFRP\_5000h e V\_LAB\_GFRP\_10000h). Esse fato pode ser associado ao incremento das propriedades do concreto devido à presença de água, tal como evidenciado nos ensaios realizados em corpos de prova de concreto para os quais foram obtidos resistência à compressão e módulo de elasticidade iguais à 31,8 MPa e 32,8 GPa, e 25,1 MPa e 25,7 GPa após 5000 e 10000 horas de exposição a ambiente laboratorial, respectivamente, e iguais à 38,2 MPa e 41,0 GPa após 10000 horas de imersão em solução salina. Com relação às deformações na armadura, não foi possível estabelecer comparações entre os ambientes de exposição devido à impossibilidade de obtenção das curvas de força *versus* deformação na armadura após 5000 e 10000 horas de exposição das vigas à solução salina.

No que diz respeito às curvas de força *versus* deslocamento, nota-se que as vigas apresentam comportamentos muito similares. As vigas V\_LAB\_GFRP\_5000h e V\_LAB\_GFRP\_10000h apresentaram início de fissuração e esmagamento do concreto com forças médias de 4,6 kN e 24,8 kN, e 5,0 kN e 24,5 kN, respectivamente, enquanto as vigas V\_ACP\_GFRP\_5000h e V\_ACP\_GFRP\_10000h apresentaram início de fissuração e

esmagamento do concreto com forças médias de 4,7 kN e 26,5 kN, e 5,0 kN e 29,8 kN, respectivamente. As pequenas diferenças observadas nas forças médias relativas ao esmagamento do concreto se devem à maior resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto das vigas imersas em solução salina.

**Figura 98: Força versus deformação no concreto e na armadura e Força versus deslocamento vertical para as vigas V\_LAB\_GFRP\_5000h, V\_LAB\_GFRP\_10000h, V\_ACP\_GFRP\_5000h e V\_ACP\_GFRP\_10000h**



As vigas V\_LAB\_GFRP\_5000h e V\_LAB\_GFRP\_10000h apresentaram ruptura com forças e deslocamentos verticais médios de 37,7 kN e 80,0 mm, e 36,3 kN e 80,4 mm, respectivamente, enquanto as vigas V\_ACP\_GFRP\_5000h e V\_ACP\_GFRP\_10000h apresentaram ruptura com forças e deslocamentos verticais médios de 31,3 kN e 63,3 mm, e 35,1 kN e 69,4 mm, respectivamente. Desta forma, foram observadas reduções de cerca de 17 % e 3 % na capacidade resistente e de 21 % e 14 % no deslocamento vertical das vigas com armadura de GFRP imersas em solução salina durante 5000 e 10000 horas, em relação

às vigas com armadura de GFRP mantidas em ambiente laboratorial durante 5000 e 10000 horas, respectivamente. Assim, do ponto de vista mecânico, a aplicação do protocolo de condicionamento acelerado do ACI 440.9R (2015) em vigas com armadura de GFRP, isto é, a imersão das vigas em solução salina à temperatura de  $50 \pm 3$  °C, acelerou a degradação das vigas.

#### 4.3.7 COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS DE MAZZÚ (2020)

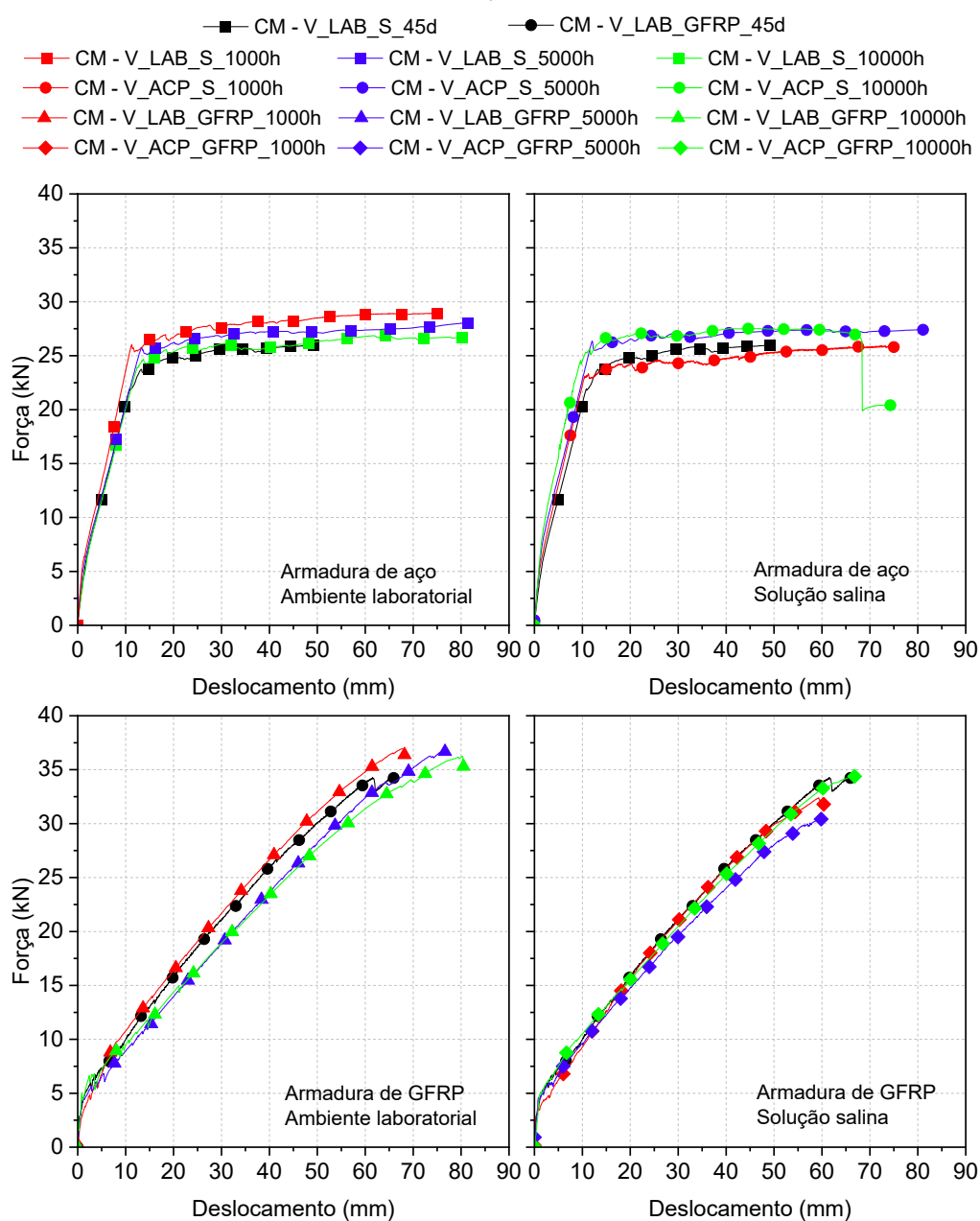
Os resultados obtidos neste trabalho foram comparados aos resultados obtidos por Mazzú (2020), sendo utilizadas as curvas médias (CM) de força *versus* deslocamento vertical a meio vão. Assim, na Figura 99 são apresentados os gráficos de força *versus* deslocamento vertical para as vigas com armadura de aço e GFRP ensaiadas 45 dias após a concretagem (V\_LAB\_S\_45d e V\_LAB\_GFRP\_45d - referência), mantidas em ambiente laboratorial durante 1000, 5000 e 10000 horas (V\_LAB\_S\_1000h, V\_LAB\_GFRP\_1000h, V\_LAB\_S\_5000h, V\_LAB\_GFRP\_5000h, V\_LAB\_S\_10000h e V\_LAB\_GFRP\_10000h) e mantidas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas (V\_ACP\_S\_1000h, V\_ACP\_GFRP\_1000h, V\_ACP\_S\_5000h, V\_ACP\_GFRP\_5000h, V\_ACP\_S\_10000h e V\_ACP\_GFRP\_10000h).

Conforme pode ser observado na Figura 99, as vigas V\_LAB\_S\_1000h apresentaram força máxima média resistida de cerca de 29,1 kN, enquanto as vigas V\_LAB\_S\_45d apresentaram força máxima média resistida de cerca de 26,1 kN. Com relação às vigas V\_LAB\_S\_5000h e V\_LAB\_S\_10000h, observam-se forças máximas médias resistidas de aproximadamente 28,1 kN e 26,7 kN, valores próximos aos obtidos para as vigas V\_LAB\_S\_45d e V\_LAB\_S\_1000h. Nota-se que as vigas V\_LAB\_S\_45d, V\_LAB\_S\_1000h, V\_LAB\_S\_5000h e V\_LAB\_S\_10000h não apresentaram diferenças significativas com relação à sua rigidez. Desta forma, em relação às vigas de referência (V\_LAB\_S\_45d), após 5000 e 10000 horas de exposição em ambiente laboratorial as vigas com armadura de aço mantiveram seu comportamento mecânico e não sofreram degradação. Ressalta-se que todas as vigas apresentaram ruína pelo escoamento da armadura de aço seguido do esmagamento do concreto. Cabe destacar ainda que os ensaios de flexão de três pontos das vigas V\_LAB\_S\_45d foram interrompidos com deslocamentos verticais de aproximadamente 50 mm, tendo em vista que foram os primeiros ensaios realizados e foram levados até o esmagamento do concreto (Mazzú, 2020). Posteriormente, foi adotado como critério de parada dos ensaios deslocamentos verticais de aproximadamente 80 mm.

Na Figura 99 nota-se também que as forças máximas médias resistidas por todas as vigas com armadura de GFRP mantidas em ambiente laboratorial foram equivalentes, sendo observados valores de aproximadamente 35,0 kN, 37,0 kN, 37,7 kN e 36,3 kN para as vigas V\_LAB\_GFRP\_45d, V\_LAB\_GFRP\_1000h, V\_LAB\_GFRP\_5000h e V\_LAB\_GFRP\_10000h,

respectivamente. O comportamento das vigas foi muito similar, não sendo observadas diferenças significativas com relação à rigidez. Desta forma, analogamente às vigas com armadura de aço, foi possível observar que as vigas com armadura de GFRP mantidas em ambiente laboratorial conservaram seu comportamento mecânico após 5000 e 10000 horas de exposição, não sendo observada degradação. O modo de ruína de todas as vigas foi baseado no esmagamento do concreto comprimido com posterior ruptura da armadura longitudinal de GFRP tracionada.

**Figura 99: Curvas médias (CM) de força versus deslocamento vertical para as vigas com armadura de aço e de GFRP de referência, mantidas em ambiente laboratorial e em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas**



De acordo com os resultados apresentados na Figura 99, as vigas V\_LAB\_S\_45d, V\_ACP\_S\_1000h, V\_ACP\_S\_5000h e V\_ACP\_S\_10000h apresentaram comportamento semelhante, sem alterações significativas na rigidez e atingindo forças máximas médias de aproximadamente 26,1 kN, 26,0 kN, 27,4 kN e 27,0 kN, respectivamente. Após 10000 horas de imersão em solução salina, observou-se a ruptura da armadura de aço da viga V2\_ACP\_S\_10000h e a presença de corrosão. Entretanto, conforme já discutido, uma vez que as vigas permaneceram imersas na solução e é necessária a presença de oxigênio para a ocorrência de corrosão, atribui-se a corrosão da armadura de aço da viga V2\_ACP\_S\_10000h ao período após 10000 horas de exposição. Nesse período (302 dias), devido à pandemia de COVID-19, o tanque de degradação permaneceu desligado até que fosse possível a realização dos ensaios de flexão de três pontos. A dificuldade de acesso fez com que a manutenção do nível da solução ficasse comprometida e houvesse variação, permitindo o ingresso de oxigênio e, conseqüentemente, a instalação de processo corrosivo na armadura de aço. Portanto, a aplicação do protocolo de acondicionamento acelerado do ACI 440.9R (2015) adaptado para imersão de vigas em solução salina não provocou a degradação das vigas de concreto armado com barras de aço após 10000 horas de imersão.

Observa-se na Figura 99 que as vigas V\_LAB\_GFRP\_45d, V\_ACP\_GFRP\_1000h, V\_ACP\_GFRP\_5000h e V\_ACP\_GFRP\_10000h apresentaram forças máximas médias resistidas de aproximadamente 35,6 kN, 33,1 kN, 31,3 kN e 35,1 kN, respectivamente. Nota-se uma tendência de redução na força máxima média resistida pelas vigas com o aumento do tempo de imersão na solução salina, até 5000 horas de exposição. As vigas V\_ACP\_GFRP\_5000h apresentaram reduções de 12 % e 13 % na capacidade resistente e na rigidez, respectivamente, em relação à referência (V\_LAB\_GFRP\_45d). Entretanto, as vigas V\_ACP\_GFRP\_10000h apresentaram força máxima média resistida e rigidez similares às vigas V\_LAB\_GFRP\_45d. Conforme anteriormente discutido, as vigas V\_ACP\_GFRP\_10000h foram ensaiadas 302 dias após a finalização do ciclo de 10000 horas de exposição devido à pandemia de COVID-19, havendo dificuldade na manutenção do tanque e do nível de solução neste período. Assim, o tempo de espera para ensaio após as 10000 horas de exposição pode ter impactado no comportamento mecânico das vigas V\_ACP\_GFRP\_10000h, uma vez que, nas vigas anteriores, o ensaio foi realizado apenas 5 horas após as vigas serem retiradas do tanque de degradação.

Os resultados obtidos para as vigas de concreto com armadura de GFRP mantidas em ambiente laboratorial e mantidas em solução salina à 50 °C sugerem que, ainda que o concreto seja um ambiente intrinsecamente agressivo às barras de GFRP devido à alcalinidade da solução contida em seus poros, as barras de GFRP apresentam melhor durabilidade no concreto seco do que no concreto úmido. As vigas de concreto com armadura de GFRP mantidas em ambiente laboratorial não sofreram degradação, enquanto as vigas

mantidas em solução salina apresentaram redução em sua capacidade resistente e rigidez. Tais resultados estão em concordância com os apontamentos de He, Dai e Yang (2017), os quais observaram que barras de GFRP extraídas de vigas de concreto armado mantidas em ambiente laboratorial apresentam resistência à tração 7,9 % e 17,1 % superiores em relação às barras extraídas de vigas mantidas em água a 23 °C ou solução alcalina a 60 °C durante 18 meses, respectivamente. Além disso, os dados obtidos nesse trabalho corroboram observações reportadas na literatura sobre a degradação natural de estruturas de concreto com armadura de GFRP, que indicam a manutenção da durabilidade das barras mesmo após anos de exposição natural em campo. Esse comportamento pode ser explicado pelo papel da umidade no processo de degradação do compósito. No concreto seco, a baixa umidade relativa dificulta a difusão de íons e a penetração de água na matriz polimérica das barras, inibindo reações de hidrólise da resina, extração de componentes solúveis e danos na interface fibra/matriz. Já no concreto úmido, a presença de água facilita o transporte de íons agressivos, ativando mecanismos físico-químicos que comprometem a integridade do compósito. Assim, a ausência de um meio fluido capaz de transportar agentes agressivos no concreto seco contribui para a maior estabilidade das barras de GFRP ao longo do tempo, conforme observado também por estudos de durabilidade em campo.

Em conclusão, a aplicação do protocolo de condicionamento acelerado do ACI 440.9R (2015) adaptado para a imersão de vigas de concreto (escala real) em solução salina mostrou-se parcialmente eficaz na avaliação da durabilidade das vigas armadas com barras de aço e de GFRP. Com relação às vigas com armadura de aço, a aplicação do protocolo de condicionamento acelerado adaptado do ACI 440.9R (2015) não é viável, tendo em vista a necessidade de oxigênio para a ocorrência da corrosão da armadura. Nesse caso, um protocolo baseado em ciclos de molhagem e secagem seria mais eficiente, o qual possibilitaria a entrada tanto do agente agressivo (íons cloretos) quanto da água e do oxigênio. Com relação às vigas com armadura de GFRP, a aplicação do protocolo de condicionamento acelerado adaptado do ACI 440.9R (2015) foi eficaz para provocar a degradação da armadura longitudinal e, conseqüentemente, do elemento estrutural como um todo, uma vez que a umidade é um dos agentes agressivos que mais deteriora as barras de GFRP, reduzindo sua resistência. Assim, tal protocolo é eficiente para acelerar a degradação das vigas com armadura de GFRP, não apenas das barras em si.

#### **4.3.8 COMPARAÇÃO COM MODELOS NORMATIVOS**

Os resultados experimentais obtidos no âmbito deste trabalho foram comparados aos resultados teóricos obtidos por meio da aplicação dos modelos de dimensionamento do ACI 318 (2019) e ABNT NBR 6118 (2023) para as vigas com armadura de aço e do ACI 440.11 (2022) e ABNT NBR 17196 (2025) para as vigas com armadura de GFRP. Os cálculos teóricos

foram realizados com e sem a utilização dos coeficientes redutores da resistência dos materiais ou da capacidade resistente obtida e com a consideração da ação do ambiente sobre as vigas.

A Tabela 44 apresenta os resultados obtidos de forma teórica e experimental, sendo  $F_{m\acute{a}x}$  a força máxima resistida pelas vigas,  $\epsilon_c$  a deformação no concreto,  $\epsilon_s$  a deformação no aço e  $\epsilon_f$  a deformação no GFRP para a força máxima resistida. No caso dos resultados experimentais, os valores de força máxima resistida são valores médios obtidos para o par de vigas correspondente à cada tipo de armadura e ambiente de exposição.

**Tabela 44: Resultados teóricos e experimentais obtidos para as vigas analisadas**

Viga	Teórico							Experimental				
	Norma	Condição	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$\epsilon_c$ (‰)	$\epsilon_s$ (‰)	$\epsilon_f$ (‰)	Modo de ruína	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$\epsilon_c$ (‰)	$\epsilon_s$ (‰)	$\epsilon_f$ (‰)	Modo de ruína
V_LAB_S_5000h	ACI 318 (2019)	Com redução	22,3	3,0	12,8	-	A	28,1	m.d.	m.d.	-	A
		Sem redução	24,8	3,0	12,8	-	A					
	ABNT NBR 6118 (2023)	Com redução	21,2	3,1	10,0	-	A					
		Sem redução	24,8	2,4	10,0	-	A					
V_ACP_S_5000h	ACI 318 (2019)	Com redução	22,1	3,0	14,8	-	A	27,4	m.d.	m.d.	-	A
		Sem redução	24,5	3,0	14,8	-	A					
	ABNT NBR 6118 (2023)	Com redução	21,0	2,6	10,0	-	A					
		Sem redução	24,5	2,0	10,0	-	A					
V_LAB_GFRP_5000h	ABNT NBR 17196 (2025)	Com redução	22,0	3,5	-	10,6	B	37,7	m.d.	-	m.d.	B
		Sem redução	27,0	3,5	-	12,9	B					
	ACI 440.11 (2022)	Com redução	16,7	3,0	-	12,2	B					
		Sem redução	25,7	3,0	-	12,2	B					
V_ACP_GFRP_5000h	ABNT NBR 17196 (2025)	Com redução	23,8	3,5	-	11,5	B	31,3	m.d.	-	m.d.	B
		Sem redução	29,2	3,5	-	13,8	B					
	ACI 440.11 (2022)	Com redução	17,7	3,0	-	12,8	B					
		Sem redução	27,2	3,0	-	12,8	B					
V_LAB_S_10000h	ACI 318 (2019)	Com redução	21,9	3,0	9,9	-	A	26,7	m.d.	m.d.	-	A
		Sem redução	24,3	3,0	9,9	-	A					
	ABNT NBR 6118 (2023)	Com redução	20,6	3,5	8,1	-	A					
		Sem redução	24,3	3,3	10,0	-	A					
V_ACP_S_10000h	ACI 318 (2019)	Com redução	22,2	3,0	15,4	-	A	27,0	m.d.	m.d.	-	A
		Sem redução	24,6	3,0	15,4	-	A					
	ABNT NBR 6118 (2023)	Com redução	21,1	2,4	10,0	-	A					
		Sem redução	24,6	1,9	10,0	-	A					
V_LAB_GFRP_10000h	ABNT NBR 17196 (2025)	Com redução	19,0	3,5	-	9,3	B	36,3	m.d.	-	m.d.	B
		Sem redução	23,4	3,5	-	11,3	B					
	ACI 440.11 (2022)	Com redução	14,8	3,0	-	10,9	B					
		Sem redução	22,7	3,0	-	10,9	B					
V_ACP_GFRP_10000h	ABNT NBR 17196 (2025)	Com redução	24,6	3,5	-	11,8	B	35,1	m.d.	-	m.d.	B
		Sem redução	30,1	3,5	-	14,3	B					
	ACI 440.11 (2022)	Com redução	18,1	3,0	-	13,1	B					
		Sem redução	27,8	3,0	-	13,1	B					

A - Escoamento do aço; B - Esmagamento do concreto; m.d. - Extensômetro mecanicamente danificado

Analisando-se a Tabela 44 nota-se que, mesmo sem a consideração dos coeficientes de redução, a capacidade resistente obtida de forma teórica é inferior à obtida experimentalmente, demonstrando que a aplicação dos modelos de dimensionamento leva a

previsões seguras. Com relação às deformações, não foi possível obter as deformações experimentais dos materiais para o valor de força máxima resistida devido à danificação dos extensômetros responsáveis pela aferição, conforme já discutido. Com relação às deformações teóricas, diferenças na abordagem de cada modelo são observadas. A ABNT NBR 6118 (2023) limita a deformação de tração do aço a 10 ‰ (valor admitido para a deformação do aço de seções trabalhando no Domínio 2) para prevenir a deformação plástica excessiva, sendo a deformação no concreto calculada por compatibilidade de deformações. Caso o Domínio no qual a seção trabalha seja o 3, a ABNT NBR 6118 (2023) considera que existe esmagamento do concreto (deformação no concreto assume seu valor último, 3,5 ‰) e escoamento da armadura de aço, embora o alongamento máximo não seja atingido (10 ‰). Nesse caso, a deformação no aço é calculada por compatibilidade de deformações, utilizando-se a deformação no concreto igual a 3,5 ‰. No ACI 318 (2019) não existe tal limitação de deformação para o aço, sendo utilizada a deformação última do concreto (3 ‰) para determinar a deformação no aço por meio da compatibilidade de deformações. Para a utilização de armadura de GFRP, se o modo de ruína for governado pelo esmagamento do concreto, ambos os modelos utilizam a deformação última no concreto (3 ‰ no caso do ACI 440.11 (2022) e 3,5 ‰ no caso da ABNT NBR 17196 (2025)) para o cálculo da deformação no GFRP por meio da compatibilidade de deformações. Todas as normas previram corretamente o modo de ruína observado ao longo dos ensaios.

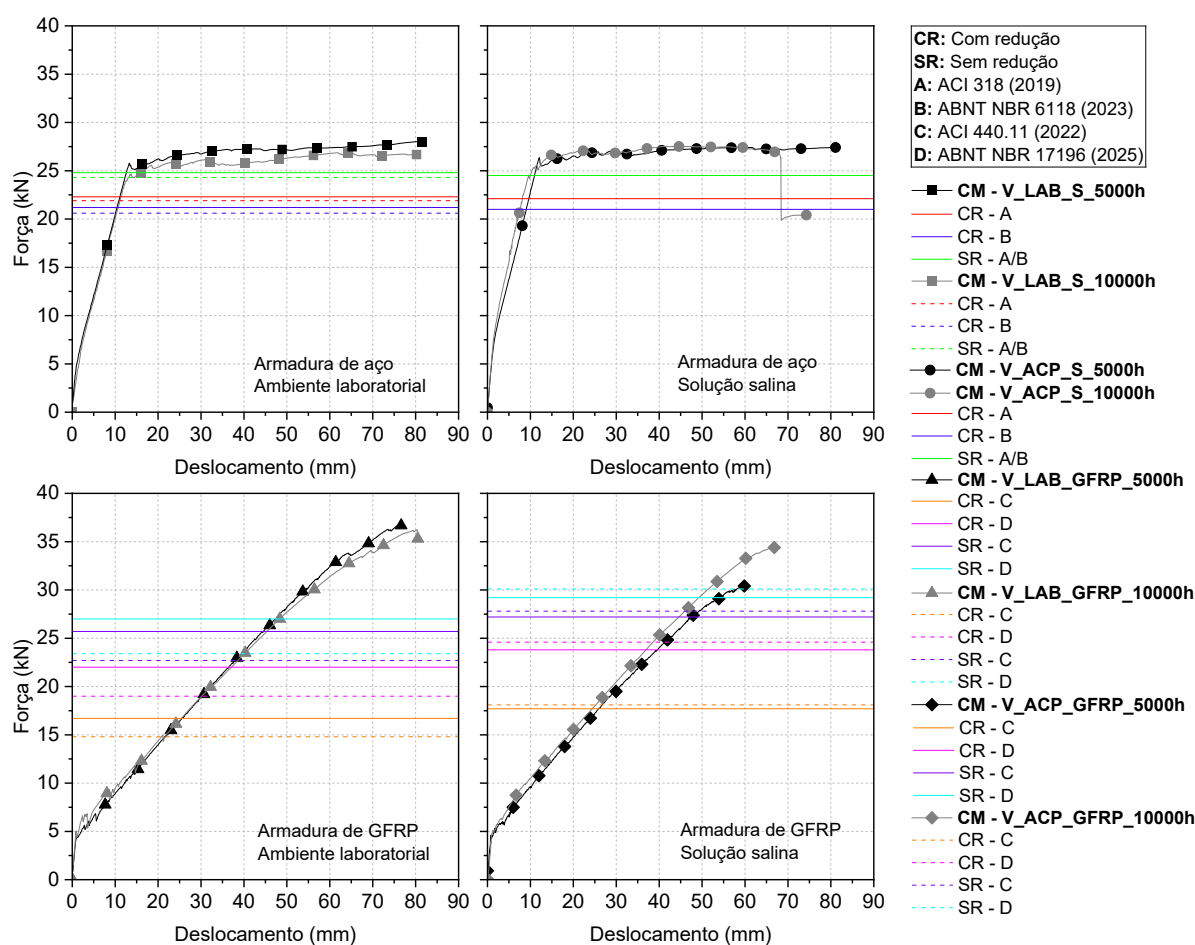
A Figura 100 apresenta graficamente os resultados experimentais e teóricos obtidos para as vigas ensaiadas neste trabalho.

Como o comportamento de vigas com armadura de aço já é bastante conhecido e os modelos de dimensionamento já são consolidados, nota-se que os resultados teóricos, apesar de serem favoráveis à segurança, não são excessivamente conservadores. Nesse sentido, com a aplicação dos coeficientes de redução obtém-se diferenças médias de cerca de 19 % e 23 % entre os resultados experimentais e teóricos obtidos com o uso dos modelos de dimensionamento do ACI 318 (2019) e ABNT NBR 6118 (2023), respectivamente. Desconsiderando-se a aplicação dos coeficientes de redução, estas diferenças médias passam a ser de cerca de 10 %.

Com relação às vigas com armadura de GFRP, tendo em vista que este é um material relativamente novo na indústria da construção civil, sobretudo no cenário brasileiro, o comportamento de vigas com este tipo de armadura ainda segue sendo estudado e os modelos de dimensionamento aprimorados. Assim, observam-se resultados mais conservadores, evidenciados pelas maiores diferenças entre os resultados teóricos e experimentais. Com a aplicação dos coeficientes de redução, as diferenças médias entre resultados experimentais e teóricos obtidos por meio das disposições da ABNT NBR 17196 (2025) e ACI 440.11 (2015) são de aproximadamente 42 % e 56 %, e 48 % e 59 % para as

vigas mantidas em ambiente laboratorial durante 5000 e 10000 horas, respectivamente, e 24 % e 43 %, e 30 % e 48 % para as vigas mantidas em solução salina durante 5000 e 10000 horas, respectivamente. Quando se desconsidera a aplicação dos coeficientes de redução, estas diferenças passam a ser de cerca de 28 % e 32 %, e 36 % e 37 % para as vigas mantidas em ambiente laboratorial durante 5000 e 10000 horas, respectivamente, e 7 % e 13 %, e 14 % e 21 % para as vigas mantidas em solução salina durante 5000 e 10000 horas, respectivamente. Dessa forma, quando se aplicam os coeficientes de redução, simulando-se resultados obtidos em projeto, observa-se que a capacidade resistente teórica cai para menos da metade da capacidade resistente experimental utilizando-se o modelo do ACI 440.11 (2022). Já o modelo de dimensionamento da ABNT NBR 17196 (2025) leva a resultados menos conservadores, com a capacidade resistente teórica calculada com o uso dos coeficientes de redução entre 60 e 70 % da capacidade resistente experimental.

**Figura 100: Curvas médias (CM) de força versus deslocamento das vigas V\_LAB\_S\_5000h, V\_LAB\_S\_10000h, V\_ACP\_S\_5000h, V\_ACP\_S\_10000h, V\_LAB\_GFRP\_5000h, V\_LAB\_GFRP\_10000h, V\_ACP\_GFRP\_5000h e V\_ACP\_GFRP\_10000h em comparação aos resultados teóricos**



#### 4.4 ANÁLISE EXPERIMENTAL DAS BARRAS DE GFRP

Foi realizado um programa experimental para a avaliação da durabilidade e dos mecanismos de degradação das barras de GFRP desprotegidas e protegidas por concreto quando imersas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas. A seguir, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios para caracterização do concreto utilizado na proteção das barras, para a determinação da profundidade de penetração de cloretos, para a caracterização das propriedades mecânicas e para a avaliação da degradação das barras de GFRP.

##### 4.4.1 CONCRETO

Corpos de prova moldados com o mesmo concreto utilizado na proteção de parte das barras de GFRP foram submetidos à ensaios de caracterização e para a determinação da profundidade de penetração de cloretos.

##### 4.4.1.1 Propriedades mecânicas

O concreto utilizado para a proteção das barras de GFRP apresentou resistência à compressão nominal de 30 MPa. Para a caracterização das propriedades mecânicas do concreto foram realizados ensaios de compressão e módulo de elasticidade em corpos de prova cilíndricos. Foi realizado também ensaio de abatimento de tronco de cone no concreto fresco, sendo obtido abatimento de 155 mm. O concreto utilizado na moldagem das vigas apresentou maior abatimento (180 mm), sendo mais fluido devido a um maior teor de água e a presença de aditivo na mistura.

A Tabela 45 apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados 28 dias após a concretagem dos corpos de prova, sendo  $f_{ci}$  e  $E_{ci}$  a resistência à compressão e módulo de elasticidade obtidos para cada corpo de prova, respectivamente,  $f_{cm}$  e  $E_{cm}$  a resistência à compressão e módulo de elasticidade médios, respectivamente, DP o desvio padrão e COV o coeficiente de variação.

**Tabela 45: Propriedades mecânicas do concreto**

Idade	Amostras	Resistência à compressão (MPa)				Módulo de elasticidade (GPa)			
		$f_{ci}$	$f_{cm}$	DP	COV (%)	$E_{ci}$	$E_{cm}$	DP	COV (%)
28 dias	CP1	36,49	36,67	1,08	2,94	-	27,81	0,33	1,17
	CP2	35,50				-			
	CP3	35,82				-			
	CP4	37,62				28,04			
	CP5	37,94				27,58			

Foram obtidos resistência à compressão e módulo de elasticidade médios iguais a 36,67 MPa e 27,81 GPa, respectivamente. A resistência à compressão do concreto utilizado na proteção das barras é semelhante, embora ligeiramente superior, à resistência à compressão do concreto utilizado na moldagem das vigas da primeira etapa experimental, cujo valor médio foi de 32,8 MPa (obtido a partir dos corpos de prova de referência). Essa pequena diferença é compatível com os valores do fator  $a/c$ , sendo 0,61 para o concreto utilizado na moldagem das vigas e 0,58 para o concreto empregado na proteção das barras de GFRP. Concretos com maiores fatores  $a/c$  apresentam maior teor de água na mistura, resultando em menor resistência à compressão (Lei de Abrams).

#### 4.4.1.2 Profundidade de penetração de cloretos

Foi realizada a aspersão de nitrato de prata na superfície fraturada de corpos de prova de concreto mantidos durante 1000, 5000 e 10000 horas em solução salina. Assim, para cada idade, um corpo de prova cilíndrico de concreto foi fraturado à tração por compressão diametral, o nitrato de prata foi aplicado, e a profundidade de penetração de cloretos foi medida. A Tabela 46 apresenta os resultados obtidos e a Figura 101 apresenta os corpos de prova após a aspersão do nitrato de prata.

Nota-se que após 1000 horas de imersão já foi possível observar profundidade de penetração de cloretos medida a partir de cada face igual a 50 mm, totalizando penetração em todo o diâmetro do corpo de prova (100 mm). Tendo em vista que o cobrimento de concreto nas amostras de GFRP protegidas era de 15 mm, conclui-se que a frente de penetração de cloretos já havia atingido a barra de GFRP após 1000 horas.

**Tabela 46: Profundidade de penetração de cloretos nos corpos de prova de concreto**

Idade de ensaio	Profundidade de penetração de cloretos (mm)	Desvio padrão (mm)	Coefficiente de variação (%)
1000 horas	50,00	0,00	0,00
5000 horas	50,00	0,00	0,00
10000 horas	50,00	0,00	0,00

**Figura 101: Profundidade de penetração de cloretos: (a) corpos de prova antes da aspersão de nitrato de prata e após (b) 1000 horas, (c) 5000 horas e (d) 10000 horas de imersão**

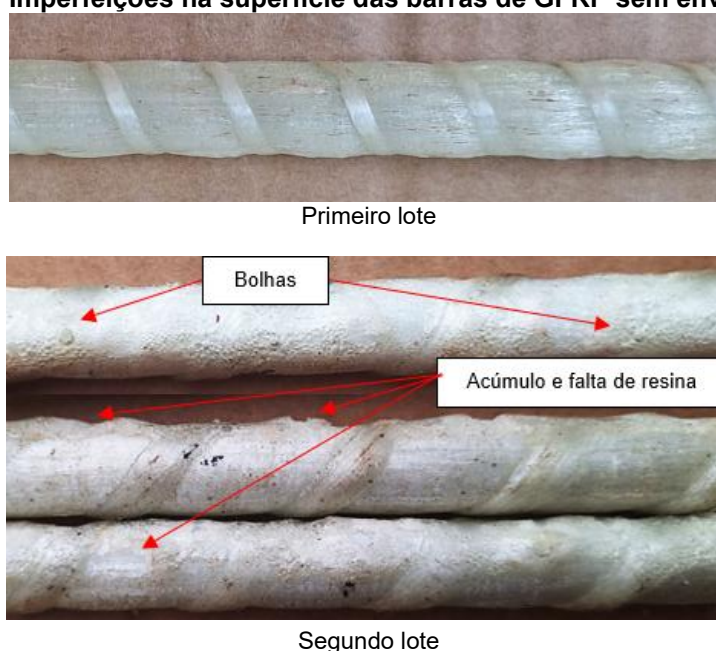


#### 4.4.2 GFRP

Para avaliação da durabilidade das barras de GFRP, amostras protegidas e desprotegidas foram mantidas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas e foram submetidas a ensaios de absorção, teor de fibras, tração uniaxial e microestruturais. Assim, nas idades de ensaio, as barras foram retiradas da caixa de degradação, o concreto das amostras protegidas foi removido e as amostras foram preparadas. Foi realizado, ainda, ensaio para a determinação do diâmetro efetivo das barras de GFRP.

As barras de GFRP utilizadas nessa etapa experimental do trabalho foram adquiridas do mesmo fabricante das barras empregadas como armadura nas vigas de concreto, porém provenientes de lotes distintos. Observou-se que as barras de GFRP do segundo lote, utilizadas nessa etapa experimental, apresentaram diversas imperfeições e irregularidades em sua superfície, como acúmulo e falta de resina (matriz polimérica) em determinados pontos, e a presença de bolhas. A Figura 102 ilustra a superfície de uma barra de GFRP do primeiro lote e a superfície de barras do segundo lote, ambas sem qualquer tipo de envelhecimento ou condicionamento prévio. Além das imperfeições visíveis na superfície das barras de GFRP do segundo lote, nota-se também que as barras do primeiro lote exibem um padrão de enrolamento helicoidal mais uniforme, com um passo menor em comparação ao segundo lote. Essas alterações superficiais, tanto na conformação quanto no acabamento, sugerem uma possível modificação no padrão de fabricação, seja com relação aos materiais utilizados (fibras e resina) ou com relação aos processos envolvidos na produção.

**Figura 102: Imperfeições na superfície das barras de GFRP sem envelhecimento**



A ABNT NBR 17201-1 (2025) recomenda que, além dos ensaios para a caracterização da barra de FRP, a cada vez que existirem mudanças nos materiais utilizados ou no processo de produção deve ser realizada inspeção visual para verificar a presença de defeitos superficiais que possam comprometer o desempenho do material. A homogeneidade da superfície da matriz polimérica é de extrema importância para a proteção das fibras e da interface, estando diretamente ligada à durabilidade do material. Além disso, as propriedades mecânicas do FRP podem sofrer alteração em função de qualquer modificação na fase de produção do material.

#### 4.4.2.1 Diâmetro efetivo

Foi realizado ensaio para a determinação do diâmetro efetivo em cinco amostras de barra de GFRP com comprimento de 100 mm, parâmetro utilizado para a determinação da resistência à tração das barras. A Tabela 47 apresenta os resultados obtidos, sendo, para cada amostra,  $l$  o comprimento médio,  $m_1$  a massa seca,  $m_2$  a massa imersa,  $\phi_{ef}$  o diâmetro efetivo,  $A_{ef}$  a área efetiva,  $\rho$  a densidade (calculada como a razão entre massa e volume -  $m_1/(A_{ef} \cdot l)$ ) e  $\phi_n$  o diâmetro nominal.

**Tabela 47: Diâmetro efetivo, área efetiva e diâmetro nominal da barra de GFRP**

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
$l_1$ (mm)	97,84	100,55	99,76	99,44	100,14
$l_2$ (mm)	97,67	100,71	99,91	99,72	99,96
$l_3$ (mm)	97,64	100,63	100,00	99,72	100,18
$l$ (mm)	97,72	100,63	99,89	99,63	100,09
$m_1$ (g)	15,73	16,22	16,09	16,08	16,11
$m_2$ (g)	6,74	7,00	7,01	6,91	6,98
$\phi_{ef}$ (mm)	10,82	10,80	10,76	10,83	10,78
$A_{ef}$ (mm <sup>2</sup> )	92,00	91,62	90,90	92,04	91,21
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,75	1,76	1,77	1,75	1,76
$\phi_{ef,m\u00e9dio}$ (mm) = 10,80					
$A_{ef,m\u00e9dia}$ (mm <sup>2</sup> ) = 91,56					
$\phi_n$ (mm) = 10,00					

Nota-se na Tabela 47 que foi obtido diâmetro efetivo médio igual a 10,80 mm e área efetiva média igual a 91,56 mm<sup>2</sup>. Comparando-se a área efetiva calculada com os limites apresentados na Tabela 10 pode-se confirmar a classificação das barras com diâmetro nominal de 10 mm, para o qual a área efetiva pertence ao intervalo entre 73,8 e 101,8 mm<sup>2</sup>.

As barras de GFRP utilizadas como armadura nas vigas de concreto armado (primeiro lote) apresentaram diâmetro nominal corrigido de 8 mm e diâmetro efetivo médio de 9,44 mm, enquanto as barras de GFRP do segundo lote apresentaram diâmetro nominal de 10 mm e

diâmetro efetivo médio de 10,80 mm. Dessa forma, verificou-se um aumento de 14,4 % no diâmetro efetivo das barras de GFRP do segundo lote em relação ao primeiro. Essa variação está associada a um maior teor de fibras das barras do segundo lote e às imperfeições superficiais observadas, especialmente ao acúmulo e à falta de resina em determinados pontos, os quais alteram a uniformidade da superfície. O aumento do diâmetro também influencia as propriedades mecânicas do material, uma vez que estas são determinadas com base na área efetiva da seção transversal. Como pode ser visto na Tabela 6, os valores de resistência à tração diminuem com o aumento do diâmetro (ACI 440.6M, 2017).

As barras de GFRP do primeiro lote apresentaram densidade média de 2,01 g/cm<sup>3</sup>, enquanto as barras de GFRP do segundo lote apresentaram densidade média de 1,76 g/cm<sup>3</sup>, resultando em uma redução de 12,4 %. Essa diferença indica que, para um mesmo volume, as barras do primeiro lote possuem maior massa em comparação às do segundo lote. De acordo com a regra das misturas, a densidade das barras de GFRP é determinada pela combinação das densidades das fibras e da matriz polimérica, ponderadas pelas respectivas frações volumétricas (Equação 3). Em geral, espera-se que um maior diâmetro esteja associado a um maior teor de fibras de vidro e, conseqüentemente, a uma densidade global maior, considerando-se que a densidade das fibras de vidro é superior à da matriz polimérica. Benmokrane *et al.* (2018) obtiveram densidade de 2,05 g/mL para barras de GFRP retas e 1,86 g/mL para barras de GFRP dobradas, justificando que tal diferença é devida ao maior teor de fibras das barras retas. Assim, a redução da densidade nas barras do segundo lote, apesar de seu maior teor de fibras (como será apresentado posteriormente), sugere a influência de outros fatores relacionados ao processo de fabricação ou à qualidade dos materiais empregados. A menor densidade média das barras do segundo lote pode estar associada a mudanças nos materiais utilizados na produção (fibras e resina), impactando as densidades individuais de cada componente, ou a alterações nas frações volumétricas de fibra e matriz. O acúmulo de resina em alguns pontos da superfície das barras, indicam uma distribuição não uniforme de resina ao longo do comprimento da barra. Essas concentrações de resina criam regiões com menor fração volumétrica de fibras, o que reduz a densidade média da barra. A presença de bolhas ou vazios formados durante o processo de cura do material também pode ter introduzido descontinuidades internas, contribuindo adicionalmente para a redução da densidade média observada. Segundo Zhang *et al.* (2009), compósitos curados de forma incompleta podem apresentar bolhas ou vazios devido à alta viscosidade da resina durante a fabricação.

Conforme pode ser visto na Tabela 8, o ACI 440.1R (2015) estabelece um intervalo de referência para a densidade de barras de GFRP entre 1,25 e 2,10 g/cm<sup>3</sup>. Os valores obtidos para as densidades médias das barras de GFRP dos dois lotes estão dentro desse intervalo, indicando resultados consistentes.

#### 4.4.2.2 Tração uniaxial

Foram realizados ensaios de tração uniaxial em cinco amostras de GFRP desprotegidas e cinco amostras protegidas para cada período de exposição, sendo utilizada uma taxa de carregamento igual a 5 mm/min. A Tabela 48 a Tabela 51 apresentam as propriedades mecânicas e os modos de ruptura dos corpos de prova de referência e dos corpos de prova protegidos e desprotegidos após a imersão em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas, respectivamente, sendo  $f_f$  a resistência à tração da barra de GFRP (razão entre a máxima força registrada e a área efetiva média),  $E_f$  o módulo de elasticidade e  $\varepsilon_f$  a deformação última à tração.

**Tabela 48: Resultados obtidos nos ensaios de tração uniaxial das barras de GFRP de referência**

CP	Condição	Duração do ensaio (min)	$f_f^*$ (MPa)	$E_f$ (GPa)	$\varepsilon_f^{**}$ (‰)	Modo de ruptura
1	Referência	5,54	913,16	42,89	21,29	Ruptura da barra na região superior
2		5,78	842,33	42,37	19,88	Ruptura da barra na região inferior
3		6,22	947,71	43,20	21,94	Ruptura da barra na região inferior
4		5,58	865,30	42,79	20,22	Ruptura da barra na região inferior
5		6,55	928,18	44,62	20,80	Ruptura da barra na região superior
Média			899,34	43,18	20,83	-
Desvio-padrão			39,42	0,77	0,74	-
COV (%)			4,38	1,78	3,54	-

\* valor máximo obtido no ensaio; \*\* estimativa calculada com o uso da Lei de Hooke

**Tabela 49: Resultados obtidos nos ensaios de tração uniaxial das barras de GFRP desprotegidas e protegidas mantidas em solução salina durante 1000 horas**

CP	Condição	Duração do ensaio (min)	$f_f^*$ (MPa)	$E_f$ (GPa)	$\varepsilon_f^{**}$ (‰)	Modo de ruptura
1	1000 horas - Desprotegido	4,11	808,43	44,55	18,15	Ruptura da barra na região central
2		3,88	739,32	43,24	17,10	Ruptura da barra na região central
3		4,58	804,35	43,60	18,45	Ruptura da barra na região central
4		3,85	743,62	42,44	17,52	Ruptura da barra na região inferior
5		4,05	813,15	44,61	18,23	Ruptura da barra na região inferior
Média			781,77	43,69	17,89	-
Desvio-padrão			33,05	0,82	0,50	-
COV (%)			4,23	1,88	2,80	-
1	1000 horas - Protegido	2,43	533,95	42,51	12,56	Ruptura da barra na região superior
2		2,92	632,67	43,27	14,62	Ruptura da barra na região superior
3		2,21	526,43	44,52	11,82	Ruptura da barra na região inferior
4		2,33	544,24	44,48	12,24	Ruptura da barra na região inferior
5		2,36	516,56	41,15	12,55	Ruptura da barra na região superior
Média			550,77	43,18	12,76	-
Desvio-padrão			41,94	1,27	0,97	-
COV (%)			7,61	2,94	7,60	-

\* valor máximo obtido no ensaio; \*\* estimativa calculada com o uso da Lei de Hooke

**Tabela 50: Resultados obtidos nos ensaios de tração uniaxial das barras de GFRP desprotegidas e protegidas mantidas em solução salina durante 5000 horas**

CP	Condição	Duração do ensaio (min)	$f_f^*$ (MPa)	$E_f$ (GPa)	$\varepsilon_f^{**}$ (‰)	Modo de ruptura
1	5000 horas - Desprotegido	2,80	542,10	43,17	12,56	Ruptura da barra na região central
2		2,36	550,04	45,00	12,22	Ruptura da barra na região central
3		3,13	563,56	44,76	12,59	Ruptura da barra na região central
4		3,27	532,65	43,63	12,21	Ruptura da barra na região central
5		2,77	596,39	45,71	13,05	Ruptura da barra na região central
Média			556,95	44,46	12,53	-
Desvio-padrão			22,17	0,93	0,31	-
COV (%)			3,98	2,08	2,45	-
1	5000 horas - Protegido	1,82	308,18	43,16	7,14	Ruptura da barra na região central
2		1,82	325,56	45,68	7,13	Ruptura da barra na região inferior
3		1,86	389,73	45,05	8,65	Ruptura da barra na região superior
4		1,50	318,47	44,32	7,19	Ruptura da barra na região central
5		1,82	308,18	43,16	7,14	Ruptura da barra na região superior
Média			330,02	44,27	7,45	-
Desvio-padrão			30,57	1,01	0,60	-
COV (%)			9,26	2,27	8,07	-

\* valor máximo obtido no ensaio; \*\* estimativa calculada com o uso da Lei de Hooke

**Tabela 51: Resultados obtidos nos ensaios de tração uniaxial das barras de GFRP desprotegidas e protegidas mantidas em solução salina durante 10000 horas**

CP	Condição	Duração do ensaio (min)	$f_f^*$ (MPa)	$E_f$ (GPa)	$\varepsilon_f^{**}$ (‰)	Modo de ruptura
1	10000 horas - Desprotegido	2,73	481,79	44,76	10,76	Ruptura da barra na região central
2		2,35	451,32	45,04	10,02	Ruptura da barra na região central
3		2,53	476,00	45,09	10,56	Ruptura da barra na região central
4		2,95	487,80	45,04	10,83	Ruptura da barra na região central
5		2,43	448,10	43,62	10,27	Ruptura da barra na região central
Média			469,00	44,71	10,49	-
Desvio-padrão			16,22	0,56	0,30	-
COV (%)			3,46	1,25	2,90	-
1	10000 horas - Protegido	1,80	324,49	45,63	7,11	Ruptura da barra na região inferior
2		2,30	433,72	44,78	9,69	Ruptura da barra na região inferior
3		1,38	281,79	45,17	6,24	Ruptura da barra na região superior
4		1,70	359,47	45,24	7,95	Ruptura da barra na região superior
5		1,24	264,61	43,22	6,12	Ruptura da barra na região central
Média			332,82	44,81	7,42	-
Desvio-padrão			60,36	0,84	1,31	-
COV (%)			18,14	1,87	17,66	-

\* valor máximo obtido no ensaio; \*\* estimativa calculada com o uso da Lei de Hooke

Conforme as recomendações da ABNT NBR 17201-3 (2025), o módulo de elasticidade foi calculado como a inclinação da curva tensão *versus* deformação de cada amostra no trecho entre deformações iguais a 1 e 3 ‰. Para evitar a danificação do equipamento, o

extensômetro eletrônico utilizado para aferir as deformações ao longo do ensaio foi removido assim que a deformação necessária para a determinação do módulo de elasticidade foi ultrapassada. Dessa maneira, o valor apresentado de  $\varepsilon_f$  é uma estimativa calculada aplicando-se a Lei de Hooke com o uso do valor experimental de  $f_f$  e  $E_f$ .

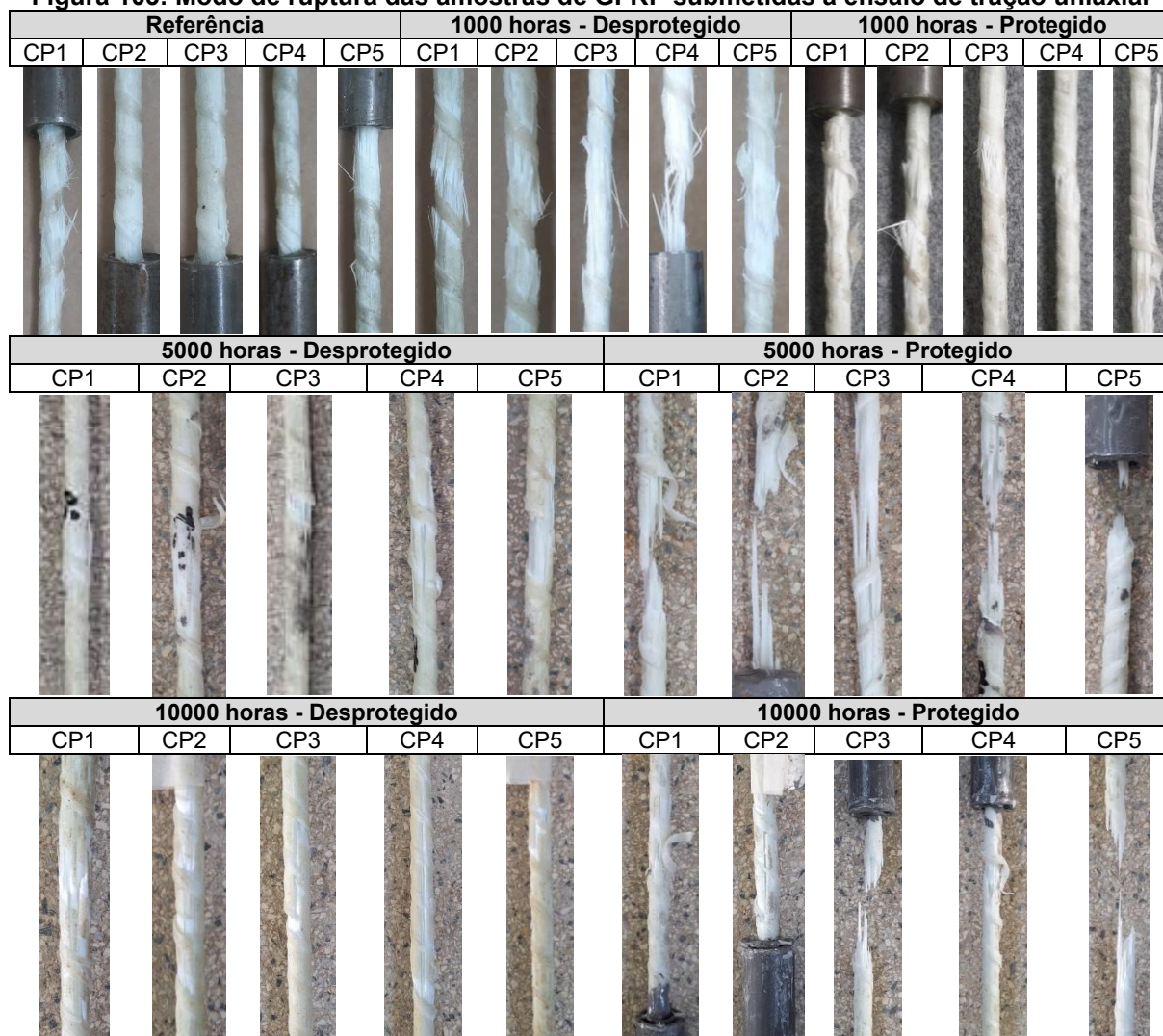
Segundo as disposições da ABNT NBR 17201-1 (2025), apresentadas na Tabela 11 e Tabela 12, barras de GFRP devem apresentar resistência à tração superior à 800 MPa, módulo de elasticidade superior à 45 GPa e deformação à tração superior à 11 ‰. As barras de GFRP de referência (Tabela 48) obedeceram aos limites com relação à resistência à tração e deformação de tração. Após 1000 horas de imersão em solução salina (Tabela 49), as barras de GFRP, tanto desprotegidas quanto protegidas, apresentaram resistência à tração inferior à 800 MPa, contudo, a deformação de tração continuou a obedecer ao limite de 11 ‰. Com relação às barras de GFRP imersas em solução salina durante 5000 horas (Tabela 50), para ambas as condições desprotegida ou protegida a resistência à tração obtida foi inferior ao limite da norma. Nessa idade, as barras de GFRP desprotegidas continuaram a apresentar deformação de tração superior ao limite, mas as barras protegidas apresentaram deformação de tração inferior à 11 ‰. Já as barras de GFRP desprotegidas e protegidas imersas em solução salina durante 10000 horas (Tabela 51) não atingiram os limites de resistência à tração e deformação de tração preconizados pela norma. Em relação ao módulo de elasticidade, o limite de 45 GPa não foi atendido em nenhuma das idades e condições de exposição. Embora alguns corpos de prova individualmente apresentem módulo de elasticidade superior ao limite, os valores médios obtidos foram muito próximos à 45 GPa, mas inferiores.

O fabricante das barras de GFRP fornece como referência valores de resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento da amostra iguais a 1047 MPa, 48 GPa e 21,1 ‰, respectivamente. Conforme apresentado na Tabela 48 a Tabela 51, nenhuma das amostras ensaiadas atingiu os valores fornecidos pelo fabricante, inclusive as amostras de referência, as quais não apresentaram nenhum tipo de envelhecimento.

A ABNT NBR 17201-3 (2025) preconiza que durante os ensaios de tração a ruptura das barras de GFRP deve ser atingida em um intervalo entre 1 e 10 minutos desde o início da aplicação da força e a ruptura deve ocorrer no comprimento livre da barra, fora das ancoragens. Conforme as Tabela 48 a Tabela 51, todos os ensaios apresentaram duração dentro dos limites e a ruptura de todas as amostras ocorreu de forma frágil, com a ruptura das fibras ao longo do comprimento livre, na região central ou mais próximas às ancoragens (Figura 103). Previamente à ruptura, estalos foram ouvidos devido à ruptura das fibras, tal como registrado por Benmokrane *et al.* (2017c) e Sun *et al.* (2023). Outros pesquisadores

obtiveram modo de ruptura semelhante (Mukherjee, Arwikar, 2005; He, Dai, Yang, 2017; Benmokrane *et al.*, 2017c; Lu, Yang, He, 2021; Sun *et al.*, 2023).

**Figura 103: Modo de ruptura das amostras de GFRP submetidas à ensaio de tração uniaxial**



As barras de GFRP do primeiro lote apresentaram resistência à tração de 1744,83 MPa, módulo de elasticidade de 72,32 GPa e deformação última de 24,13 %. Já as barras do segundo lote, na condição de referência, exibiram resistência à tração de 899,34 MPa, módulo de elasticidade de 43,18 GPa e deformação última de 20,83 %, representando reduções de 48,44 %, 40,30 % e 13,67 %, respectivamente, em relação ao primeiro lote. As diferenças observadas nas propriedades mecânicas entre os dois lotes de barras de GFRP indicam uma variação significativa no desempenho estrutural do material, que não pode ser atribuída apenas à diferença nos diâmetros das barras. Embora o segundo lote tenha um diâmetro efetivo maior (10,80 mm) em comparação ao primeiro (9,44 mm), resultando em uma área de seção transversal cerca de 30 % superior, essa diferença geométrica não é suficiente para justificar as reduções expressivas nas propriedades

mecânicas. Esse comportamento sugere a influência de outros fatores que podem estar relacionados tanto à qualidade do processo de fabricação quanto à variação nas matérias-primas utilizadas em cada lote.

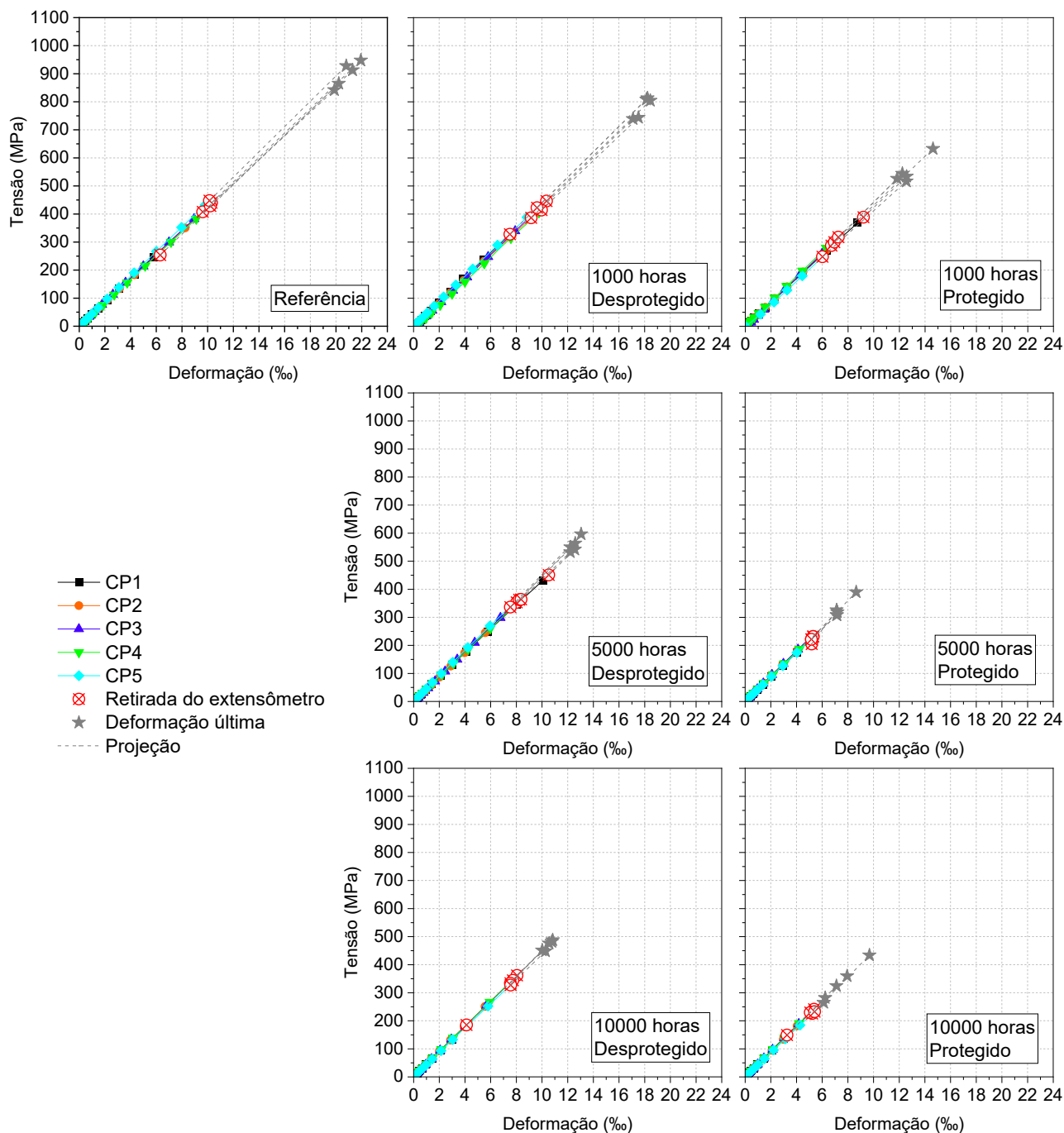
As propriedades mecânicas em materiais compósitos como o GFRP dependem fortemente da adequada impregnação das fibras pela matriz, garantindo a eficiente transferência de tensões. Defeitos como bolhas, regiões com acúmulo ou falta de resina e descontinuidades internas comprometem essa interação, resultando em uma redução da resistência e rigidez do material. Segundo Moura (2021), a formação de vazios e uma menor ligação entre fibras e matriz resulta em propriedades mecânicas reduzidas. A formação de vazios depende, entre outros fatores, do molhamento inadequado das fibras pela matriz, da contração da matriz durante a cura, e, principalmente, do aprisionamento mecânico de ar durante a impregnação (Moura, 2021). No segundo lote, a inspeção visual revelou precisamente essas imperfeições, indicando que a matriz não envolveu adequadamente as fibras, gerando zonas de descontinuidade estrutural. Além disso, a diferença nas deformações à tração também aponta para uma possível modificação nas características do material, possivelmente associada à qualidade da cura da matriz polimérica – evidenciada pela presença de bolhas. A hipótese de variação nas matérias-primas, como diferenças nas propriedades das fibras de vidro ou na formulação da resina, também não pode ser descartada, uma vez que essas mudanças impactam diretamente a rigidez, resistência e capacidade de deformação do compósito. Esse conjunto de fatores evidencia a importância do controle rigoroso de qualidade na produção das barras de GFRP, abrangendo não apenas a precisão dimensional, a homogeneidade da matriz e a correta impregnação das fibras, mas também consistência na seleção e no fornecimento das matérias primas, assegurando que as propriedades mecânicas obtidas estejam alinhadas com as expectativas de desempenho estrutural do material.

A Figura 104 apresenta os diagramas de tensão *versus* deformação das amostras ensaiadas, incluindo a estimativa de deformação última de tração ( $\epsilon_f$ ), e a Figura 105 apresenta as curvas médias de tensão *versus* deformação para cada condição estudada. As tensões nas barras de GFRP foram obtidas dividindo-se a força registrada pela área efetiva, a qual foi calculada com base no diâmetro efetivo médio determinado (10,80 mm). É possível notar que todos os corpos de prova apresentaram comportamento elástico-linear até a ruptura e que a inclinação de todas as curvas é semelhante, uma vez que todas as amostras apresentaram módulos de elasticidade semelhantes. Observa-se também que houve redução na resistência à tração e deformação última à tração das barras de GFRP com o aumento do tempo de imersão em solução salina.

Na Tabela 52 são apresentados os valores médios das propriedades mecânicas das barras de GFRP para cada idade e condição de exposição, bem como a redução percentual

da resistência à tração e da deformação última de tração ao longo do tempo de imersão em solução salina.

**Figura 104: Diagramas tensão versus deformação obtidos por meio dos ensaios de tração uniaxial nas barras de GFRP**

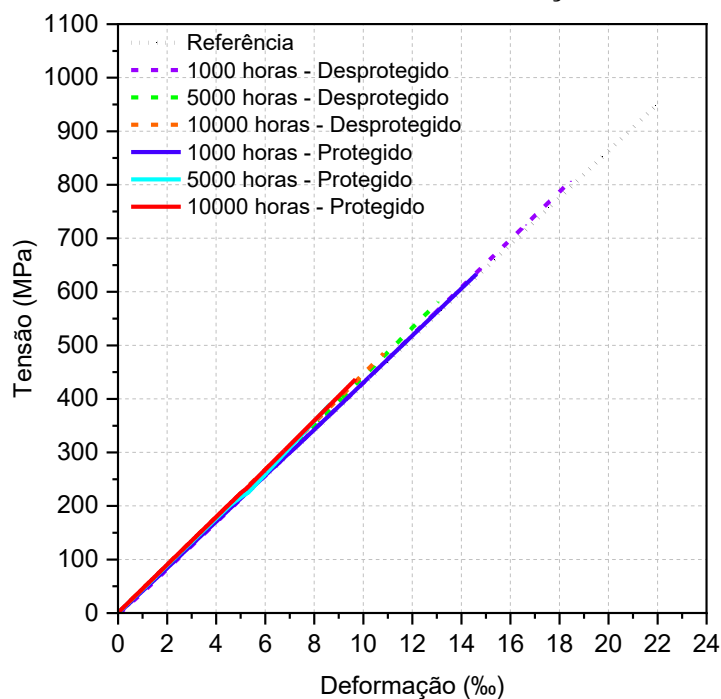


Como evidenciado na Tabela 52, as barras de GFRP desprotegidas sofreram reduções de 13,07 %, 38,07 % e 47,85 % na resistência à tração e de 14,10 %, 39,86 % e 49,63 % na deformação última após 1000, 5000 e 10000 horas de imersão em solução salina, respectivamente, em relação à referência. Já as barras de GFRP protegidas sofreram

reduções de 38,76 %, 63,30 % e 62,99 % na resistência à tração e 38,73 %, 64,23 % e 64,37 % na deformação última após 1000, 5000 e 10000 horas de imersão em solução salina, respectivamente, em relação às barras de GFRP de referência. Após 10000 horas de imersão em solução salina, as barras de GFRP desprotegidas apresentaram redução da resistência à tração (47,85 %) similar à obtida por Empananza *et al.* (2022) para barras de GFRP do tipo A, fabricadas com matriz do tipo vinil éster e fibras de vidro do tipo E-CR, com seção transversal de 81 mm<sup>2</sup>, após 365 dias (8760 horas) de exposição à água do mar a 60 °C (45 %). Mukherjee e Arwihar (2005) avaliaram a durabilidade de barras de GFRP fabricadas com matriz vinil éster imersas em água a 60 °C, sendo as barras diretamente imersas e ou imersas quando no interior de vigas de concreto. Após 3, 6 e 12 meses de imersão as barras foram removidas do interior das vigas e submetidas à ensaio de tração. Os autores obtiveram reduções da resistência à tração iguais a 42,2 %, 55,7 % e 65,0 % após 3, 6 e 12 meses de imersão, respectivamente, para a condição protegida, e reduções de 43,6 %, 53,7 % e 57,7 % após 3, 6 e 12 meses de imersão, respectivamente, para a condição desprotegida, resultados similares aos obtidos nesse trabalho.

A Figura 106 apresenta um gráfico de barras que evidencia a redução da resistência à tração e da deformação última à tração das barras de GFRP desprotegidas e protegidas ao longo do tempo.

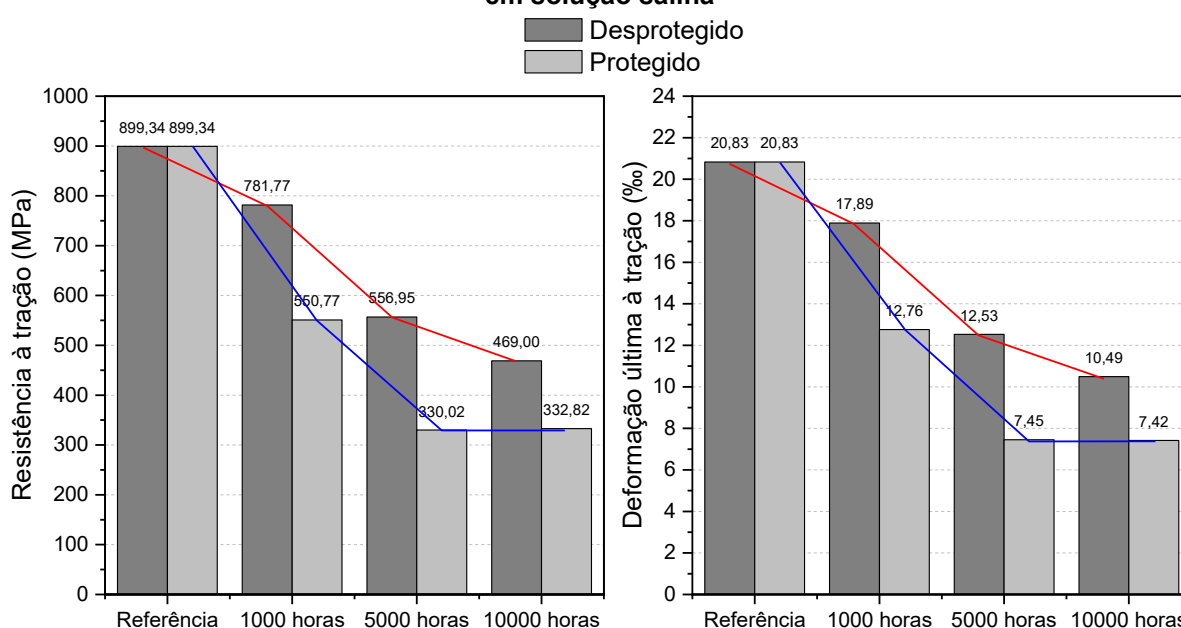
**Figura 105: Curvas médias de tensão versus deformação das barras de GFRP**



**Tabela 52: Valores médios das propriedades mecânicas das barras de GFRP para cada idade e condição de exposição**

Idade	Tipo	$f_f$ (MPa)	$E_f$ (GPa)	$\varepsilon_f$ (‰)	Redução $f_f$ (%)	Redução $\varepsilon_f$ (%)
Referência	Desprotegido	899,34	43,18	20,83	-	-
1000 horas	Desprotegido	781,77	43,69	17,89	13,07	14,10
	Protegido	550,77	43,18	12,76	38,76	38,73
5000 horas	Desprotegido	556,95	44,46	12,53	38,07	39,86
	Protegido	330,02	44,27	7,45	63,30	64,23
10000 horas	Desprotegido	469,00	44,71	10,49	47,85	49,63
	Protegido	332,82	44,81	7,42	62,99	64,37

**Figura 106: Redução das propriedades mecânicas das barras de GFRP ao longo da imersão em solução salina**



É possível observar na Figura 106 que as barras protegidas apresentaram redução em suas propriedades mecânicas até 5000 horas, as quais mantiveram-se posteriormente constantes até 10000 horas de exposição. Já as barras desprotegidas apresentaram redução das propriedades mecânicas até 10000 horas. Davalos, Chen e Ray (2011), Wang *et al.* (2023) e Sun *et al.* (2024) observaram um comportamento semelhante. Wang *et al.* (2023) submeteram barras de GFRP revestidas com uma camada de 30 mm de concreto do tipo SWSSC a ciclos de molhagem e secagem em solução de NaCl com concentração de 3,5 % e temperatura de 40 °C, durante 90, 180 e 270 dias (2160, 4320 e 6480 horas), obtendo reduções da resistência à tração iguais a 19 %, 24 % e 24 %, respectivamente. Os autores explicam que, apesar da solução salina impactar negativamente a interface matriz-fibras das barras de GFRP por meio da hidrólise da resina, ao longo do tempo, a penetração da solução salina nas barras de GFRP passa a ser impedida pelo acúmulo de sal de Friedel gerado por reações entre íons cloreto e o aluminato tricálcico no cimento, tamponando os poros do

concreto e retardando a degradação das propriedades mecânicas das barras de GFRP. Davalos, Chen e Ray (2011) justificam que esse fenômeno pode também estar relacionado à reposição limitada de íons alcalinos no interior do concreto, levando à redução da alcalinidade da solução dos poros ao longo da imersão e desacelerando a taxa de degradação.

Observou-se que as barras de GFRP protegidas apresentaram maiores reduções da resistência à tração em relação às barras de GFRP desprotegidas, com diferenças de 29,5 %, 40,7 % e 29,0 % na resistência à tração e de 28,7 %, 40,5 % e 29,3 % na deformação última à tração para 1000, 5000 e 10000 horas de imersão em solução salina, respectivamente. Essa discrepância pode ser explicada pela influência da alcalinidade do concreto sobre as barras de GFRP. Davalos, Chen e Ray (2011), imergiram vigas de concreto com armadura de GFRP e barras de GFRP em tanque contendo água à temperatura ambiente, durante 150 dias. Após a exposição, barras de GFRP foram removidas do interior de concreto e ensaiadas para obtenção da resistência à tração. Os autores observaram que as barras mantidas no interior do concreto apresentaram maior redução da resistência à tração em comparação às barras diretamente imersas, atribuindo essa diferença à influência da alcalinidade do concreto. Segundo Feng *et al.* (2022), a principal causa da ruptura de barras de GFRP é a alcalinidade no interior do concreto. Davalos, Chen e Ray (2011) também imergiram vigas de concreto armadas com barras de GFRP em tanque contendo água à 50 °C durante até 270 dias. Após a exposição, as barras de GFRP, as quais apresentaram diâmetro de 9,53 mm e foram fabricadas com fibras de vidro do tipo E e resina éster vinílica, foram removidas do concreto e submetidas à ensaio para determinação da resistência à tração. Após 210 dias (5040 horas) os autores obtiveram redução da resistência à tração de cerca de 50 %, valor comparável ao obtido nesse trabalho para as barras de GFRP protegidas após 5000 horas de imersão em solução salina (redução de aproximadamente 63 %). De acordo com Phifer (2003), compósitos fabricados com fibras de vidro do tipo E e matriz polimérica do tipo éster vinílica imersos em água por aproximadamente 2 anos sofrem reduções de 60 % e 10 % em sua resistência à tração e rigidez, respectivamente.

Observa-se na Figura 106 que a redução da deformação última à tração das barras de GFRP ao longo da imersão apresentou padrão similar à redução da resistência à tração, tal como observado por Almusallam *et al.* (2012), Al-Salloum *et al.* (2013) e Lu *et al.* (2023). Segundo Lu *et al.* (2023), esse fenômeno pode ser atribuído ao fato de o módulo de elasticidade não apresentar alterações significativas com a exposição acelerada.

Embora tenham sido observadas reduções na resistência à tração e deformação última à tração das barras de GFRP com a imersão em solução salina, o módulo de elasticidade das barras não foi impactado. De acordo com Wang *et al.* (2023) e Sun *et al.* (2024), o módulo de elasticidade do compósito é dominado pelo módulo das fibras e a degradação geralmente ocorre na matriz polimérica por meio da reação de hidrólise. Outros

pesquisadores também não observaram alterações significativas no módulo de elasticidade de barras de GFRP submetidas à envelhecimento acelerado (Mukherjee, Arwikar, 2005; Robert, Cousin e Benmokrane, 2009; Almusallam *et al.*, 2012; Al-Salloum *et al.*, 2013; Robert e Benmokrane, 2013; He, Dai, Yang, 2017; Wang *et al.*, 2017b; Benmokrane *et al.*, 2017c; Emparanza *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2022b; Lu *et al.*, 2023; Sun *et al.*, 2024).

Apesar de não terem sido identificadas alterações no modo de ruptura das amostras devido ao acondicionamento, foi observada a alteração da coloração das barras condicionadas na parte mais externa, indicando a degradação na região da superfície, com a área mais interna apresentando a coloração original (Figura 107). Wang *et al.* (2023) observou comportamento similar, no qual a superfície das barras de GFRP apresentou degradação e o interior manteve aparente integridade.

Na Figura 108 é apresentada uma comparação visual das superfícies das amostras de GFRP de referência e das imersas durante 1000, 5000 e 10000 horas em solução salina, na condição desprotegida.

**Figura 107: Detalhe da ruptura de uma barra de GFRP (a) desprotegida e (b) protegida após 10000 horas de imersão em solução salina**



**Figura 108: Superfície das amostras desprotegidas antes e após 1000, 5000 e 10000 horas de imersão em solução salina**



Com o aumento do tempo de imersão, as alterações superficiais tornaram-se progressivamente mais evidentes. A barra de GFRP de referência apresentou uma superfície lisa e brilhante, característica da integridade da matriz polimérica. Após 1000 horas de imersão, observou-se uma leve perda de brilho e o início da opacidade da resina. Com 5000 horas de imersão, a superfície tornou-se visivelmente mais rugosa. Após 10000 horas, a

degradação tornou-se mais acentuada, resultando em uma superfície irregular e opaca. Nota-se também uma variação na tonalidade das barras, sendo a referência mais esbranquiçada e a amostra imersa durante 10000 horas mais amarelada, com aspecto envelhecido. Visco, Brancato e Campo (2011), Krauklis e Echtermeyer (2018) e Sun *et al.* (2023) observaram alterações similares. Essas alterações refletem a degradação progressiva da matriz polimérica, comprometendo a integridade estrutural das barras. Segundo Visco, Brancato e Campo (2011), a solução salina reage com a resina durante a imersão, degradando a rede polimérica por meio de reações hidrolíticas e/ou pela lixiviação de pequenas moléculas (monômeros ou oligômeros). A relação entre essas mudanças superficiais e a perda de resistência à tração ao longo do tempo é evidenciada pelos resultados experimentais dos ensaios de tração uniaxial. Ressalta-se que as amostras protegidas não estão incluídas nesta comparação devido à interação com o concreto circundante.

Compósitos de FRP apresentam amarelamento ao longo do tempo devido à efeitos ambientais (Bank, Gentry, Barkatt, 1995; Cabral-Fonseca *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2022d), sendo que tal amarelamento é causado pela resina (Pechyen, Atong, Aht-Ong, 2011; Ksouri, Haddar, 2018). O amarelamento da resina é irreversível, e o oxigênio, a umidade, a temperatura e a radiação ultravioleta são os principais fatores ambientais envolvidos (Buch, Shanahan, 2000; Cabral-Fonseca *et al.*, 2011; Ksouri, Haddar, 2018; Krauklis, Echtermeyer, 2018). Segundo Down (1984) e Krauklis e Echtermeyer (2018), o amarelamento da resina sob condições hidrotérmicas começa na superfície e se aprofunda com uma taxa não linear, sendo que a profundidade do amarelamento está positivamente correlacionada com a temperatura (Ksouri, Haddar, 2018). O amarelamento da resina pode ser atribuído a alterações na estrutura molecular causadas por radiação UV ou condições hidrotérmicas, resultando em mudanças tanto na coloração quanto nas propriedades mecânicas.

#### **4.4.2.3 Absorção**

A avaliação da absorção de água pelas barras de GFRP foi realizada de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 17201-11 (2025), utilizando-se três amostras com comprimento de 25 mm imersas em solução salina a  $50 \pm 3$  °C. Para efeitos de comparação, três amostras de GFRP com comprimento de 25 mm foram imersas em água a 23 °C e avaliadas quanto à sua absorção. A Tabela 53 e Tabela 54 apresentam os resultados obtidos para cada corpo de prova imerso em água e em solução salina, respectivamente.

A ABNT NBR 17201-1 (2025) limita a absorção de água em 0,25 % após 24 horas de imersão e em 1 % na saturação. Segundo Benmokrane *et al.* (2023), os limites de absorção de água foram estabelecidos para que problemas de fabricação sejam rapidamente identificados, particularmente os relacionados à porosidade, os quais podem adversamente afetar a durabilidade das barras de GFRP. Nota-se que as barras de GFRP não obedeceram

ao limite após 24 horas de imersão, sendo obtida absorção média de 0,93 % para a imersão em água a 23 °C e de 1,04 % para a imersão em solução salina a 50 °C, valores próximos ao limite de absorção de água na saturação do corpo de prova. Para ambos os ambientes de imersão, tendo em vista que foram obtidos valores médios de absorção de água próximos de 1 % já nas primeiras 24 horas de ensaio, conclui-se que as barras de GFRP não obedeceram ao limite da ABNT NBR 17201-11 (2025) quanto à absorção na saturação. Após 2520 horas de ensaio (105 dias) foram obtidos valores médios de absorção de água para barras imersas em água a 23 °C e solução salina a 50 °C iguais a 4,94 % e 5,92 %, respectivamente.

**Tabela 53: Absorção das barras de GFRP imersas em água a 23 °C**

Tempo			Massa (g)			Absorção (%)		
Dias	Horas	√Horas	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
0	0	0,00	4,137	4,362	4,188	0,000	0,000	0,000
1	24	4,90	4,170	4,407	4,228	0,798	1,032	0,955
7	168	12,96	4,192	4,438	4,259	1,329	1,742	1,695
21	504	22,45	4,229	4,474	4,285	2,224	2,568	2,316
35	840	28,98	4,251	4,503	4,318	2,756	3,232	3,104
49	1176	34,29	4,271	4,530	4,343	3,239	3,851	3,701
66	1584	39,80	4,307	4,564	4,383	4,109	4,631	4,656
77	1848	42,99	4,309	4,620	4,406	4,158	5,915	5,205
91	2184	46,73	4,306	4,572	4,385	4,085	4,814	4,704
105	2520	50,20	4,327	4,588	4,399	4,593	5,181	5,038

**Tabela 54: Absorção das barras de GFRP imersas em solução salina a 50 °C**

Tempo			Massa (g)			Absorção (%)		
Dias	Horas	√Horas	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
0	0	0,00	4,471	3,921	4,362	0,000	0,000	0,000
1	24	4,90	4,521	3,957	4,409	1,118	0,918	1,077
7	168	12,96	4,571	4,005	4,465	2,237	2,142	2,361
21	504	22,45	4,623	4,058	4,515	3,400	3,494	3,508
35	840	28,98	4,659	4,098	4,548	4,205	4,514	4,264
49	1176	34,29	4,678	4,112	4,567	4,630	4,871	4,700
66	1584	39,80	4,728	4,144	4,593	5,748	5,687	5,296
77	1848	42,99	4,754	4,167	4,613	6,330	6,274	5,754
91	2184	46,73	4,723	4,150	4,599	5,636	5,840	5,433
105	2520	50,20	4,735	4,158	4,615	5,905	6,044	5,800

Empananza *et al.* (2022) avaliaram 6 tipos diferentes de barras de GFRP e observaram que as barras do tipo A (fibras de vidro do tipo E-CR, resina éster vinílica e diâmetro de 10 mm) apresentaram a maior absorção de água na saturação, atingindo 1,16 %. Esse valor supera o limite normativo, mas ainda é significativamente inferior aos obtidos nesse estudo. Consequentemente, os autores obtiveram as maiores reduções das propriedades mecânicas

para as barras do tipo A, com redução da resistência à tração semelhante à obtida para as barras de GFRP desprotegidas e imersas durante 10000 horas em solução salina.

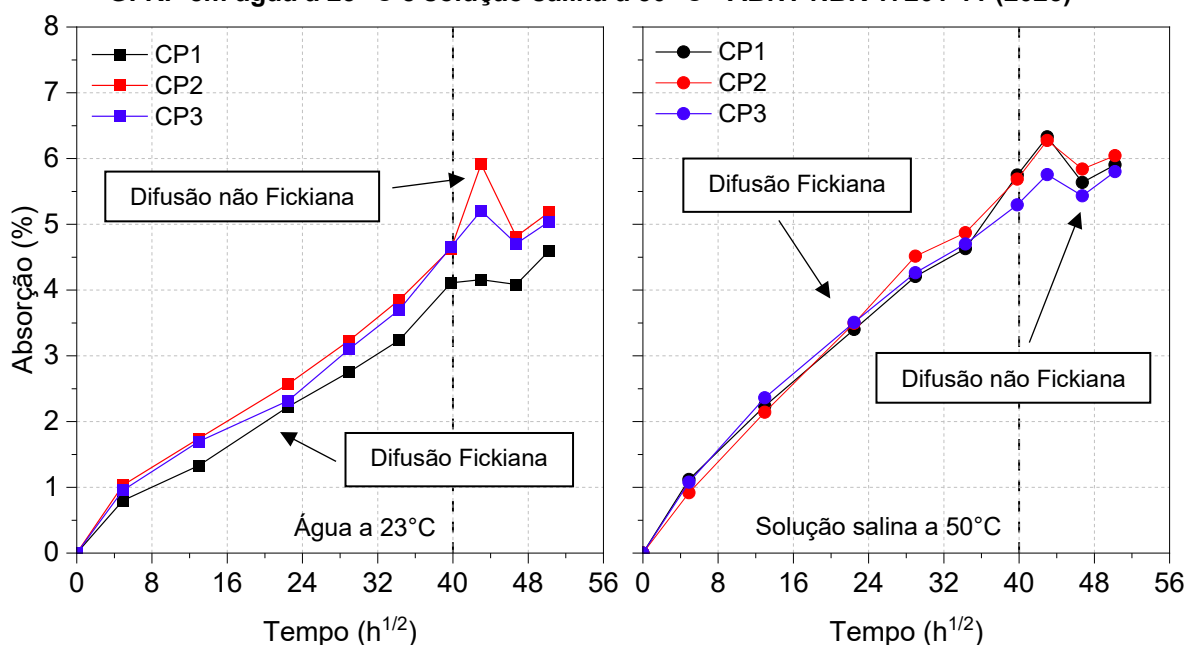
Robert e Benmokrane (2013) registraram redução da resistência à tração de 14 % após 365 dias (8760 horas) de imersão de barras de GFRP envoltas por concreto em solução de NaCl com concentração de 3 % e temperatura de 50 °C, valor expressivamente inferior ao obtido neste estudo (aproximadamente 63 % após 10000 horas de imersão). Contudo, os autores observaram absorção de umidade na saturação das barras de GFRP de apenas 0,15 %. Comparando-se tais resultados aos obtidos nesse trabalho, pode-se confirmar que uma barra de GFRP com alta taxa de absorção é mais afetada pela agressividade do meio do que uma barra com menor taxa de absorção (Benmokrane *et al.*, 2018, Emparanza *et al.*, 2022). Quando uma barra de GFRP é imersa em água, os íons alcalinos transportados pelas moléculas de água atacam a matriz polimérica, causando descolamento e microfissuração, criando uma rede porosa dentro do compósito. Isso permite a penetração de quantidades maiores de água, resultando em degradação adicional (Won *et al.*, 2008).

As barras de GFRP do primeiro lote apresentaram absorção média de 0,19 % após 24 horas de imersão em água à 50 °C. Em comparação, as barras do segundo lote apresentaram valores médios de absorção de 0,93 % em água a 23 °C e 1,04 % em solução salina a 50 °C, representando aumentos de 389,47 % e 447,37 %, respectivamente. Essa diferença pode ser atribuída aos defeitos e irregularidades na superfície das barras do segundo lote, decorrentes do processo de fabricação. A presença de bolhas, resultante de possíveis falhas na cura ou na mistura da resina, bem como a má impregnação das fibras aumentam a porosidade do compósito, favorecendo a absorção de água. Além disso, a impregnação deficiente compromete a transferência de tensões entre as fibras, reduzindo a resistência mecânica do material, conforme evidenciado nos ensaios de tração uniaxial. Yu *et al.* (2021) observaram que barras de GFRP imersas em solução alcalina a 60 °C sofreram deterioração severa na matriz polimérica e na interface matriz-fibras, levando à fissuração da matriz e ao descolamento na interface. Esse processo facilitou a permeação de moléculas de água, aumentando a absorção. O mesmo efeito pode ter ocorrido nas barras do segundo lote, já que as imperfeições podem ter servido como vias preferenciais para a entrada de umidade. Moura, Ribeiro e Lima (2021) também identificaram falta de uniformidade na espessura da matriz polimérica na superfície de barras de GFRP não condicionadas. Essas alterações na espessura da camada de resina presente na superfície das barras acarretam a perda da proteção das fibras de vidro, e podem ser associadas a problemas na produção das barras de GFRP ou à retração da resina durante a cura (Moura, Ribeiro, Lima, 2021; Moura, 2021). Ademais, após 5000 horas de imersão em solução salina a 50 °C, as barras de GFRP protegidas (segundo lote) apresentaram uma redução de aproximadamente 63 % na resistência à tração, enquanto as vigas de concreto armado com barras de GFRP (primeiro

lote) tiveram apenas 12 % de redução na força máxima resistida. Esses resultados evidenciam que as barras do segundo lote sofreram degradação mais intensa, em função da maior absorção de água, comprometendo sua durabilidade e desempenho mecânico. Benmokrane *et al.* (2002) notaram em seu estudo que a presença de imperfeições como vazios e microfissuras afetaram significativamente a durabilidade de barras de GFRP investigadas.

A Figura 109 apresenta as curvas de absorção *versus* a raiz quadrada do tempo de imersão em água a 23 °C e solução salina a 50 °C, com medidas realizadas segundo as recomendações da ABNT NBR 17201-11 (2025). Observa-se que nenhuma amostra, em ambos os ambientes, obedeceu ao critério da ABNT NBR 17201-11 (2025) para a consideração de saturação, segundo o qual o corpo de prova pode ser considerado saturado quando três pesagens consecutivas apresentarem variações médias inferiores ao maior valor entre 1 % do ganho de massa total ou 5 mg. Todas as curvas de absorção exibiram uma tendência linear no trecho inicial, característica de uma difusão Fickiana. Posteriormente, o mecanismo de difusão passou a ser instável e as amostras apresentaram trecho final marcado pelo ganho e perda de massa, caracterizando uma difusão não Fickiana antes que se observasse a saturação. Nesse sentido, não foi possível determinar a absorção na saturação dos corpos de prova imersos em água a 23 °C e em solução salina a 50 °C.

**Figura 109: Absorção de água em função da raiz quadrada do tempo de imersão das barras de GFRP em água a 23 °C e solução salina a 50 °C - ABNT NBR 17201-11 (2025)**



Nas primeiras 24 horas de imersão ( $h^{1/2} = 4,9$ ) a taxa de absorção é mais elevada e a curva apresenta maior inclinação. Posteriormente, a taxa de absorção diminui e passa a ser quase constante, ou seja, a inclinação das curvas praticamente não se altera até o início da difusão não Fickiana. Os valores de absorção de água que marcam o início da difusão não

Fickiana no CP1, CP2 e CP3 para imersão em água a 23 °C e em solução salina a 50 °C são iguais a 4,11 %, 4,63 % e 4,66 % e iguais a 6,33 %, 6,27 % e 5,75 %, respectivamente. Uma vez que a difusão passou a ser não Fickiana e não pôde ser determinada a absorção na saturação, os ensaios foram finalizados após 105 dias de imersão. De acordo com Silva, D’Almeida e Cardoso (2024), esse comportamento não Fickiano é resultado de mudanças estruturais na matriz polimérica, impostas pelas condições de umidade e temperatura. Rocha *et al.* (2017) corroboram essa afirmação, afirmando que a difusão não Fickiana na matriz polimérica é principalmente atribuída a processos de relaxamento ou reações químicas hidrolíticas. Segundo Cabral-Fonseca *et al.* (2011), em processos de envelhecimento higrotérmico, as alterações no ganho de massa geralmente resultam de um equilíbrio entre a absorção de água devido à entrada de umidade e à possível perda de material por mecanismos de degradação. Já Benmokrane *et al.* (2002) associam o comportamento não Fickiano à presença de vazios preexistentes ou formados durante a imersão.

Conforme esperado, nota-se que a absorção é superior nas amostras imersas em solução salina a 50 °C em relação às amostras imersas em água a 23 °C (37 % superior), uma vez que a temperatura acelera o processo de difusão da água. Segundo Wang, Xian e Li (2019), temperaturas mais elevadas relaxam a estrutura da matriz polimérica e aumentam a energia de ativação das moléculas de água na solução de imersão, acelerando a difusão da água na matriz e na interface. Fergani *et al.* (2018), Manalo *et al.* (2020b) e Moura (2021) também registraram este comportamento.

Após a finalização do ensaio de absorção, os corpos de prova foram secos em estufa a 50 °C durante 24 horas, resfriados em dessecador até retornar a temperatura ambiente e pesados na mesma balança utilizada no ensaio de absorção. A Tabela 55 apresenta as massas inicial e final dos corpos de prova.

**Tabela 55: Variação entre a massa inicial e final das amostras submetidas a ensaio de absorção de água**

Ambiente	CP	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Variação (%)
Água a 23 °C	1	4,137	4,124	-0,314
	2	4,362	4,351	-0,252
	3	4,188	4,176	-0,287
Solução de salina a 50 °C	1	4,471	4,476	0,112
	2	3,921	3,921	0,000
	3	4,362	4,368	0,138

Conforme a Tabela 55, foram obtidas variações de massa negativas para as amostras imersas em água a 23 °C e variações positivas para as amostras imersas em solução salina a 50 °C. As variações negativas indicam que o ganho e perda da massa observados no trecho final da curva de absorção das barras de GFRP imersas em água a 23 °C estão associados

à perda de material que compõe a barra de GFRP durante o processo de imersão, aumentando a presença de vazios e a entrada de água para preenchê-los (Fergani *et al.*, 2018; Santos, 2024). Com relação às barras de GFRP imersas em solução salina a 50 °C, as variações positivas indicam que não houve perda de matéria das barras durante o processo de imersão, portanto, o comportamento observado no trecho final das curvas de absorção, caracterizado pelo ganho e perda de massa das amostras, está relacionado a fenômenos temporários de absorção e dessorção de água (Santos, 2024).

Na Tabela 56 encontram-se os coeficientes de difusão (D) calculados de acordo com a Equação 9 para ambos os ambientes de imersão, sendo  $M_1$  e  $M_2$  valores de absorção tomados no trecho linear das curvas de absorção e correspondentes aos tempos  $t_1$  e  $t_2$ , respectivamente. Tendo em vista que não foi possível a determinação da absorção na saturação,  $M_m$  foi adotado como o último valor de absorção obtido antes do início da difusão não Fickiana.

**Tabela 56: Coeficiente de difusão das barras de GFRP imersas em água a 23 °C e em solução salina a 50 °C**

Ambiente	CP	h (mm)	$M_m$ (%)	$M_1$ (%)	$M_2$ (%)	$\sqrt{t_1}$ (h <sup>1/2</sup> )	$\sqrt{t_2}$ (h <sup>1/2</sup> )	D (mm <sup>2</sup> /h)	D (10 <sup>-7</sup> mm <sup>2</sup> /s)
Água a 23 °C	1	10,80	4,11	0,80	2,76	4,90	28,98	0,0090	24,90
	2		4,63	1,03	3,23			0,0089	24,77
	3		4,66	0,96	3,10			0,0084	23,36
Média								0,0088	24,35
Solução salina a 50 °C	1	10,80	6,33	1,12	4,20	4,90	28,98	0,0094	26,08
	2		6,27	0,92	4,51			0,0130	36,03
	3		5,75	1,08	4,26			0,0121	33,64
Média								0,0115	31,92

É possível notar que, assim como a absorção, o coeficiente de difusão também aumentou com o incremento da temperatura de condicionamento das amostras, sendo obtido um aumento de cerca de 31 %. Moura (2021) observou aumentos de 21 % e 67 % no coeficiente de difusão de barras de GFRP fabricadas com matriz éster vinílica imersas em solução alcalina a 40 °C e 60 °C, respectivamente, em relação à imersão em solução alcalina a 23 °C. Manalo *et al.* (2020b) também registrou esse comportamento.

Manalo *et al.* (2020b) obtiveram coeficientes de difusão iguais a  $1,01 \times 10^{-7}$  mm<sup>2</sup>/s e  $1,32 \times 10^{-7}$  mm<sup>2</sup>/s para barras de GFRP fabricadas com fibras de vidro do tipo E-CR e resina do tipo vinil éster imersas em água a 23 °C e solução salina a 60 °C, respectivamente, valores aproximadamente 96 % inferiores aos obtidos nesse trabalho. Os autores justificam o baixo coeficiente de difusão obtido devido à resina vinil éster possuir menos propriedades hidrofílicas, uma vez que contém menos grupamentos éster polares (Chin *et al.*, 2001). Além disso, os autores também explicam que esse comportamento sugere que a umidade foi

absorvida somente através da superfície rica em resina das barras de GFRP (Mouzakis, Zoga, Galiotis, 2008). Contudo, os resultados obtidos nesse trabalho indicam que, ainda que as barras de GFRP também tenham sido fabricadas com resina vinil éster, as irregularidades oriundas do processo de produção contribuíram para a maior absorção e, conseqüentemente, para o maior coeficiente de difusão. Dessa forma, a umidade não foi absorvida somente através da superfície, mas preencheu os vazios existentes, levando à expressiva degradação das propriedades mecânicas do compósito ao longo do tempo de imersão, como já discutido.

A Figura 110 apresenta a seção transversal das barras imersas em água a 23 °C e em solução salina a 50 °C, em relação à barra de referência, após a secagem em estufa no período pós-imersão.

**Figura 110: Seção transversal das amostras de GFRP de referência e após imersão em água a 23 °C e solução salina a 50 °C, respectivamente**



Pode ser observado na Figura 110 um leve e gradual escurecimento da matriz polimérica das barras condicionadas, indicando a degradação. Observa-se, também, que a superfície da barra mantida imersa em água a 23 °C aparenta maior rugosidade, corroborando a perda de matéria da barra identificada por meio da secagem em estufa das barras após a imersão. Santos (2024) observou alterações similares na coloração e na textura superficial de barras de GFRP imersas em água destilada a 50 °C, após cerca de 40 dias de imersão.

#### **4.4.2.4 Teor de fibras**

Foram realizados ensaios para a determinação do teor de fibras em cinco amostras de barra de GFRP com comprimento de 20 mm (massa entre 2 e 10 g) para cada idade e condição de exposição, utilizando-se o método da combustão segundo os procedimentos da ABNT NBR 17201-10 (2025). A Tabela 57 a Tabela 60 apresentam os resultados obtidos para as amostras de referência e para as amostras desprotegidas e protegidas após imersão em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas, respectivamente. Nas Tabelas, CP corresponde aos corpos de prova ensaiados,  $m_1$  à massa dos cadinhos,  $m_2$  à massa dos cadinhos em conjunto com os corpos de prova,  $m_3$  à massa dos cadinhos em conjunto com o resíduo de fibras e  $M_{fibras}$  ao teor de fibras calculado.

As barras de GFRP do primeiro lote apresentaram teor de fibras igual a 77 %, enquanto as barras de GFRP do segundo lote, na condição de referência, apresentaram teor de fibras

igual a 82 %, perfazendo um aumento de 6,49 %. Ainda que as barras do segundo lote tenham apresentado um maior teor de fibras, ao contrário do que seria esperado, foram obtidas menores propriedades mecânicas e maior absorção de água em relação às barras do primeiro lote devido aos defeitos já comentados, evidenciando falhas no processo de fabricação.

Conforme recomenda a ABNT NBR 17201-1 (2025), as barras de GFRP devem ser produzidas com um teor de fibras mínimo igual a 75 %. Como pode ser visto na Tabela 57 a Tabela 60, o limite mínimo da norma foi atendido para todos os corpos de prova, independente da condição ou da duração da exposição, tanto individualmente quanto com relação aos valores médios.

**Tabela 57: Teor de fibras das barras de GFRP de referência**

Condição	CP	m <sub>1</sub> (g)	m <sub>2</sub> (g)	m <sub>3</sub> (g)	M <sub>fibra</sub> (%)
Referência	1	69,9956	73,0271	72,4769	81,8506
	2	73,8683	77,3970	76,7463	81,5598
	3	66,2539	69,8175	69,1639	81,6590
	4	71,1214	74,5584	73,9273	81,6381
	5	73,0496	76,2657	75,6719	81,5366
	Média				81,6488
	Desvio-Padrão				0,1108
	COV (%)				0,1358

**Tabela 58: Teor de fibras das barras de GFRP desprotegidas e protegidas mantidas em solução salina durante 1000 horas**

Condição	CP	m <sub>1</sub> (g)	m <sub>2</sub> (g)	m <sub>3</sub> (g)	M <sub>fibra</sub> (%)
1000 horas - Desprotegido	1	77,8265	80,9188	80,3383	81,2276
	2	79,7963	82,1336	81,7114	81,9364
	3	73,4012	75,8197	75,3614	81,0502
	4	74,6297	77,5892	77,0712	82,4970
	5	64,1040	66,6945	66,2254	81,8915
	Média				81,7206
	Desvio-Padrão				0,5237
	COV (%)				0,6408
1000 horas - Protegido	1	71,4990	72,9395	72,7043	83,6723
	2	64,1053	65,6501	65,3742	82,1401
	3	71,3180	72,8535	72,5902	82,8525
	4	66,2553	67,9473	67,6538	82,6537
	5	73,4042	75,0560	74,7637	82,3042
	Média				82,7245
	Desvio-Padrão				0,5363
	COV (%)				0,6483

**Tabela 59: Teor de fibras das barras de GFRP desprotegidas e protegidas mantidas em solução salina durante 5000 horas**

Condição	CP	m <sub>1</sub> (g)	m <sub>2</sub> (g)	m <sub>3</sub> (g)	M <sub>fibra</sub> (%)	
5000 horas - Desprotegido	1	51,9040	54,2731	53,8413	81,7737	
	2	57,3671	59,6825	59,2667	82,0420	
	3	57,3681	59,6836	59,2578	81,6109	
	4	59,1888	61,4626	61,0496	81,8366	
	5	56,5038	58,7923	58,3661	81,3764	
	Média					81,7279
	Desvio-Padrão					0,2235
	COV (%)					0,2735
5000 horas - Protegido	1	79,7998	82,7249	82,1993	82,0314	
	2	73,8710	76,5625	76,0743	81,8614	
	3	69,9979	72,6629	72,1852	82,0750	
	4	74,6331	77,4248	76,9208	81,9465	
	5	71,1244	73,7752	73,3094	82,4279	
	Média					82,0685
	Desvio-Padrão					0,1941
	COV (%)					0,2365

**Tabela 60: Teor de fibras das barras de GFRP desprotegidas e protegidas mantidas em solução salina durante 10000 horas**

Condição	CP	m <sub>1</sub> (g)	m <sub>2</sub> (g)	m <sub>3</sub> (g)	M <sub>fibra</sub> (%)	
10000 horas - Desprotegido	1	73,8796	76,0007	75,6178	81,9480	
	2	73,4175	75,5805	75,2024	82,5196	
	3	66,2585	68,7496	68,3163	82,6061	
	4	71,1359	73,0580	72,7278	82,8209	
	5	74,6441	76,6360	76,2890	82,5794	
	Média					82,4948
	Desvio-Padrão					0,2917
	COV (%)					0,3536
10000 horas - Protegido	1	70,0085	72,4586	71,9931	81,0008	
	2	73,0653	75,6649	75,1908	81,7626	
	3	71,3307	73,9682	73,5009	82,2825	
	4	79,8117	82,1957	81,7605	81,7450	
	5	64,1104	67,2805	66,7027	81,7734	
	Média					81,7128
	Desvio-Padrão					0,4096
	COV (%)					0,5012

Não foram observadas alterações no teor de fibras em função da imersão das barras de GFRP em solução salina a 50 °C, sendo obtidos valores de aproximadamente 82 % para todas as idades e condições de exposição. Assim, é possível concluir que não houve degradação das fibras de vidro com o envelhecimento acelerado.

#### 4.4.2.5 Composição química das fibras de vidro

Foram realizados ensaios FRX para determinar a composição química das fibras de vidro, na forma de óxidos, e identificar o tipo de fibra de vidro utilizado na produção das barras. Assim, foi avaliada uma amostra de referência e uma amostra após 10000 horas de imersão em solução salina para cada condição de exposição (desprotegida e protegida). A Tabela 61 apresenta as quantidades dos principais óxidos encontrados nas fibras de vidro.

**Tabela 61: Composição química das fibras de vidro (% em massa), na forma de óxidos, para cada condição de exposição**

Óxido	Quantidade (%)		
	Referência	10000 horas - Desprotegida	10000 horas - Protegida
SiO <sub>2</sub>	52,99	51,60	51,57
CaO	26,97	28,26	28,04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,88	16,51	16,43
MgO	2,34	2,69	2,87
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,35	0,40	0,36
K <sub>2</sub> O	0,38	0,41	0,41
SrO	0,08	0,09	0,08
ZnO	-	0,00	0,00
MnO	-	0,02	0,01
SO <sub>3</sub>	-	0,02	0,08
ZrO <sub>2</sub>	0,01	0,01	0,01

Segundo o fabricante, as barras de GFRP foram produzidas com fibras de vidro do tipo AR. Contudo, comparando-se os resultados apresentados na Tabela 61 com a composição química de fibras de vidro do tipo E, ECR e AR (Tabela 5), pode-se concluir as fibras de vidro são do tipo E. As fibras de vidro do tipo AR apresentam maior quantidade de dióxido de zircônio (ZrO<sub>2</sub>) em sua composição, tornando-as álcali resistentes. Observa-se que a imersão em solução salina, em ambas as condições, não impactou significativamente a composição química das fibras de vidro. Além disso, também não há diferenças significativas na composição química em relação às barras do primeiro lote.

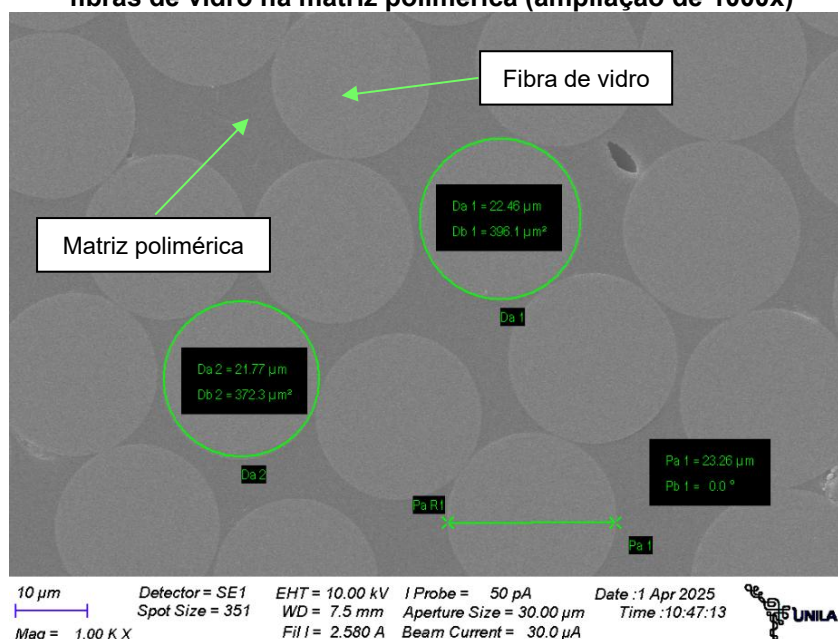
#### 4.4.3 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Foram realizadas análises microestruturais com o objetivo de investigar os mecanismos de degradação das barras de GFRP e sua relação com o desempenho mecânico após a imersão em solução salina. Foram utilizadas técnicas complementares, incluindo MEV, FTIR, DSC e TGA, que possibilitaram a caracterização morfológica, química e térmica dos materiais. A combinação dessas abordagens permitiu uma avaliação mais abrangente das alterações ocorridas longo do tempo de exposição, bem como suas implicações para a durabilidade do compósito.

#### 4.4.3.1 MEV

A Figura 111 apresenta uma micrografia obtida por MEV (ampliação de 1000x) na seção transversal de uma das amostras, sendo possível identificar as fibras de vidro e a matriz polimérica. As fibras de vidro apresentaram diâmetro de aproximadamente 20  $\mu\text{m}$ .

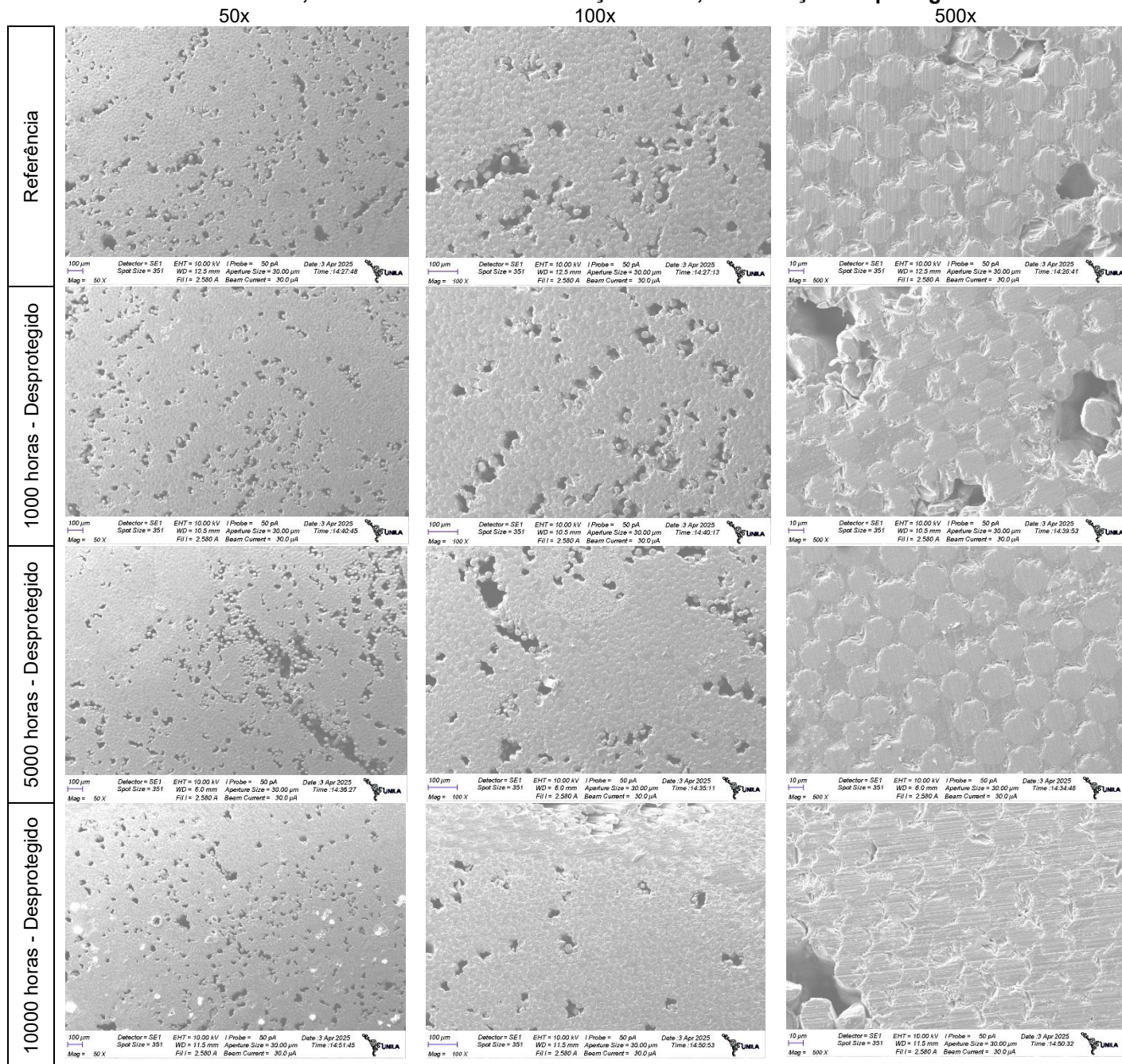
**Figura 111: Micrografia da seção transversal da barra de GFRP: diâmetro e distribuição das fibras de vidro na matriz polimérica (ampliação de 1000x)**



A Figura 112 apresenta as micrografias obtidas por MEV na seção transversal das barras de GFRP de referência e mantidas durante 1000, 5000 e 10000 horas em solução salina a 50  $^{\circ}\text{C}$ , na condição desprotegida. É possível observar que as amostras de referência apresentaram vazios e defeitos distribuídos em toda a seção transversal, além de regiões nas quais as fibras não estavam completamente envolvidas pela matriz polimérica, evidenciando uma má impregnação. Essa condição justifica a menor resistência à tração das barras do segundo lote em comparação ao primeiro, uma vez que a falha na impregnação compromete a transferência de tensões entre as fibras, reduzindo a resistência do compósito. Segundo Thomason (1995), a resistência da interface é responsável pela capacidade de transferência de tensão aplicada para as fibras, sendo predominantemente controlada pelo grau de impregnação das fibras pela matriz e pela qualidade da adesão interfacial nesses pontos de contato. A formação de vazios é relacionada, principalmente, à duas causas, sendo que a primeira está relacionada à incorporação de ar durante a etapa inicial de fabricação, seja pela retenção de bolhas de ar em formulações de resina de alta viscosidade durante sua preparação, seja pela má impregnação das fibras, a qual tende a ser agravada por resina de alta viscosidade que dificultam a penetração da matriz entre as fibras e a completa expulsão

do ar. A segunda causa se refere à presença de componentes voláteis ou contaminantes que se volatilizam durante as etapas de cura em alta temperatura (Thomason, 1995).

**Figura 112: Micrografias da seção transversal das barras de GFRP de referência e mantidas durante 1000, 5000 e 10000 horas em solução salina, na condição desprotegida**



A presença significativa de vazios e defeitos também está associada à menor densidade e à maior absorção de água observadas nas barras do segundo lote, conforme discutido anteriormente. Micelli e Nanni (2004) indicam evidências de que a taxa de degradação de barras de GFRP em ambientes fluidos está diretamente relacionada à quantidade de fluido absorvida ao longo do tempo.

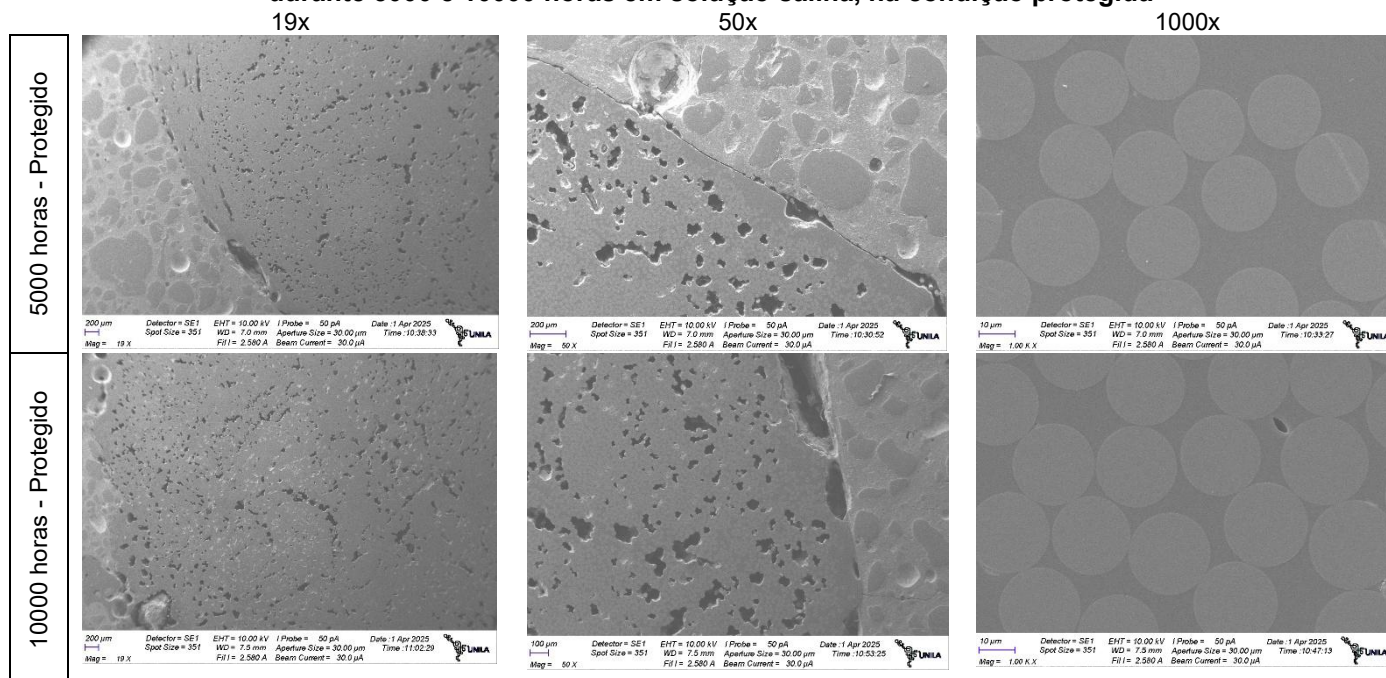
Ressalta-se que os vazios e a má impregnação das fibras foram verificados nas seções transversais das barras de GFRP em todas as idades avaliadas, o que indica um problema consistente no processo de fabricação. Observou-se, ainda, que qualitativamente não houve aumento perceptível na quantidade de vazios ao longo do tempo de imersão, embora não tenham sido realizados ensaios quantitativos para a determinação do teor de vazios. A presença de vazios nas barras de GFRP influencia negativamente a durabilidade do material, uma vez que esses defeitos funcionam como vias preferenciais para a penetração de agentes agressivos. Ao facilitar a difusão desses agentes para o interior do compósito, os vazios aceleram os processos de degradação da matriz polimérica ao longo do tempo, comprometendo o desempenho do material em condições ambientais agressivas. Thomason (1995) encontrou uma proporcionalidade linear entre o teor de vazios e a taxa de absorção de água em compósitos fabricados com fibras de vidro e resina epóxi, sendo o teor de vazios mais significativo do que a aderência na interface fibra/matriz para aumentar a absorção. El-Hassan *et al.* (2017) compararam dois tipos de barras de GFRP sob condições similares de exposição, com teor de vazios iguais a 0,10 e 0,23 %. Os autores relataram maior absorção de água nas barras com maior conteúdo de vazios, bem como maior redução das propriedades mecânicas. Emparanza *et al.* (2022) e Khatibmasjedi *et al.* (2020) observaram uma maior concentração de vazios na área mais externa da seção transversal de barras de GFRP, em relação ao núcleo mais interno, devido ao processo de produção. Após 365 dias de imersão em água do mar a 23 °C, 40 °C e 60 °C, Emparanza *et al.* (2022) observaram que a barra de GFRP mais porosa apresentou maior absorção de umidade e redução mais expressiva das propriedades mecânicas. Davalos, Chen e Ray (2011), Gooranorimi *et al.* (2017), Moura (2021) e Al-Zharani (2024) também observaram a presença de vazios na seção transversal de barras de GFRP.

Apesar da presença de vazios, não foi observado descolamento na interface fibras/matriz, nem sinais de degradação das fibras de vidro com o aumento do tempo de imersão das barras em solução salina. De acordo com Manalo *et al.* (2020b), a preservação da integridade da interface fibra-matriz pode estar relacionada ao fato de as barras não estarem submetidas a tensões durante a exposição. A ausência de sinais de degradação nas fibras de vidro ao longo da imersão em solução salina corrobora os resultados obtidos nos ensaios realizados para a determinação do teor de fibras, nos quais não foram detectadas perdas no conteúdo de fibras das amostras. Assim, pode-se constatar que a degradação das barras desprotegidas está concentrada na matriz polimérica.

A Figura 113 apresenta as micrografias obtidas da seção transversal das barras de GFRP mantidas durante 5000 e 10000 horas em solução salina, na condição protegida. Problemas encontrados com o encaminhamento das amostras para a realização de ensaios

microestruturais não permitiram a obtenção de micrografias da seção transversal das barras de GFRP mantidas durante 1000 horas em solução salina na condição protegida.

**Figura 113: Micrografias da seção transversal das barras de GFRP de referência e mantidas durante 5000 e 10000 horas em solução salina, na condição protegida**



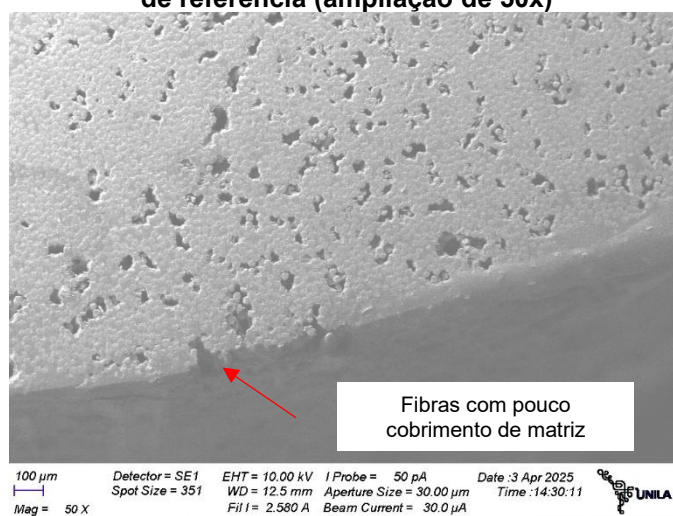
É possível observar a presença significativa de vazios nas amostras protegidas (Figura 113), tal como visto nas amostras de referência e nas amostras desprotegidas. Apesar da maior redução das propriedades mecânicas nas amostras protegidas, não foram observadas diferenças visíveis entre as barras de GFRP desprotegidas e protegidas. Nesse sentido, nas barras de GFRP protegidas também não foi observado o descolamento na interface, nem foi detectado nenhum sinal de degradação das fibras de vidro, permitindo concluir que a redução das propriedades mecânicas está relacionada à degradação da matriz polimérica. Segundo Kamal e Boulfiza (2011), a degradação da interface fibra-matriz por hidrólise e potencial descolamento não é esperada em condições de exposição moderadas (com temperaturas inferiores à 50 °C), mesmo quando o pH é cerca de 13.

Moura (2021) observaram a variação da espessura do revestimento de resina na superfície das amostras, o que também foi observado para as barras de GFRP do segundo lote (Figura 114). Segundo Moura (2021), a redução desse revestimento impacta na perda da proteção das fibras de vidro contra a ação de agentes externos e pode estar associada a falhas na produção das barras.

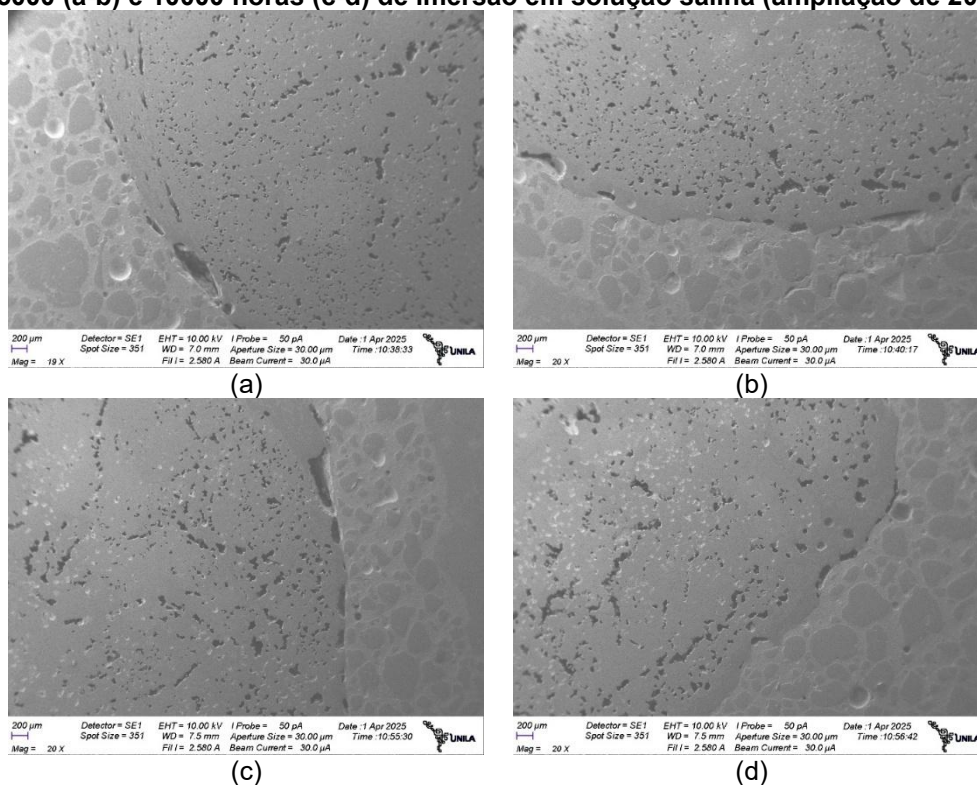
Na Figura 115 é possível visualizar a interface entre as barras de GFRP e o concreto após 5000 e 10000 horas de imersão em solução salina. As imagens não evidenciam falhas aparentes na interface barra-concreto, mesmo após 10000 horas de exposição, sugerindo

que a aderência foi preservada do ponto de vista morfológico. Contudo, tal como observado por Benmokrane *et al.* (2002), podem ser observadas algumas lacunas na interface compósito-concreto, as quais são devidas à alta tensão superficial entre as superfícies do concreto (hidrofílico) e do compósito (hidrofóbico), fazendo com que às imperfeições superficiais oriundas do processo de fabricação do compósito não sejam preenchidas pelo concreto.

**Figura 114: Micrografia da seção transversal de barra de GFRP do segundo lote, na condição de referência (ampliação de 50x)**



**Figura 115: Micrografias da interface entre o concreto e as barras de GFRP protegidas após 5000 (a-b) e 10000 horas (c-d) de imersão em solução salina (ampliação de 20x)**

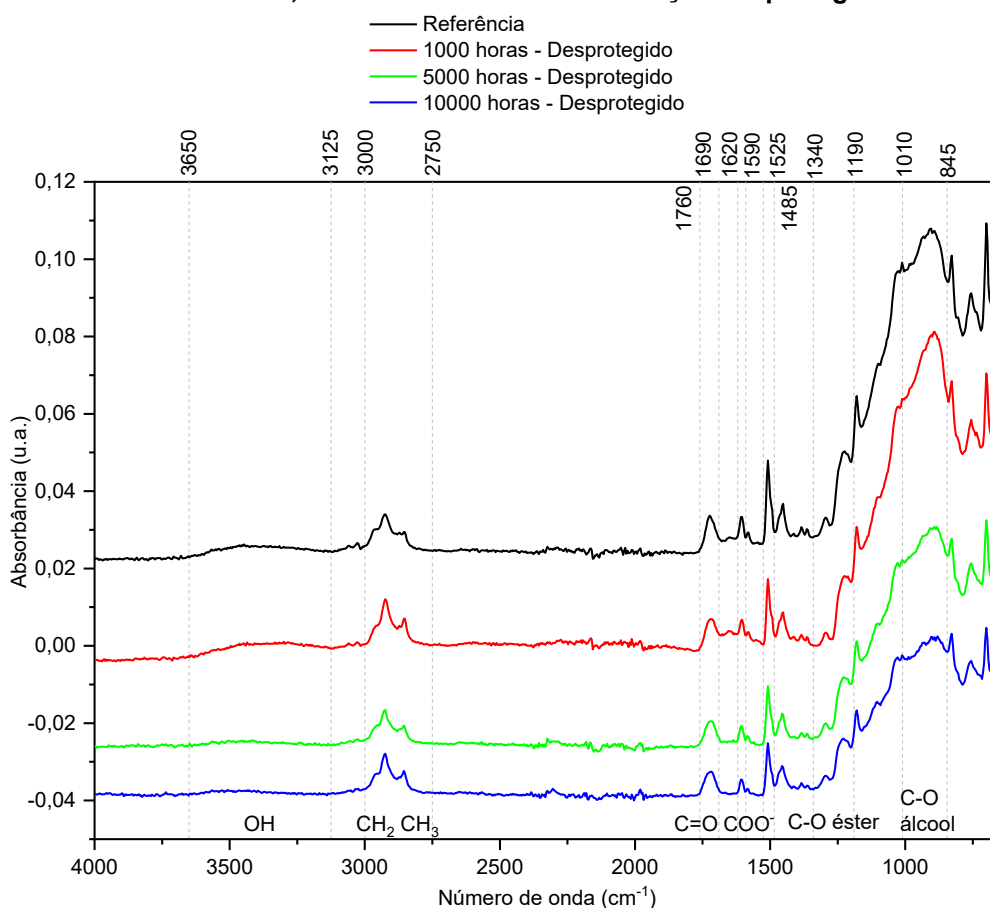


#### 4.4.3.2 FTIR

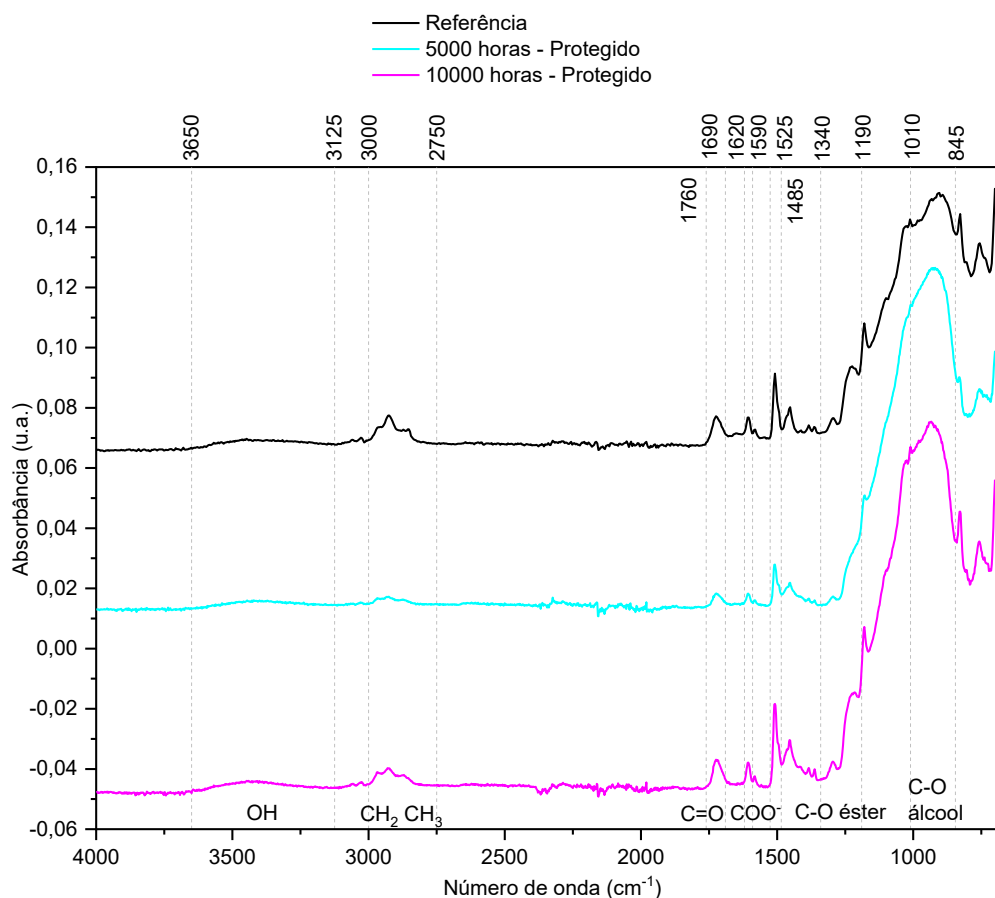
Na Figura 116 e Figura 117 são apresentados os espectros de FTIR para as barras de GFRP de referência e imersas em solução salina a 50 °C durante 1000, 5000 e 10000 horas, nas condições desprotegida e protegida, respectivamente. Problemas encontrados com o encaminhamento das amostras para a realização de ensaios microestruturais não permitiram a obtenção do espectro FTIR das barras de GFRP mantidas durante 1000 horas em solução salina na condição protegida.

Em um primeiro momento os espectros obtidos por FTIR foram analisados com foco nos picos localizados entre 3650 e 3125  $\text{cm}^{-1}$ , correspondente à vibração de estiramento das ligações OH, e entre 3000 e 2750  $\text{cm}^{-1}$ , correspondente às vibrações de estiramentos dos grupos  $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$ , os quais foram avaliados de acordo com a metodologia proposta por Benmokrane *et al.* (2017a). Para cada condição de exposição e tempo de imersão, as áreas sob as curvas dessas bandas foram determinadas a fim de quantificar eventuais variações nas intensidades relativas. A partir desses valores, foi calculada a razão OH/CH para identificar a ocorrência de hidrólise na matriz polimérica. Os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 62.

**Figura 116: Espectros FTIR das barras de GFRP de referência e imersas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas na condição desprotegida**



**Figura 117: Espectros FTIR das barras de GFRP de referência e imersas em solução salina durante 5000 e 10000 horas na condição protegida**



**Tabela 62: Razão OH / CH para as barras de GFRP de referência e mantidas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas nas condições desprotegida e protegida**

Idade / Condição	Área sob a curva		OH / CH
	OH	CH	
Referência / Desprotegida	0,687	0,825	0,832
1000 horas / Desprotegida	0,832	0,902	0,921
5000 horas / Desprotegida	0,371	0,554	0,670
10000 horas / Desprotegida	0,299	0,674	0,444
5000 horas / Protegida	0,526	0,221	2,376
10000 horas / Protegida	0,859	0,495	1,736

Em relação às amostras desprotegidas, observa-se na Tabela 62 que a razão OH/CH aumentou de 0,832 para 0,921 após 1000 horas de imersão, em comparação à condição de referência. Esse aumento indica a formação de grupos hidroxila como resultado da hidrólise das ligações éster presentes na matriz polimérica. No entanto, após 5000 e 10000 horas de imersão, a razão OH/CH apresentou uma redução progressiva, alcançando valores iguais a 0,670 e 0,444, respectivamente. Esse decréscimo sugere que, após o estágio inicial de degradação, fragmentos de baixo peso molecular formados pela ruptura das cadeias poliméricas passaram a ser lixiviados para o meio externo, diminuindo a concentração de

grupos hidroxila detectáveis na estrutura residual. Esse mecanismo de extração de produtos hidrossolúveis da matriz, subsequente à quebra das ligações poliméricas, é mencionado por diversos autores (Ashbee, Frank, Wyatt, 1967; Ashbee, Wyatt, 1969; Abeysinghe *et al.*, 1982; Visco, Brancato, Campo, 2011).

Guo *et al.* (2018) realizaram ensaios FTIR nos resíduos das soluções agressivas utilizadas no condicionamento de barras de GFRP a 60 °C por um período de 6 meses, comparando-os com o espectro FTIR de amostras não condicionadas. O aparecimento de novas bandas nos espectros dos resíduos indicaria a lixiviação de grupos funcionais da matriz polimérica das amostras durante a exposição. Os autores observaram o surgimento de duas novas bandas nos espectros dos resíduos em relação ao espectro das amostras de referência, sendo uma banda em aproximadamente  $840\text{cm}^{-1}$ , associada a alterações na vibração do grupo éter devido à incorporação de moléculas de água ao polímero, e uma banda em torno de  $1125\text{cm}^{-1}$ , relacionada a alterações na vibração da ligação C-OH, atribuídas à formação de ligações de hidrogênio durante o processo de hidratação (Ngono, Maréchal, Mermilliod, 1999). Além disso, verificaram que a maioria das bandas características do espectro de referência também estava presente nos espectros dos resíduos, o que reforça a evidência de lixiviação de compostos da matriz polimérica do compósito durante o condicionamento.

No caso das amostras protegidas, observa-se na Tabela 62 um aumento expressivo na razão OH/CH após 5000 horas de imersão, em relação a referência (0,832 para 2,376), indicando a ocorrência significativa de hidrólise na matriz polimérica. Wang *et al.* (2024) e Ramanathan *et al.* (2021) investigaram as alterações microestruturais na seção transversal de barras de GFRP expostas a solução salina simulada em laboratório e após 18 anos de exposição em pontes em condições reais de serviço, respectivamente. Os autores observaram que a hidrólise da matriz polimérica estava intimamente relacionada à perda de resistência mecânica. Após 10000 horas de imersão, a razão OH/CH reduziu para 1,736, o que pode ser associado à estabilização da degradação. Tal como visto por meio dos ensaios mecânicos, a resistência à tração das barras protegidas se manteve aproximadamente constante entre 5000 e 10000 horas devido à obstrução dos poros do concreto pelo acúmulo de sais de Friedel, limitando o ingresso da solução agressiva e, conseqüentemente, inibindo a evolução dos mecanismos de degradação. Analisando-se os valores absolutos das áreas sob as bandas OH e CH, nota-se uma diminuição entre a condição de referência e 5000 horas de imersão, a qual pode ser atribuída à lixiviação de compostos da matriz polimérica para a solução. Com o tamponamento dos poros do concreto, a lixiviação passou a ser impedida e, entre 5000 e 10000 horas, os valores absolutos das áreas sob as bandas OH e CH aumentaram, indicando o acúmulo de produtos de degradação.

Os ensaios mecânicos revelaram que as barras de GFRP protegidas pelo concreto apresentaram maior degradação em comparação às desprotegidas, resultado consistente

com os espectros FTIR obtidos. A análise por FTIR demonstrou que as amostras protegidas exibiram razão OH/CH significativamente mais elevadas, indicando que a alcalinidade do concreto acelerou os processos de hidrólise na matriz polimérica e explicando a maior degradação observada nas propriedades mecânicas das barras protegidas.

Na Figura 116 e Figura 117 também são destacados os picos localizados entre 1760 e 1690  $\text{cm}^{-1}$ , atribuído à vibração de estiramento dos grupos C=O (carbonila) dos grupos éster, entre 1620 e 1590  $\text{cm}^{-1}$ , relacionados à vibração de estiramento do  $\text{COO}^-$  (carboxilato), e entre 1525 e 1485  $\text{cm}^{-1}$ , correspondente à vibração do esqueleto do anel aromático. Com base na metodologia de Sun *et al.* (2023), foram determinadas as áreas sob os picos e calculadas as razões C=O / anel aromático e  $\text{COO}^-$  / anel aromático, conforme apresentado na Tabela 63.

**Tabela 63: Razão C=O / anel aromático e  $\text{COO}^-$  / anel aromático para as barras de GFRP de referência e mantidas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas nas condições desprotegida e protegida**

Idade / Condição	Área sob a curva			C=O / anel aromático	$\text{COO}^-$ / anel aromático
	C=O	$\text{COO}^-$	Anel aromático		
Referência / Desprotegida	0,318	0,085	0,363	0,878	0,235
1000 horas / Desprotegida	0,249	0,058	0,285	0,872	0,203
5000 horas / Desprotegida	0,264	0,058	0,254	1,038	0,230
10000 horas / Desprotegida	0,254	0,050	0,223	1,142	0,224
5000 horas / Protegida	0,147	0,043	0,204	0,719	0,210
10000 horas / Protegida	0,305	0,103	0,420	0,726	0,245

Para as barras de GFRP desprotegidas a razão C=O / anel aromático apresentou uma leve redução inicial, passando de 0,878 na amostra de referência para 0,872 após 1000 horas de imersão, o que indica o início da hidrólise das ligações éster. Posteriormente, essa razão aumentou para 1,038 após 5000 horas e para 1,142 após 10000 horas. Esse aumento pode ser atribuído, em parte, à redução progressiva da área do pico associado ao anel aromático (de 0,363 para 0,223), sugerindo a possível lixiviação de fragmentos aromáticos da matriz. Ao analisar a área absoluta da banda C=O, observa-se uma redução de 0,318 para 0,249 após 1000 horas, coerente com a ocorrência de hidrólise na matriz polimérica. No entanto, após 5000 horas, há um leve aumento para 0,264, o que pode estar associado à ocorrência simultânea de termo oxidação, uma reação que promove a quebra das cadeiras poliméricas com consequente formação de carbonila, conforme descrito por Krauklis e Echtermeyer (2018). Esses autores observaram aumento no pico de 1736  $\text{cm}^{-1}$ , relativo ao grupo C=O, em amostras de resina epóxi imersas em água destilada a 60 °C durante dois meses, o que foi atribuído à termo oxidação em andamento. Esse processo também está relacionado ao amarelamento gradual da matriz polimérica, fenômeno descrito na literatura como resultado da formação de grupos carbonila e quinona em ambientes hidrotérmicos ((Noskov, 1975;

Tennent, 1979; Allen *et al.*, 1987; Tsotsis, 1995; Rosu, Rosu, Cascaval, 2009; Yousif, Haddad, 2013; Krauklis, Echtermeyer, 2018). Wu *et al.* (2022d) submetaram amostras de resina vinil éster a envelhecimento térmico acelerado (150 °C por 168 horas) e observaram, por meio de FTIR, a redução dos picos relativos ao grupo hidroxila (OH) e o aumento dos picos relativos ao grupo carbonila, o que reforça a hipótese de oxidação de grupos OH para C=O sob efeito térmico. Adicionalmente, segundo Mailhot *et al.* (2005) e Celina, Dayile e Quintana (2013), a ligação entre anéis aromáticos pode ser sensível à oxidação, o que também pode contribuir para a diminuição do pico correspondente ao anel aromático, interferindo nas razões apresentadas na Tabela 63. A razão COO<sup>-</sup> / anel aromático, por sua vez, caiu de 0,235 na amostra de referência para 0,203 após 1000 horas, indicando possível lixiviação de espécies solúveis contendo grupos carboxilato. Essa razão apresentou leve aumento para 0,230 em 5000 horas e nova redução para 0,224 após 10000 horas, o que sugere a formação transitória de produtos de degradação com posterior remoção para o meio externo. A área absoluta do pico de COO<sup>-</sup> apresentou queda contínua, de 0,085 para 0,050, confirmando a perda progressiva de grupos carboxílicos para a solução.

Com relação às barras de GFRP protegidas, observa-se na Tabela 63 a redução da razão C=O / anel aromático após 5000 horas de imersão, em relação a referência (0,878 para 0,719). Essa redução está associada à ocorrência de hidrólise, na qual há a quebra das ligações éster da matriz, a qual pode ser corroborada pela redução da área absoluta do pico relativo à ligação C=O, com redução para 0,147 após 5000 horas. Após 5000 horas, pode ser observada a redução da razão COO<sup>-</sup> / anel aromático, de 0,235 na amostra de referência para 0,210, a qual pode ser associada à lixiviação de espécies solúveis contendo grupos carboxilato. Observa-se, também, a redução das áreas absolutas relativas às bandas COO<sup>-</sup> e anel aromático, associada à lixiviação de compostos da matriz para o meio aquoso. Após 10000 horas de imersão observa-se o aumento tanto das razões C=O / anel aromático e COO<sup>-</sup> / anel aromático quanto das áreas absolutas, o qual pode ser atribuído à interrupção da lixiviação de compostos da matriz devido ao tamponamento dos poros do concreto. É interessante destacar que não foi identificada a ocorrência de termo oxidação nas barras protegidas, caracterizada pelo acúmulo de carbonila ao longo da degradação da matriz, tal como identificado nas amostras desprotegidas. Esse fato corrobora a diferença observada na superfície das barras após 10000 horas de imersão, tal como foi apresentado na Figura 107, na qual se observa o amarelamento da superfície das barras desprotegidas, enquanto as barras protegidas conservam coloração próxima à original.

Outra metodologia foi empregada para investigar a ocorrência de hidrólise na matriz polimérica, conforme proposto por Visco, Brancato e Campo (2011). Na Figura 116 e Figura 117 podem também ser identificados os picos de estiramento associados aos grupos CH<sub>2</sub> e CH<sub>3</sub>, (3000-2750 cm<sup>-1</sup>), ao grupo éster (C-O éster, 1340-1190cm<sup>-1</sup>), à carbonila da ligação

éster ( $C=O$ ,  $1790-1650\text{ cm}^{-1}$ ) e ao grupo álcool ( $C-O$  álcool,  $1010-845\text{ cm}^{-1}$ ). A partir dessas bandas, foram calculados os índices de hidrólise, definidos como a razão entre a área dos picos de interesse ( $C-O$  éster,  $C=O$ ,  $C-O$  álcool) e a área da banda  $CH$ , conforme apresentado na Tabela 64. Segundo Visco, Brancato e Campo (2011), a ocorrência de hidrólise resulta na redução dos picos relacionados ao grupo éster e aumento dos picos relacionados ao grupo álcool.

**Tabela 64: Índices de hidrólise para as barras de GFRP de referência e mantidas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas na condição desprotegida e protegida**

Idade / Condição	Área sob a curva				C-O éster / CH	C=O / CH	C-O álcool / CH
	CH	C-O éster	C=O	C-O álcool			
Referência / Desprotegida	0,825	0,406	0,318	1,087	0,492	0,386	1,318
1000 horas / Desprotegida	0,902	0,357	0,249	1,742	0,395	0,276	1,930
5000 horas / Desprotegida	0,554	0,294	0,264	0,696	0,530	0,476	1,255
10000 horas / Desprotegida	0,674	0,262	0,254	0,331	0,389	0,378	0,492
5000 horas / Protegida	0,221	0,137	0,147	2,692	0,618	0,665	12,166
10000 horas / Protegida	0,495	0,429	0,305	2,360	0,867	0,616	4,768

Como pode ser visto na Tabela 64, com relação às amostras desprotegidas, a redução das razões  $C-O$  éster /  $CH$  e  $C=O$  /  $CH$  após 1000 horas de exposição, acompanhada do aumento da razão  $C-O$  álcool /  $CH$ , é indicativa da ocorrência de hidrólise. Após 5000 e 10000 horas de imersão a razão  $C-O$  álcool /  $CH$  passa a diminuir devido às reduções nas áreas absolutas das bandas  $C-O$  álcool e  $CH$ , associadas a lixiviação de fragmentos com terminais alcoólicos e de baixo peso molecular, ou seja, produtos de degradação removidos da matriz após a clivagem das cadeias poliméricas. Como discutido anteriormente, o aumento na razão  $C=O$  /  $CH$  após 5000 horas de imersão pode estar relacionado à ocorrência de termo oxidação, que leva à formação de novos grupos carbonila. De acordo com Galant *et al.* (2010) e Li *et al.* (2013), esse processo pode envolver a oxidação de grupos álcool secundários, sendo acompanhado da redução da banda  $C-O$  característica desses grupos, o que também é observado na Tabela 64 para as idades de 5000 e 10000 horas. Apesar das variações nas razões entre as bandas, o comportamento das áreas absolutas reforça o avanço da degradação da matriz por meio da ocorrência simultânea de reações de hidrólise, termo oxidação e lixiviação de compostos da matriz polimérica.

Para as amostras protegidas é possível observar na Tabela 64 um aumento expressivo na razão  $C-O$  / álcool após 5000 horas de imersão, indicando a acumulação de produtos da reação de hidrólise. Contudo, as razões  $C-O$  éster /  $CH$  e  $C=O$  /  $CH$  também apresentaram aumento após 5000 horas de imersão, o que está associado à redução expressiva na área absoluta relativa à banda  $CH$  devido à lixiviação de compostos da matriz polimérica, interferindo nas razões calculadas. Nota-se que as áreas absolutas relativas às bandas  $C-O$

éster e C=O sofreram redução, caracterizando a quebra das ligações éster devido à progressão da reação de hidrólise. Ao contrário das barras desprotegidas, não foi observada a formação de novos grupos carbonila, o que caracterizaria a ocorrência de termo oxidação. Após 10000 horas de imersão, a lixiviação cessou devido à obstrução dos poros do concreto e a degradação da matriz polimérica estabilizou, sendo observada a redução da acumulação dos produtos de degradação (C-O álcool / CH) e da quebra das ligações da cadeia polimérica (C-O éster e C=O). Os resultados obtidos por essa abordagem se mostraram coerentes com aqueles observados para a razão OH / CH e para as razões envolvendo os grupos C=O, COO<sup>-</sup> e o anel aromático, demonstrando consistência entre as diferentes metodologias empregadas para a caracterização das alterações químicas no compósito.

Essas alterações químicas observadas por FTIR refletem não apenas a natureza das reações de degradação, mas também estão associadas à morfologia interna do compósito. A presença de vazios identificada por MEV, mesmo nas amostras de referência, revela uma microestrutura propensa à absorção de água desde os primeiros estágios de exposição. Essa característica morfológica favoreceu a penetração da solução agressiva no interior da matriz polimérica, intensificando os mecanismos de degradação química identificados por FTIR. El-Hassan e El Maaddawy (2019) reportaram comportamento semelhante, observando menor incremento na razão OH/CH em barras de GFRP com menor teor de vazios, evidenciando a importância da porosidade na aceleração da degradação. Assim, os vazios atuaram como vias preferenciais de transporte de espécies químicas, contribuindo para a evolução simultânea dos processos de hidrólise, termo oxidação e lixiviação. Visco, Brancato e Campo (2011) observaram que a matriz menos compacta avaliada apresentou maior absorção de água e sofreu maior queda em seu desempenho mecânico, uma vez que as moléculas de água entraram com facilidade, hidrolisaram as ligações químicas reativas e extraíram espécies de baixo peso molecular. Gooranorimi *et al.* (2017) analisaram a microestrutura de quatro tipos de barras de GFRP, todas produzidas com matriz de vinil éster por diferentes fabricantes, utilizando MEV. Em todas as amostras foram identificados vazios e defeitos decorrentes do processo de fabricação, sendo que cada barra apresentou um padrão microestrutural distinto. Posteriormente, dois tipos de barra foram imersos em solução alcalina à 60 °C durante 1000 horas, sendo que uma barra apresentou apenas um grande vazio com comprimento de 1,4 mm no centro e o restante da seção sem a presença de vazios, e a segunda barra apresentou defeitos conectados e vazios desconectados em toda a seção transversal. Após o condicionamento, a primeira barra apresentou redução de 1 % na resistência ao cisalhamento horizontal enquanto a segunda apresentou redução de 15 %. Por meio de MEV, esses pesquisadores observaram que a primeira barra não apresentou nenhum dano localizado devido à exposição, enquanto a segunda barra apresentou danos extensos na resina e nas fibras de vidro nas proximidades dos defeitos existentes.

Essa sequência de processos – hidrólise, termo oxidação e lixiviação - comprometeu progressivamente a integridade da matriz polimérica, afetando a transferência de tensões entre a matriz e as fibras, o que se refletiu na redução expressiva das propriedades mecânicas observada ao longo do tempo de exposição. Esses resultados estão em consonância com o comportamento de absorção não Fickiano identificado nas barras de GFRP, o qual, segundo Silva, D’Almeida e Cardoso (2024), é decorrente de modificações estruturais na matriz polimérica provocadas pela ação combinada da umidade e da temperatura. Cabe destacar que, apesar da evidente degradação da matriz, as análises por MEV não indicaram descolamento na interface fibra-matriz nem sinais de deterioração das fibras de vidro. Esse conjunto de evidências reforça que, no caso do compósito avaliado, a perda de desempenho estrutural está relacionada, predominantemente, à degradação química e morfológica da matriz polimérica, e não à integridade das fibras ou da interface.

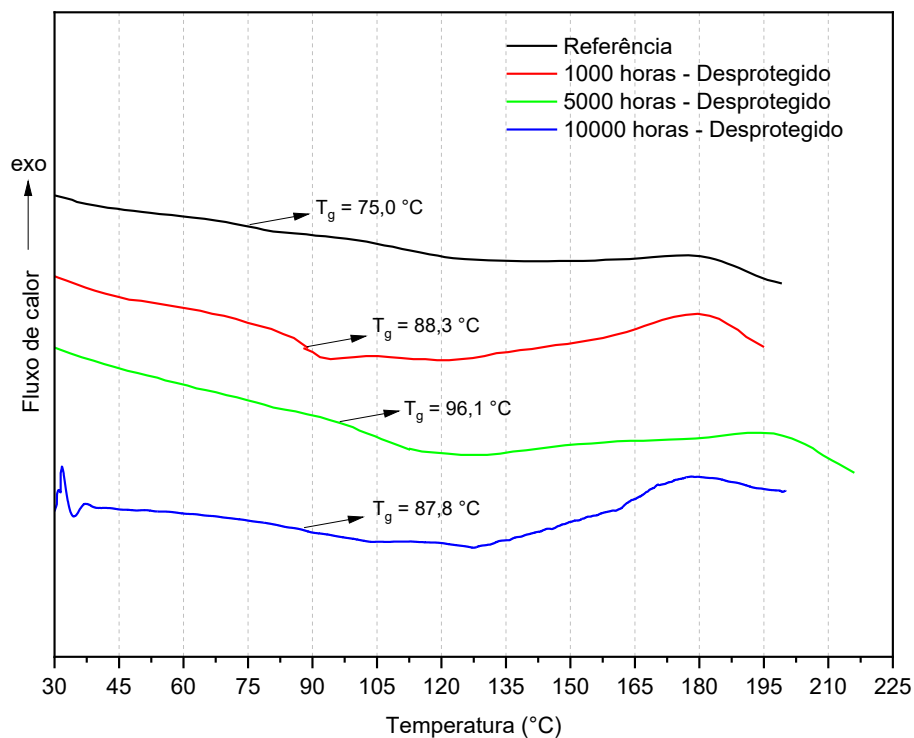
Os resultados obtidos indicaram que o mecanismo de degradação predominante nas barras protegidas foi o mesmo observado nas barras desprotegidas, caracterizado pela hidrólise da matriz polimérica associada à lixiviação de compostos de baixo peso molecular. Contudo, a maior redução nas propriedades mecânicas das barras protegidas está relacionada a intensificação da hidrólise nessa condição. Esse efeito pode ser atribuído à elevada alcalinidade da solução presente nos poros do concreto, que acelera a quebra de ligações químicas na matriz polimérica. Lu *et al.* (2023) investigaram as alterações na resistência de barras de GFRP após 180 dias de imersão em soluções salina e alcalina distintas e observaram que os padrões de degradação das barras foi basicamente o mesmo, mas a resistência à tração das amostras em solução salina reduziu menos do que para as amostras em solução alcalina.

#### **4.4.3.3 DSC**

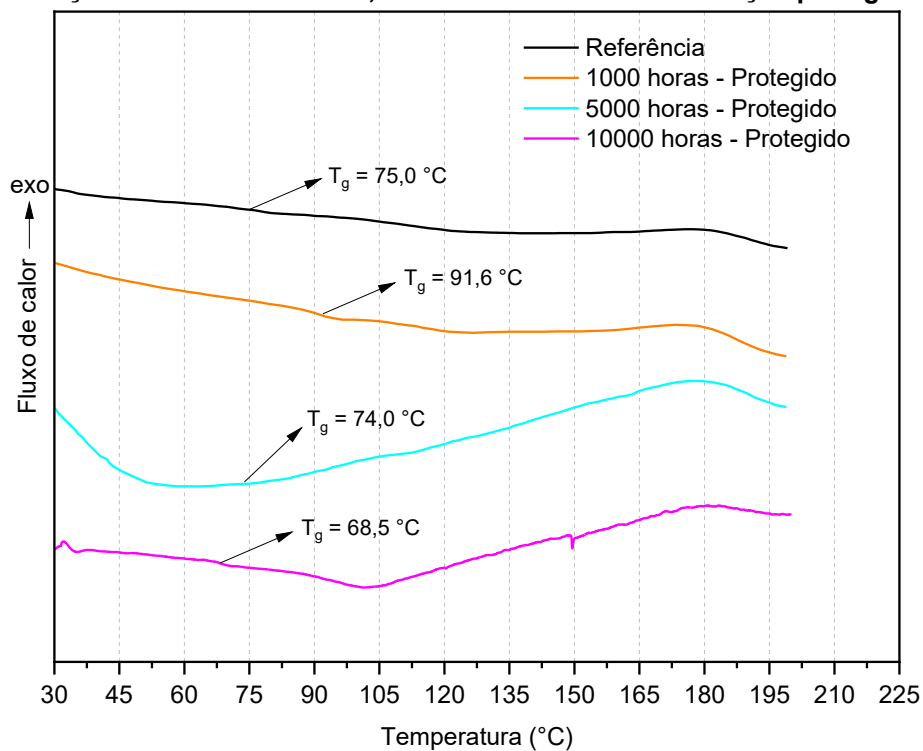
A análise DSC foi empregada para investigar as alterações térmicas na matriz polimérica das barras de GFRP em função do tempo de exposição. A principal ênfase foi dada à variação da  $T_g$ , que reflete mudanças no grau de reticulação da matriz, bem como à identificação de picos exotérmicos residuais, associados à presença de frações ainda reativas ou à ocorrência de pós-cura.

Na Figura 118 e Figura 119 são apresentadas as curvas de fluxo de calor em função da temperatura para as barras de GFRP de referência e imersas em solução salina a 50 °C durante 1000, 5000 e 10000 horas, nas condições desprotegida e protegida, respectivamente. Como pode ser visto na Figura 118 e Figura 119, todas as curvas apresentaram picos exotérmicos residuais, evidenciando a presença de reações de cura não finalizadas na matriz de vinil éster em todas as amostras analisadas.

**Figura 118: Resultados dos ensaios DSC em barras de GFRP de referência e imersas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas na condição desprotegida**



**Figura 119: Resultados dos ensaios DSC em barras de GFRP de referência e imersas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas na condição protegida**



Para as amostras de referência e após 10000 horas de imersão (desprotegida e protegida) foi realizado um segundo aquecimento para avaliar o mecanismo de degradação

das barras de GFRP. A Tabela 65 apresenta a  $T_{g1}$  e a  $T_{g2}$ , relativas ao primeiro e segundo aquecimento, respectivamente, em cada idade e condição de exposição, bem como a variação da  $T_{g1}$  em relação à referência.

**Tabela 65: Temperatura de transição vítrea das barras de GFRP de referência e imersas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas nas condições desprotegida e protegida**

Idade / Condição	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	Varição da $T_{g1}$ (%)
Referência / Desprotegida	75,0	117,2	0,0
1000 horas / Desprotegida	88,3	-	15,1
5000 horas / Desprotegida	96,1	-	22,0
10000 horas / Desprotegida	87,8	109,7	14,6
1000 horas / Protegida	91,6	-	18,1
5000 horas / Protegida	74,0	-	-1,4
10000 horas / Protegida	68,5	94,9	-9,5

Em um ensaio DSC, o primeiro aquecimento é utilizado para determinar as diferenças na  $T_g$  das amostras de referência e condicionadas, indicando a ocorrência de plasticização e/ou degradação química caso uma menor  $T_{g1}$  seja observada nas amostras condicionadas, enquanto o segundo aquecimento permite avaliar o mecanismo de degradação (Robert, Cousin, Benmokrane, 2009; He, Dai, Yang, 2017; Wu *et al.*, 2023). Um aumento na  $T_{g2}$  em relação a  $T_{g1}$  indica a pós-cura da matriz polimérica durante o primeiro aquecimento. Caso a  $T_{g2}$  da amostra condicionada esteja na mesma faixa da amostra de referência, é evidenciada apenas a ocorrência de degradação química reversível, tal como a plasticização. A presença de água absorvida durante o período de condicionamento atua como plastificante e reduz a  $T_{g1}$ , no entanto, quando a água evapora devido ao aquecimento da amostra, o efeito plastificante desaparece (Debaiky *et al.*, 2006). Por outro lado, uma  $T_{g2}$  da amostra condicionada menor que a de referência indica a ocorrência de uma degradação química irreversível, tal como a hidrólise da matriz polimérica, fenômeno no qual as cadeias poliméricas são rompidas.

Com relação às amostras desprotegidas, observa-se na Tabela 65 um aumento progressivo da  $T_{g1}$  até 5000 horas, com posterior redução após 10000 horas de imersão. Esses resultados indicam que até 5000 horas predominou a reticulação da matriz polimérica devido à pós cura. No processo de pós-cura, reticulações são formadas devido aos mecanismos de difusão termo ativados, aumentando tanto a  $T_g$  quanto a rigidez do compósito (Silva, D'Almeida, Cardoso, 2024). Além da pós-cura, a combinação do relaxamento do polímero, à reticulação termo-oxidativa da matriz e à lixiviação de compostos plastificantes (efeito antiplastificante) também contribuem para o aumento da  $T_g$  (Rocha *et al.*, 2017; Ernault, Richaud, Fayolle, 2017; Krauklis, Echtermeyer, 2018). De acordo com Fraga *et al.* (2003), a lixiviação de produtos solúveis produz uma matriz mais rígida. Após 10000 horas, contudo, a

redução da  $T_{g1}$  evidencia a ocorrência de plasticização e degradação química. Embora o valor absoluto da  $T_{g1}$  continue a crescer progressivamente até 5000 horas, a variação percentual entre 1000 e 5000 horas foi menor do que entre a referência e 1000 horas, o que sugere uma redução na taxa de pós-cura. Essa redução pode estar associada a uma tendência de estabilização da pós-cura com o tempo de exposição ou com o avanço da degradação da matriz. Observa-se que a amostra de referência apresentou aumento na  $T_{g2}$  em relação à  $T_{g1}$ , evidenciando a ocorrência de pós cura da matriz polimérica durante o primeiro aquecimento e a cura incompleta da matriz vinil éster durante o processo de fabricação. Outros pesquisadores também registraram esse comportamento (Debaiky *et al.*, 2006; El-Hassan *et al.* 2017; He, Dai, Yang, 2017). Após 10000 horas, foi obtida  $T_{g2}$  inferior à referência, indicando a ocorrência não somente de plasticização, mas de uma degradação química irreversível, corroborando os resultados obtidos por meio dos ensaios FTIR.

Conforme apresentado na Tabela 11, a ABNT NBR 17201-1 (2025) estabelece um valor mínimo de 100 °C para a  $T_g$  de barras de GFRP. Esse valor é superior ao observado nas barras de GFRP de referência deste estudo, cuja  $T_{g1}$  foi de 75,0 °C. Contudo, após o segundo aquecimento a  $T_{g2}$  das amostras de referência foi igual a 117,2 °C, valor superior ao limite normativo, devido à pós cura. Esses resultados reforçam a importância da adoção de procedimentos rigorosos de controle de qualidade, especialmente no que se refere à etapa de cura da matriz, a fim de garantir o desempenho adequado das barras em aplicações estruturais.

Na Tabela 65 também pode ser visto que, após 1000 horas, as barras de GFRP protegidas apresentaram aumento no valor da  $T_{g1}$ , indicando a ocorrência de pós cura durante a imersão a 50 °C. Contudo, após 5000 horas o valor de  $T_{g1}$  passou a decrescer devido à ocorrência de plasticização e degradação química da matriz. A análise dos valores de  $T_{g2}$  permite concluir que a matriz não apresentou apenas plasticização, mas também a degradação química da matriz, uma vez que foi obtida  $T_{g2}$  da amostra imersa durante 10000 horas inferior à da amostra de referência. Essa evidência corrobora os resultados de FTIR anteriormente apresentados, nos quais foi evidenciada a hidrólise da matriz. Nota-se, ainda, que a  $T_{g2}$  da amostra protegida foi inferior à da amostra desprotegida, evidenciando maior degradação. Além disso, as amostras protegidas começaram a exibir queda na  $T_{g1}$  já após 5000 horas, enquanto o mesmo comportamento foi observado nas amostras desprotegidas apenas após 10000 horas. Esses resultados corroboram a maior degradação das propriedades mecânicas obtida para as barras de GFRP protegidas em relação às desprotegidas. De acordo com Wu *et al.* (2023), a plasticização da matriz polimérica é um dos principais micro mecanismos de degradação das propriedades macro mecânicas do compósito. A plasticização induzida pela umidade reduz a  $T_g$  da matriz polimérica, dificultando o comportamento elástico do material e, conseqüentemente, comprometendo sua integridade

(Levine, Slade, 1988; Costa, Almeida, Rezende, 2005). Além de afetar o desempenho mecânico, temperaturas próximas à  $T_g$  causam o aumento do coeficiente de expansão térmica, levando a um inchamento mais proeminente na matriz e aumentando a capacidade de absorção do compósito (Robert *et al.*, 2010; Du Plessix *et al.*, 2015).

Em geral, com base na literatura espera-se que sob ambientes agressivos a longo prazo, as barras de GFRP apresentem plasticização da matriz. Segundo El-Hassan e El Maaddawy (2019) e Wu *et al.* (2023), o incremento da razão OH/CH nas barras de GFRP promoverá a redução do valor de  $T_g$ , indicando que a intensificação da reação de hidrólise afeta diretamente o grau de plasticização. A absorção de água também causa a redução da  $T_g$ , resultando no amolecimento do material e na perda de suas propriedades mecânicas (EUROCOMP, 1996; ISIS, 2006; Mufti *et al.*, 2007; Benmokrane *et al.*, 2017c; El-Hassan, El Maaddawy, 2019). O valor de  $T_g$  decresce significativamente quando a absorção de umidade excede valores entre 1 e 2%, dependendo do tipo de matriz polimérica utilizada na produção das barras, indicando uma certa correlação entre o grau de plasticização da matriz e o grau de hidrólise (El-Hassan, El Maaddawy, 2019). Contudo, a variação na  $T_g$  é resultado do efeito combinado da degradação e da cura da resina, sendo que o envelhecimento reduz a  $T_g$  e a cura aumenta a  $T_g$  (Wu *et al.*, 2022d). Silva, D'Almeida e Cardoso (2024), observaram que, após serem mantidos a 85 °C, compósitos fabricados com fibras de vidro e matriz do tipo epóxi apresentaram um incremento de 61,83 % na  $T_g$ , como resultado da pós-cura. Os autores observaram que o compósito sofreu pós-cura particularmente nos primeiros dias de envelhecimento, exibindo, subseqüentemente, plasticização induzida pela umidade. De modo semelhante, os resultados deste estudo indicaram um aumento inicial da  $T_g$  das barras de GFRP, associado ao processo de pós-cura, seguido por uma redução associada à ocorrência de plasticização e degradação química.

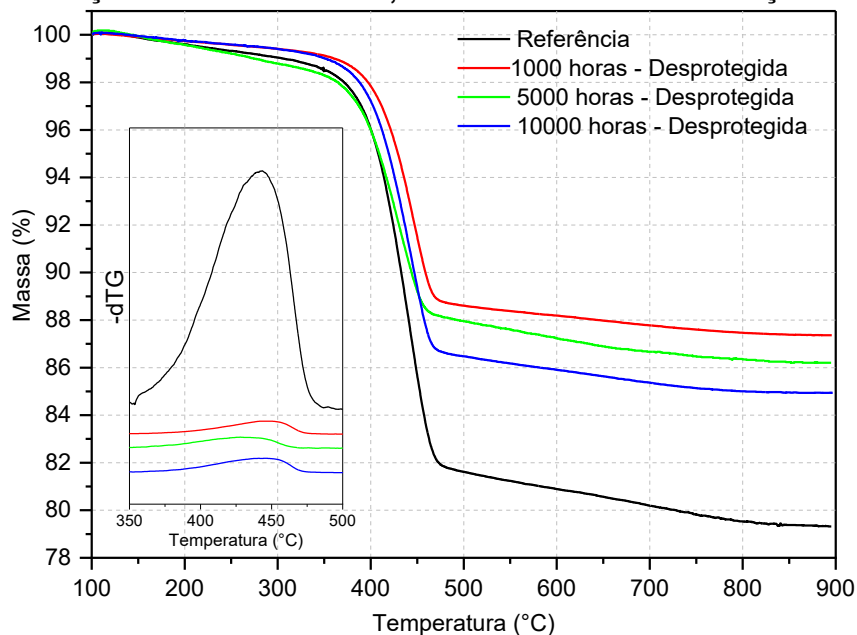
Os resultados obtidos neste estudo corroboram observações feitas por Boinard *et al.* (2000), que avaliaram laminados de GFRP com matriz polimérica do tipo vinil éster e identificaram cura incompleta do polímero, comportamento de absorção de água não Fickiano e lixiviação de monômeros não reagidos. Essa lixiviação criou vazios no compósito, facilitando a entrada de água em excesso e contribuindo para modificações estruturais na matriz. Além disso, os autores relataram um enrijecimento do material ao longo do tempo, fenômeno que pode estar associado à pós-cura térmica induzida durante a exposição prolongada em ambiente úmido – efeito também observado nesse trabalho.

#### **4.4.3.4 TGA**

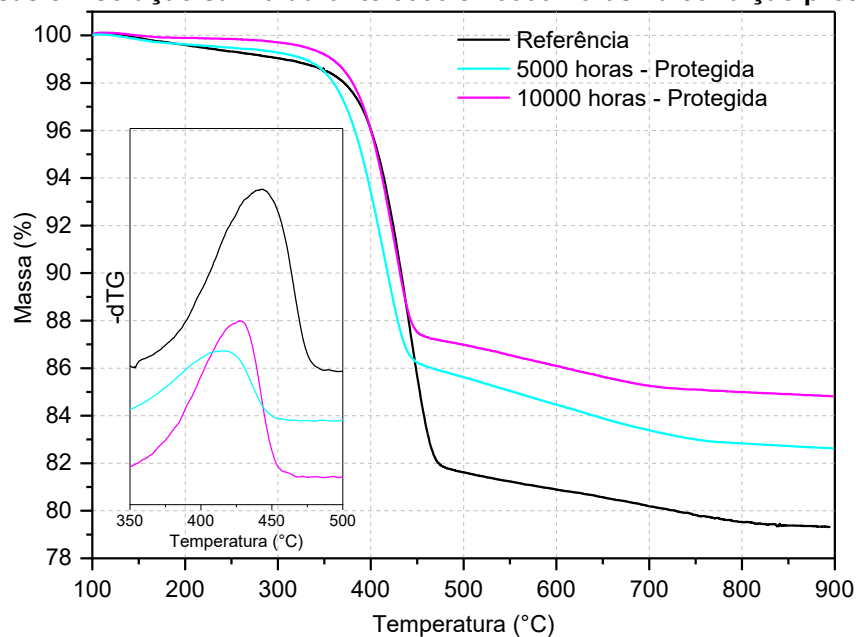
A análise termogravimétrica foi empregada para investigar as alterações térmicas na matriz polimérica das barras de GFRP após diferentes tempos de exposição. Na Figura 120 e Figura 121 são apresentadas as curvas de perda de massa em função da temperatura para

as barras de GFRP de referência e imersas em solução salina a  $50 \pm 3$  °C durante 1000, 5000 e 10000 horas, nas condições desprotegida e protegida, respectivamente. Problemas encontrados com o encaminhamento das amostras para a realização de ensaios microestruturais não permitiram a obtenção das curvas das amostras de GFRP mantidas durante 1000 horas em solução salina na condição protegida.

**Figura 120: Resultados dos ensaios TGA realizados em barras de GFRP de referência e imersas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas na condição desprotegida**



**Figura 121: Resultados dos ensaios TGA realizados em barras de GFRP de referência e imersas em solução salina durante 5000 e 10000 horas na condição protegida**



Como pode ser visto na Figura 120 e Figura 121, todas as curvas apresentaram um perfil similar, com a perda de massa das amostras entre 100 e 900 °C dividida em três faixas, para todas as idades. Na primeira faixa, até 300 °C, observa-se pequena perda de massa associada à perda de água quimicamente adsorvida (até cerca de 100 °C) e ao início do rompimento das cadeias moleculares da matriz polimérica (Borsoi, Zattera, Ferreira, 2016; Moura, Lima, Ribeiro, 2022). Entre 300 e 500 °C observa-se a principal faixa de degradação térmica da matriz polimérica, na qual ocorre a maior perda de massa. Segundo El-Hassan e El Maaddawy (2019) e Moura, Lima e Ribeiro (2022), essa maior perda de massa é atribuída ao rompimento das cadeias moleculares, levando à formação de microfissuras na interface fibra/matriz e na própria matriz e indicando uma perda crítica das propriedades mecânicas do compósito devido a um mecanismo de degradação irreversível. Acima de 500 °C observa-se perda de massa residual associada à presença de componentes inorgânicos com uma temperatura de decomposição mais alta (Moura, Lima, Ribeiro, 2022). A Tabela 66 resume as perdas de massa observadas em cada faixa de temperatura.

**Tabela 66: Perda de massa com o aumento da temperatura das barras de GFRP de referência e mantidas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas nas condições desprotegida e protegida**

Idade / Condição	Perda de massa (%)			
	Até 300 °C	300 - 500 °C	500 - 900 °C	Total
Referência / Desprotegida	0,96	17,43	2,30	20,68
1000 horas / Desprotegida	0,60	10,79	1,25	12,64
5000 horas / Desprotegida	1,21	10,84	1,74	13,79
10000 horas / Desprotegida	0,59	12,92	1,55	15,06
5000 horas / Protegida	0,72	13,66	3,00	17,38
10000 horas / Protegida	0,29	12,73	2,17	15,18

Conforme apresentado na Tabela 66, a perda de massa até 300 °C foi discreta (inferior a 1,5 %) para todas as condições avaliadas, indicando baixa presença de umidade residual e compostos voláteis de baixo ponto de ebulição. A principal etapa de degradação térmica ocorreu entre 300 e 500 °C, faixa correspondente à decomposição da matriz polimérica à base de vinil éster. Nessa faixa, concentrou-se a maior parte da perda de massa, sendo mais expressiva na amostra de referência (17,43 %). Esse comportamento pode ser atribuído à presença de material residual não reagido na matriz, em virtude de uma cura inicial incompleta. Os resultados de DSC indicaram que, ao longo do condicionamento, as amostras passaram por pós-cura, o que aumentou o grau de reticulação da matriz e, conseqüentemente, reduziu a quantidade de material disponível para degradação térmica. Além disso, durante o condicionamento em solução, houve lixiviação de componentes solúveis da matriz, os quais permaneciam presentes nas amostras de referência e contribuíram para a maior perda de massa observada no ensaio TGA.

Com relação às amostras desprotegidas, após 1000 horas de imersão, observou-se a menor perda de massa (10,79 %), sugerindo que frações solúveis e termicamente instáveis da matriz foram previamente degradadas e removidas por lixiviação. Segundo Krauklis e Echtermeyer (2018), esse processo pode ocorrer inicialmente devido à difusão de aditivos, impurezas ou produtos de degradação da matriz polimérica para o ambiente aquoso. Adicionalmente, os resultados de DSC indicaram que a ocorrência de pós-cura nesse estágio, o que contribuiu para o aumento da estabilidade térmica da matriz. A cura adicional promove maior grau de reticulação (Silva *et al.*, 2020), reduzindo a quantidade de frações reativas e voláteis que se decompõe termicamente, o que justifica a menor perda de massa observada nessa faixa de temperatura. A curva derivada (DTG), apresentada na Figura 120, confirmou a presença de um único pico principal de degradação em todas as idades, entre 350 °C e 500 °C. A redução da intensidade desse pico com o tempo de exposição indica uma menor quantidade de material sendo degradado termicamente, enquanto o leve deslocamento para temperaturas superiores está associado à maior estabilidade térmica da matriz, em função do avanço da reticulação. Após 5000 e 10000 horas de imersão, observou-se aumento progressivo na perda de massa (10,84 % e 12,92 %, respectivamente), sugerindo a continuidade da degradação da matriz e uma maior suscetibilidade térmica do material residual. Nos ensaios microestruturais realizados nas amostras desprotegidas foi identificada a atuação simultânea de diferentes mecanismos, como hidrólise, lixiviação, termo oxidação e pós-cura. A termo oxidação, por sua vez, é altamente seletiva e ocorre predominantemente por meio da decomposição das espécies químicas mais instáveis termicamente, sendo essa a principal fonte de radicais livres (Colin, Verdu, 2003; Rasoldier *et al.*, 2008). De acordo com Krauklis e Echtermeyer (2018), esse tipo de reticulação termo-oxidativa também pode provocar um leve aumento na  $T_g$ . Assim, embora a termo oxidação e a pós-cura possam continuar promovendo certo grau de reticulação e contribuir para a estabilidade térmica, a degradação da matriz polimérica avança, gerando estruturas mais suscetíveis à decomposição térmica e resultando em maior perda de massa. Os dados de DSC indicaram que a taxa de pós-cura diminuiu entre 1000 e 5000 horas de imersão, limitando o avanço da reticulação. Além disso, a redução da  $T_g$  após 10000 horas sugere o predomínio de mecanismos de plasticização e hidrólise, conferindo à matriz uma estrutura menos estável e mais vulnerável à degradação. Apesar disso, o valor de  $T_g$  após 10000 horas ainda se manteve superior ao da amostra de referência, o que justifica o deslocamento do pico na DTG para temperaturas ligeiramente superiores, indicando maior estabilidade térmica relativa.

Assim como observado para as barras desprotegidas, a Tabela 66 revela uma redução na perda de massa das amostras protegidas na faixa de 300 a 500 °C após 5000 horas de imersão. Os resultados de DSC indicaram a ocorrência de pós-cura após 1000 horas, enquanto os dados de FTIR evidenciaram a lixiviação de compostos de baixo peso molecular

da matriz. Esses fenômenos contribuíram para o aumento da estabilidade térmica e, conseqüentemente, para a menor degradação térmica da matriz polimérica nessa faixa. Por esse motivo, nota-se na Figura 121 a redução do pico da DTG em comparação à amostra de referência. Contudo, após 5000 horas, a  $T_g$  observada foi inferior à da amostra de referência, indicando uma estrutura polimérica menos reticulada e mais suscetível à degradação, o que justifica o deslocamento do pico da DTG para temperaturas ligeiramente inferiores. Após 10000 horas de imersão, a perda de massa continuou a reduzir, no entanto, de forma menos expressiva, o que pode estar associado à estagnação dos mecanismos de degradação em função do tamponamento dos poros de concreto pela formação de sal de Friedel, conforme indicado pelos resultados dos ensaios mecânicos. Esse fenômeno contribuiu para a restrição da lixiviação de compostos solúveis da matriz, levando ao seu acúmulo. Assim, uma maior quantidade de material residual permaneceu disponível para decomposição térmica durante o ensaio, o que explica o aumento da intensidade do pico na DTG. Ademais, o ensaio de DSC apontou nova redução  $T_g$  após 10000 horas de imersão, reduzindo a estabilidade térmica da matriz e contribuindo para o deslocamento do pico da DTG para temperaturas levemente inferiores.

Comparando-se a perda de massa das amostras desprotegidas e protegidas após 5000 horas de imersão, observa-se que as barras protegidas apresentaram maior perda de massa total (17,38 %) em relação às desprotegidas (13,79 %). Esse resultado está alinhado com a maior redução das propriedades mecânica obtida nas amostras protegidas, indicando uma degradação mais pronunciada da matriz polimérica, intensificada pela alcalinidade do concreto circundante. Apesar de particularidades no comportamento térmico e químico entre as condições, o principal mecanismo de degradação identificado para ambas foi a hidrólise da matriz. De acordo com Wang *et al.* (2024), o pH elevado desempenha um papel determinante na deterioração da resina polimérica, promovendo com maior intensidade a quebra hidrolítica das ligações químicas da matriz do GFRP.

A análise integrada dos dados de TGA com os teores de fibras, que permaneceram constantes em torno de 82 %, permite atribuir as variações na perda de massa exclusivamente à matriz polimérica. A ausência de alterações significativas no teor de fibras, bem como a inexistência de delaminação ou danos visíveis na interface matriz-reforço, conforme verificado nas análises morfológicas por MEV, reforça que a degradação esteve confinada à matriz, sem comprometimento estrutural das fibras de vidro.

# 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à utilização relativamente recente do FRP como armadura em estruturas de concreto, especialmente no Brasil, ainda há uma disponibilidade limitada de estudos sobre sua durabilidade a longo prazo. Para garantir um desempenho satisfatório, é essencial compreender previamente as vulnerabilidades do material antes de sua aplicação. Como os ensaios baseados na degradação natural do FRP podem levar vários anos para fornecer resultados conclusivos, ensaios de degradação acelerada surgem como uma alternativa viável para antecipar seu desempenho ao longo do tempo. O ACI 440.9R (2015) apresenta protocolos específicos para o acondicionamento acelerado de amostras de FRP, que, quando combinados com ensaios mecânicos, permitem avaliar a durabilidade do material em diferentes períodos de exposição e condições ambientais pré-definidas. No entanto, esses protocolos foram desenvolvidos, a princípio, para serem aplicados em amostras isoladas de FRP, sem considerar sua interação com o concreto circundante. Diante disso, este trabalho propôs a aplicação desses protocolos em vigas de concreto armado com barras de aço e de GFRP em escala real, com o objetivo principal de avaliar a durabilidade das vigas.

Sabendo que a penetração de íons cloreto em estruturas de concreto armado é uma das principais responsáveis pela corrosão das armaduras de aço convencional, o protocolo de acondicionamento acelerado do ACI 440.9R (2015), originalmente baseado na imersão de amostras de FRP em água, foi adaptado para a imersão de vigas de concreto com armadura de GFRP em solução de NaCl. Essa adaptação teve como objetivo avaliar a durabilidade do elemento estrutural com base em seu comportamento mecânico ao longo do tempo. Este estudo, uma ampliação da pesquisa de mestrado da autora (Mazzú, 2020), investiga a exposição de vigas de concreto armado com barras de aço e de GFRP a um ambiente laboratorial e à solução salina por períodos de 5000 e 10000 horas. Além disso, barras de GFRP, tanto desprotegidas quanto protegidas por uma camada de concreto, foram submetidas às mesmas condições das vigas e posteriormente avaliadas por meio de ensaios mecânicos e microestruturais, com o intuito de analisar sua durabilidade e os mecanismos de degradação.

## 5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho foi dividido em três etapas, sendo uma etapa de análise teórica e duas etapas de análise experimental.

Na primeira etapa foram estudados e aplicados os modelos de dimensionamento de vigas de concreto com armadura de GFRP apresentados pelas normas ACI 440.11 (2022),

FIB *Bulletin* 40 (2007), SP 295.1325800 (2017), CAN CSA S806 (2012) e ABNT NBR 17196 (2025), comparando os resultados obtidos aos resultados experimentais obtidos por Mazzú (2020). Desta forma, apresentam-se as conclusões da etapa de análise teórica:

- Os resultados teóricos obtidos sem a aplicação coeficientes de redução da resistência dos materiais ou da capacidade resistente apresentam menor discrepância em relação aos resultados experimentais, se comparados aos resultados teóricos que consideram tais coeficientes. Entretanto, mesmo sem a aplicação dos coeficientes de redução, os valores teóricos ainda se mantêm inferiores aos experimentais, evidenciando a segurança de todos os modelos aplicados;
- Ao considerar os coeficientes de redução, a norma mais conservadora é o ACI 440.11 (2022), apresentando uma diferença da ordem de 50 % em relação aos resultados experimentais, enquanto as demais normas exibem diferenças entre 30 % e 40 %;
- As normas ACI 440.11 (2022), SP 295.1325800 (2017) e ABNT NBR 17196 (2025) consideram a exposição ambiental de forma mais geral. Em contraste, o FIB Bulletin 40 (2007) apresenta uma metodologia mais detalhada, levando em conta fatores como umidade, temperatura e vida útil. Já a norma CAN CSA S806 (2012) não considera a exposição ambiental;
- Caso o modo de ruína determinado seja baseado no esmagamento do concreto, a metodologia utilizada para a consideração da exposição ambiental não impacta os resultados. Isso ocorre porque, nesse caso, a resistência à tração da barra de GFRP, a qual é reduzida pela exposição ambiental, não é utilizada no cálculo da capacidade resistente do elemento estrutural;
- Caso o modo de ruína determinado seja baseado na ruptura da barra de GFRP, a metodologia utilizada para a consideração da exposição ambiental influencia diretamente na capacidade resistente, tendo em vista que as propriedades mecânicas da barra são utilizadas para o cálculo da capacidade resistente do elemento estrutural.

Com relação à primeira etapa experimental, a qual teve como objetivo principal avaliar a durabilidade de vigas de concreto armadas com barras de aço e de GFRP, em escala real, por meio da aplicação do protocolo de acondicionamento acelerado do ACI 440.9R (2015), considerando-se a imersão em solução salina, destacam-se as seguintes conclusões:

- As vigas de concreto com armadura de aço apresentaram curvas tri lineares de forças *versus* deslocamento, com formação de patamar relativo ao escoamento da armadura. Já as vigas de concreto com armadura de GFRP apresentaram curvas tri lineares de força *versus* deslocamento, com comportamento aproximadamente linear até a ruptura;

- Em relação às vigas com armadura de aço, as vigas com armadura de GFRP apresentaram deslocamentos três vezes maiores para um mesmo nível de força aplicada, fissuras com maior comprimento e abertura, e rigidez pós-fissuração 71 % e 73 % inferior para as vigas mantidas em ambiente laboratorial e imersas em solução salina, respectivamente, devido ao menor módulo de elasticidade do GFRP;
- Em relação às vigas com armadura de aço, as vigas com armadura de GFRP apresentaram capacidade resistente 34 % e 36 % superior, considerando-se a exposição a ambiente laboratorial durante 5000 e 10000 horas, respectivamente, bem como 14 % e 30 % superior, considerando-se a imersão em solução salina durante 5000 e 10000 horas, respectivamente;
- As vigas com armadura de GFRP apresentam modo de ruína baseado no esmagamento do concreto com posterior ruptura da barra, enquanto as vigas com armadura de aço apresentam modo de ruína baseado no escoamento do aço com posterior esmagamento do concreto;
- Apesar da barra de GFRP apresentar ruptura frágil, as vigas com armadura de GFRP apresentaram certa ductilidade, em virtude do desenvolvimento do comportamento plástico do concreto após o início do esmagamento. No entanto, essa ductilidade é entre 70 e 80 % inferior à observada nas vigas com armadura de aço;
- Não foram observadas alterações no comportamento mecânico das vigas com armadura de aço em função da imersão em solução salina durante 5000 horas. Apenas uma das vigas com armadura de aço imersa durante 10000 horas apresentou a ruptura da armadura longitudinal devido à corrosão. Entretanto, atribui-se tal comportamento ao período de fechamento dos laboratórios em virtude da pandemia de COVID-19, no qual houve a flutuação do nível de solução salina pela dificuldade de acesso para manutenção, propiciando o ingresso do oxigênio necessário para desencadear o processo corrosivo;
- O protocolo de acondicionamento acelerado do ACI 440.9R (2015) modificado para imersão de vigas em solução salina não foi eficiente para acelerar a degradação das vigas com armadura de aço, uma vez que o comportamento das vigas mantidas em ambiente laboratorial e em solução salina foi similar. Tal fato se deve à submersão das vigas na solução, não havendo o oxigênio necessário para que haja corrosão das armaduras de aço;
- Em relação às vigas de referência ensaiadas por Mazzú (2020), após 5000 horas de imersão em solução salina as vigas com armadura de GFRP apresentaram reduções de 12 % e 13 % na capacidade resistente e na rigidez, respectivamente. Contudo, as vigas com armadura de GFRP imersas em solução salina durante 10000 horas

apresentaram capacidade resistente e rigidez similares às vigas de referência, uma vez que não foram ensaiadas em condições análogas às anteriores em função do fechamento dos laboratórios devido à COVID-19. Esses ensaios foram realizados 302 dias após a finalização do ciclo de 10000 horas de imersão, podendo ter impactado o comportamento mecânico das vigas;

- O protocolo de acondicionamento acelerado do ACI 440.9R (2015) modificado para imersão de vigas de concreto em solução salina foi eficiente para acelerar a degradação das vigas com armadura de GFRP, uma vez que foram observadas reduções na capacidade resistente e rigidez das vigas com armadura de GFRP imersas durante 5000 horas;
- Os modelos normativos do ACI 318 (2019), ABNT NBR 6118 (2023) para vigas com armadura de aço e do ACI 440.11 (2022) e ABNT NBR 17196 (2025) para vigas com armadura de GFRP previram com acerto o modo de ruptura experimental e forneceram capacidade resistente teórica inferior à experimental mesmo sem a aplicação dos coeficientes de redução, com os modelos americanos sendo mais conservadores do que os brasileiros.

Com relação à segunda etapa experimental, a qual teve como objetivo avaliar a durabilidade e os mecanismos de degradação das barras de GFRP imersas em solução salina durante 1000, 5000 e 10000 horas, na condição desprotegida e protegida por concreto, foram obtidas as seguintes conclusões:

- As barras de GFRP utilizadas nesta etapa (segundo lote) foram adquiridas do mesmo fabricante das barras de GFRP utilizadas na primeira etapa experimental (primeiro lote). Contudo, observou-se a presença de falhas de fabricação no segundo lote, como irregularidades superficiais, presença de vazios internos e má impregnação das fibras;
- As falhas de produção resultaram em menor densidade, menores propriedades mecânicas (resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação última à tração) e maior absorção de água nas barras do segundo lote, mesmo apresentando maior diâmetro efetivo e teor de fibras em comparação ao primeiro lote;
- As barras de GFRP apresentaram comportamento elástico-linear até a ruptura, ruptura frágil, e redução na resistência à tração com a imersão em solução salina. As barras desprotegidas sofreram reduções de 13,07 %, 38,07 % e 47,85 % na resistência à tração, enquanto as barras protegidas sofreram reduções de 38,76 %, 63,30 % e 62,99 % após 1000, 5000 e 10000 horas imersão, respectivamente, em relação à referência. Não foram observadas variações significativas no módulo de elasticidade das barras com o acondicionamento acelerado;
- As barras protegidas apresentaram estabilização da resistência à tração entre 5000 e 10000 horas de imersão, possivelmente devido ao impedimento da penetração da

solução salina pelo acúmulo de sal de Friedel, formado por reações entre os íons cloreto presentes na solução e o aluminato tricálcico no cimento, tamponando os poros do concreto e mitigando a degradação do compósito;

- As maiores reduções de resistência à tração nas barras protegidas, em comparação às desprotegidas, foram atribuídas à alcalinidade do concreto, reconhecida como o principal fator de degradação da matriz polimérica do GFRP;
- As barras do segundo lote apresentaram elevada absorção de água, atingindo 1,04 % após 24 horas e 5,92 % após 2520 horas de imersão. As curvas de absorção revelaram comportamento inicialmente Fickiano, com regime de difusão linear, seguido por instabilidade caracterizada por oscilações de massa antes da saturação, indicando transição para difusão não Fickiana, associada a alterações estruturais na matriz;
- Não foram observadas variações no teor de fibras ao longo da imersão, o que foi corroborado pelas análises morfológicas por MEV, nas quais também não se verificaram danos aparentes nas fibras ou delaminação na interface fibra/matriz;
- As micrografias obtidas por MEV confirmaram a presença de vazios na seção transversal das barras e a má impregnação das fibras, aspectos que comprometem a durabilidade e a transferência de tensões no compósito;
- Os ensaios de FTIR identificaram a ocorrência de hidrólise na matriz, acompanhada por lixiviação de compostos de baixo peso molecular. Nas amostras desprotegidas, observou-se ainda evidência de termo oxidação, indicada pelo amarelamento da matriz. Embora o mecanismo predominante de degradação tenha sido o mesmo em ambas as condições (hidrólise), este se manifestou com maior intensidade nas amostras protegidas, devido à influência da alcalinidade do concreto;
- Os resultados de DSC indicaram a ocorrência de pós-cura durante a imersão a 50 °C, com aumento inicial da  $T_g$ . Com o avanço da degradação, a  $T_g$  foi reduzida nas barras desprotegidas e protegidas, devido à plasticização e à hidrólise da matriz. Os valores de  $T_g$  obtidos no segundo aquecimento confirmaram a ocorrência de degradação química irreversível;
- As análises de TGA revelaram que as amostras condicionadas apresentaram menor perda de massa em relação à referência, como resultado da lixiviação de frações solúveis e do aumento da estabilidade térmica promovido pela pós-cura. No entanto, nas barras desprotegidas, a perda de massa aumentou após longos períodos de imersão, evidenciando o avanço da degradação. Nas amostras protegidas, o acúmulo de sal de Friedel dificultou a lixiviação e limitou a progressão da degradação, reduzindo a perda de massa;

- Os ensaios microestruturais demonstraram que a degradação das propriedades mecânicas está associada à deterioração da matriz polimérica, sendo mais pronunciada nas amostras protegidas.

Nesse trabalho, observou-se a existência de variações nas características físico-químicas de barras de GFRP produzidas em lotes distintos por um mesmo fabricante, as quais impactaram diretamente nas propriedades mecânicas e na durabilidade das barras. Verificou-se que a durabilidade das vigas de concreto armadas com barras de GFRP imersas em solução salina foi superior à durabilidade das barras de GFRP diretamente imersas ou imersas quando embebidas no concreto, sob as mesmas condições de exposição. Contudo, devido às diferenças entre os dois lotes de barras de GFRP analisados, não foi possível estabelecer comparações diretas entre as diferentes formas de exposição. A recente publicação das normas brasileiras para caracterização das barras de FRP (ABNT NBR 17201 – partes 1 a 12, 2025) tende a contribuir positivamente para esse cenário, promovendo melhorias no processo produtivo e no controle de qualidade. Este é um dos primeiros estudos realizados no Brasil a abordar a durabilidade tanto de vigas de concreto armadas com barras de GFRP quanto das próprias barras. Espera-se, portanto, que os resultados aqui apresentados contribuam de forma significativa para o avanço do conhecimento sobre o material fabricado pela indústria nacional.

## 5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Nesse trabalho foi observada uma expressiva variabilidade nas características de barras de GFRP produzidas em lotes diferentes de um mesmo fabricante. Além disso, parâmetros de fabricação como a velocidade de tração e a temperatura de cura levam a padrões microestruturais diversos nas barras de FRP, incluindo a presença de vazios e defeitos em regiões da seção transversal do material, resultando em um padrão único para cada barra de GFRP (Gooranorimi *et al.*, 2017). Diante dos resultados obtidos e das limitações associadas à variabilidade entre lotes, recomenda-se que estudos futuros se concentrem em uma investigação sistemática das barras de GFRP produzidas por diferentes fabricantes da indústria nacional. Propõe-se a realização de uma ampla campanha experimental, com amostragem representativa de diferentes lotes de múltiplos fabricantes, de modo a caracterizar estatisticamente as propriedades físico-químicas e mecânicas do material. A construção de curvas de distribuição normal (Gauss) permitirá avaliar a dispersão dos dados e estimar os desvios padrões associados a cada propriedade, contribuindo para a compreensão da variabilidade do material produzido no Brasil. Esses dados são fundamentais para o estabelecimento de limites de aceitação, melhoria do controle de qualidade e aumento da confiabilidade no uso estrutural das barras de GFRP.

Considerando as diferenças entre ambientes experimentais acelerados e as condições reais de serviço, como destacado por Duo *et al.* (2021), sugere-se que estudos futuros se dediquem à correlação entre os mecanismos de degradação observados em ensaios acelerados e aqueles que ocorrem em exposições naturais de longo prazo. A utilização de barras de GFRP revestidas com concreto ou argamassa nesses ensaios são uma alternativa para simular de forma mais realista o comportamento de estruturas em serviço. Também se recomenda a correlação entre os níveis de degradação observados em barras isoladas e em vigas de concreto armado com GFRP, considerando que os ensaios em barras são de execução mais simples e rápida. Para garantir maior confiabilidade nos resultados e permitir análises comparativas consistentes, é fundamental que programas experimentais semelhantes ao desenvolvido neste trabalho sejam realizados utilizando barras de um mesmo lote, minimizando os efeitos de variabilidade de fabricação.

Complementarmente, destaca-se a importância de monitorar estruturas de concreto já existentes, especialmente à medida que a aplicação de barras de GFRP tende a crescer no Brasil, com a recente publicação de norma brasileira específica para o projeto de estruturas com armadura de FRP (ABNT NBR 17196, 2025). A realização de monitoramento climático e avaliações periódicas dessas estruturas permitirá uma melhor compreensão do comportamento do material em condições reais, proporcionando dados valiosos para validar os resultados obtidos em ensaios acelerados e para o aprimoramento de parâmetros normativos adequados à realidade brasileira.

Pode-se destacar, também, a realização de estudo experimental que compare o desempenho das barras de GFRP em concreto produzido com cimento de baixa alcalinidade, em comparação com o cimento tradicional. A utilização de cimentos com diferentes características químicas pode impactar diretamente na durabilidade e no comportamento das barras de GFRP, oferecendo dados adicionais para o aprimoramento do uso do material em diferentes tipos de estruturas.

O desenvolvimento deste trabalho foi impactado por dificuldades resultantes da pandemia de COVID-19, que ocasionaram o fechamento dos laboratórios, prejudicando a execução dos ensaios das vigas de concreto armado dentro do cronograma inicialmente estabelecido. Embora o programa experimental tenha sofrido interferências, foi possível observar a degradação das vigas com armadura de GFRP, confirmando que o protocolo de acondicionamento acelerado aplicado pode ser utilizado para a análise da durabilidade do elemento estrutural. No entanto, para ampliar e consolidar os resultados obtidos, é necessário um estudo mais aprofundado, com maior controle experimental e condições de ensaio mais rigorosas. Isso permitirá a expansão do protocolo para fornecer dados mais confiáveis e

representativos do desempenho das vigas de concreto armado com barras de GFRP em situações reais de serviço.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELKARIM, O. I.; AHMED, E. A.; MOHAMED, H. M.; BENMOKRANE, B. (2019). Flexural strength and serviceability evaluation of concrete beams reinforced with deformed GFRP bars. *Engineering Structures*, v. 186, p. 282-296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.02.024>
- ABEYSINGHE, H. P.; EDWARDS, W.; PRITCHARD, G.; SWAMPILLAI, G. J. (1982). Degradation of crosslinked resins in water and electrolyte solutions. *Polymer*, v. 23, n. 12, p. 1785-1790. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(82\)90123-9](https://doi.org/10.1016/0032-3861(82)90123-9)
- ACCORNERO, F.; CAFARELLI, R.; CARPINTERI, A.; NANNI, A. (2023). Scale effects in GFRP-bar reinforced concrete beams. *Structural Concrete*, v. 24, n. 2, p. 2817-2826. <https://doi.org/10.1002/suco.202200676>
- AFGC. Recommendations for the use of FRP (Fibre Reinforced Polymer) rebars for reinforced concrete structures. 2023.
- ALKHRAISHA, H.; ABED, F. (2023). Impact of exposing GFRP bars to humid environments on the behavior of GFRP RC beams. *Materials Today: Proceedings*. No prelo. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.071>
- ALLEN, N. S.; ROBINSON, P. J.; WHITE, N. J.; SWALES, D. W. (1987). Photo-oxidative stability of electron beam and UV cured acrylated epoxy and urethane acrylate resin films. *Polymer Degradation and Stability*, v. 19, n. 2, p. 147-160. [https://doi.org/10.1016/0141-3910\(87\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0141-3910(87)90073-5)
- ALMUSALLAM, T. H.; AL-SALLOUM, Y. A. (2006). Durability of GFRP rebars in concrete beams under sustained loads at severe environments. *Journal of Composite Materials*, v. 40, n. 7, p. 623-637. <https://doi.org/10.1177/0021998305055275>
- ALMUSALLAM, T. H.; AL-SALLOUM, Y. A.; ALSAYED, S. H.; EL-GAMAL, S.; AQEL, M. (2012). Tensile properties degradation of glass fiber-reinforced polymer bars embedded in concrete under severe laboratory and field environmental conditions. *Journal of Composite Materials*, v. 47, n. 4, p. 393-407. <https://doi.org/10.1177/0021998312440473>
- ALONSO, C.; ANDRADE, C.; RODRIGUEZ, J.; DIEZ, J. M. (1998). Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion. *Materials and Structures*, v. 31, p. 435-441. <https://doi.org/10.1007/BF02480466>
- ALSAYED, S. H.; AL-SALLOUM, Y. A.; ALMUSALLAM, T. H. (2000). Performance of glass fiber reinforced plastic bars as reinforcing material for concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, v. 31, n. 6-7 p. 555-567. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(99\)00049-9](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(99)00049-9)
- ALTALMAS, A.; EL REFAI, A.; ABED, F. (2015). Bond degradation of basalt fiber-reinforced Polymer (BFRP) bars exposed to accelerated aging conditions. *Construction and Building Materials*, v. 81, p. 162-171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.036>
- ALWIS, K.; BURGOYNE, C. J. (2006). Time-Temperature Superposition to Determine the Stress-Rupture of Aramid Fibres. *Applied Composite Materials*, v. 13, p. 249-264. <https://doi.org/10.1007/s10443-006-9017-8>
- AL-HAMMOUD, R.; SOUDKI, K.; TOPPER, T. H. (2010). Bond analysis of corroded reinforced concrete beams under monotonic and fatigue loads. *Cement and Concrete Composites*, v. 32, n. 3, p. 194-203. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.12.001>

AL-KHAFAJI, A. F.; HALUZA, R. T.; BENZECRY, V.; MYERS, J. J.; BAKIS, C. E.; NANNI, A. (2021). Durability assessment of 15- to 20-year-old GFRP bars extracted from bridges in the US. II: GFRP bar assessment. *Journal of Composites for Construction*, v. 25, n. 2. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001112](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001112)

AL-SALLOUM, Y. A.; EL-GAMAL, S.; ALMUSALLAM, T. H.; ALSAYED, S. H.; AQEL, M. (2013). Effect of harsh environmental conditions on the tensile properties of GFRP bars. *Composites Part B: Engineering*, v. 45, n. 1, p. 835-844. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.004>

AL-ZAHRANI, M. M. (2024). Durability of concrete-embedded GFRP bars after 20 years of tidal zone exposure: Correlation with accelerated aging tests. *Case Studies in Construction Materials*, v. 21, e03435. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03435>

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318 - Building code requirements for reinforced concrete. Detroit, USA. 2019.

\_\_\_\_\_. ACI COMMITTEE 440. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. 2008.

\_\_\_\_\_. ACI COMMITTEE 440.R. Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. 2007.

\_\_\_\_\_. ACI COMMITTEE 440.1R. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. 2015.

\_\_\_\_\_. ACI COMMITTEE 440.9R. Guide to Accelerated Conditioning Protocols for Durability Assessment of Internal and External Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement. 2015.

\_\_\_\_\_. ACI COMMITTEE 440.6M. Specification for Carbon and Glass Fiber Reinforced Polymer Bar Materials for Concrete Reinforcement. 2017.

\_\_\_\_\_. ACI COMMITTEE 440.11. Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars – Code and Commentary. 2022

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D7205/D7205M: Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars. West Conshohocken, 2016.

\_\_\_\_\_. ASTM D570: Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. West Conshohocken, 2018.

\_\_\_\_\_. ASTM D7705/D7705M: Standard Test Method of Alkali Resistance of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Matrix Composite Bars used in Concrete Construction. West Conshohocken, 2019.

AMRAN, Y. H. M.; ALYOUSEF, R.; RASHID, R. S. M.; ALABDULJABBAR, H.; HUNG, C. C. (2018). Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: A review. *Structures*, v. 16, p. 208-238 <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.09.008>

ARABI, N.; MOLEZ, L.; RANGEARD, D. (2018). Durability of alkali-resistant glass fibers reinforced cement composite: Microstructural observations of degradation. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, v. 62, n. 3. <https://doi.org/10.3311/PPci.10631>

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

ASHBEE, K. H. G.; FRANK, F. C.; WYATT, R. C. (1967). Water damage in polyester resins. *Proceedings of the Royal Society A*, v. 300, n. 1463, p. 415-419. <https://doi.org/10.1098/rspa.1967.0179>

ASHBEE, K. H. G.; WYATT, R. C. (1969). Water damage in glass fibre/resin composites. *Proceedings of the Royal Society A*, v. 312, n. 1511, p. 553-564. <https://doi.org/10.1098/rspa.1969.0175>

ASHRAFI, H.; BAZLI, M.; NAJAFABADI, E. P.; OSKOU EI, A. V. (2017). The effect of mechanical and thermal properties of FRP bars on their tensile performance under elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, v. 157, p. 1001 – 1010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.160>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 15575-1: Edificações Habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo de deformação e diagrama tensão-deformação – Método de ensaio. São Paulo, 2017.

\_\_\_\_\_. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. NBR 6892-1: Materiais metálicos – Ensaio de tração, Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

\_\_\_\_\_. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2023.

\_\_\_\_\_. NBR 17201-1: Barras de polímero reforçado com fibras (FRP) destinadas a armaduras para estruturas de concreto armado. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2025.

\_\_\_\_\_. NBR 17201-2: Barras de polímero reforçado com fibras (FRP) destinadas a armaduras para estruturas de concreto armado. Parte 2: Determinação do diâmetro efetivo. Rio de Janeiro, 2025.

\_\_\_\_\_. NBR 17201-3: Barras de polímero reforçado com fibras (FRP) destinadas a armaduras para estruturas de concreto armado. Parte 3: Determinação da resistência à tração e do módulo de elasticidade. Rio de Janeiro, 2025.

\_\_\_\_\_. NBR 17201-4: Barras de polímero reforçado com fibras (FRP) destinadas a armaduras para estruturas de concreto armado. Parte 4: Determinação da resistência ao cisalhamento. Rio de Janeiro, 2025.

\_\_\_\_\_. NBR 17201-5: Barras de polímero reforçado com fibras (FRP) destinadas a armaduras para estruturas de concreto armado. Parte 5: Determinação da resistência ao cisalhamento horizontal aparente pelo método de viga curta. Rio de Janeiro, 2025.

\_\_\_\_\_. NBR 17201-6: Barras de polímero reforçado com fibras (FRP) destinadas a armaduras para estruturas de concreto armado. Parte 6: Determinação da resistência de aderência das barras de FRP ao concreto. Rio de Janeiro, 2025.

\_\_\_\_\_. NBR 17201-7: Barras de polímero reforçado com fibras (FRP) destinadas a armaduras para estruturas de concreto armado. Parte 7: Determinação da resistência à tração em regiões de dobra. Rio de Janeiro, 2025.

\_\_\_\_\_. NBR 17201-8: Barras de polímero reforçado com fibras (FRP) destinadas a armaduras para estruturas de concreto armado. Parte 8: Determinação da temperatura de transição vítrea. Rio de Janeiro, 2025.

\_\_\_\_\_. NBR 17201-9: Barras de polímero reforçado com fibras (FRP) destinadas a armaduras para estruturas de concreto armado. Parte 9: Determinação do calor de reação de materiais termicamente reativos por DSC (grau de cura). Rio de Janeiro, 2025.

\_\_\_\_\_. NBR 17201-10: Barras de polímero reforçado com fibras (FRP) destinadas a armaduras para estruturas de concreto armado. Parte 10: Determinação do teor de fibra pelo método de combustão e do teor de aditivo mineral pelo método de ataque por ácido. Rio de Janeiro, 2025.

\_\_\_\_\_. NBR 17201-11: Barras de polímero reforçado com fibras (FRP) destinadas a armaduras para estruturas de concreto armado. Parte 11: Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2025.

\_\_\_\_\_. NBR 17201-12: Barras de polímero reforçado com fibras (FRP) destinadas a armaduras para estruturas de concreto armado. Parte 12: Determinação da redução da resistência à tração e da resistência de aderência ao concreto após a exposição ao meio alcalino. Rio de Janeiro, 2025.

\_\_\_\_\_. NBR 17196: Projeto de estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras (FRP). Rio de Janeiro, 2025.

BAENA, M.; TORRES, L.; TURON, A.; BARRIS, C. (2009). Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using pull-out test. *Composites Part B: Engineering*, v. 40, n. 8, p. 784 – 797. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.07.003>

BANK, L. C.; GENTRY, T. R.; BARKATT, A. (1995). Accelerated test methods to determine the long-term behavior of FRP composite structures: environmental effects. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 14, n. 6, p. 559-587. <https://doi.org/10.1177/073168449501400602>

BARKATT, A. Issues in predicting long-term environment degradation of fiber-reinforced plastics. In: JONES, R. H. *Environmental effects on engineered materials*. Nova York, CRC Press, 2001, p. 419-458.

BELARBI, A.; WANG, H. (2012). Bond durability of FRP Bars Embedded in Fiber-Reinforced-Concrete. *Journal of Composites for Construction*, v. 16, n. 4. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000270](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000270)

BENMOKRANE, B.; WANG, P.; TON-THAT, T. M.; RAHMAN, H.; ROBERT, J. F. (2002). Durability of glass fiber-reinforced polymer reinforcing bars in concrete environment. *Journal of Composites for Construction*, v. 6, n. 3, p. 143-153. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:3\(143\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:3(143))

BENMOKRANE, B.; ALI, A. H.; MOHAMED, H. M.; ELSAFTY, A.; MANALO, A. (2017a). Laboratory assessment and durability performance of vinyl-ester, polyester, and epoxy glass-FRP bars for concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, v. 114, p. 163 - 174. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.002>

BENMOKRANE, B.; ROBERT, M.; MOHAMED, H. M.; ALI, A. H.; COUSIN, P. (2017b). Durability assessment of glass FRP solid and hollow bars (rock bolts) for application in ground control of Jurong Rock Caverns in Singapore. *Journal of Composites for Construction*, v. 21, n. 3. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000775](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000775)

BENMOKRANE, B.; MANALO, A.; BOUHET, J. C.; MOHAMED, K.; ROBERT, M. (2017c). Effects of diameter on the durability of glass fiber-reinforced polymer bars conditioned in alkaline solution. *Journal of Composites for Construction*, v. 21, n. 5, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000814](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000814)

BENMOKRANE B.; NAZAIR, C.; LORANGER, M. A.; MANALO, A. (2018). Field durability study of vinyl-ester-based GFRP rebars in concrete bridges barriers. *Journal of Bridge Engineering*, v. 23, n. 12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001315](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001315)

BENMOKRANE, B.; MEHANY, S.; SHIELD, C.; NANNI, A.; BROWN, V. (2023). Physical properties, longitudinal tensile properties, and bond strength of the New Generation of GFRP bars. *Journal of Composites for Construction*, v. 27, n. 6. <https://doi.org/10.1061/JCCOF2.CCENG-4300>

BENZECRY, V.; AL-KHAFAKI, A. F.; HALUZA, R. T.; BAKIS, C. E.; MYERS, J. J.; NANNI, A. (2021). Durability assessment of 15- to 20-year-old GFRP bars extracted from bridges in the US. I: Selected bridges, bar extraction, and concrete assessment. *Journal of Composites for Construction*, v. 25, n. 2. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001110](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001110)

BENZECRY, V.; EMPARANZA, A. R.; DE CASO Y BASALO, F.; NANNI, A. (2021). Bond coefficient,  $k_b$ , of GFRP bars. *Construction and Building Materials*, v. 292, 123380. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123380>

BILCIK, J.; HOLLY, I. (2013). Effect of reinforcement corrosion on bond behaviour. *Procedia Engineering*, v. 65, p. 248-253. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.038>

BOINARD, E.; PETHRICK, R. A.; DALZEL-JOB, J.; MACFARLANE, C. J. (2000). Influence of resin chemistry on water uptake and environmental ageing in glass fibre reinforced composites-polyester and vinyl ester laminates. *Journal of Materials Science*, v. 35, p. 1931-1937. <https://doi.org/10.1023/A:1004766418966>

BORSOI, C.; ZATTERA, A. J.; FERREIRA, C. A. (2016). Effect of cellulose nanowhiskers functionalization with polyaniline for epoxy coatings. *Applied Surface Science*, v. 364, p. 124-132. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.12.140>

BUCH, X.; SHANAHAN, M. E. R. (2000). Thermal and thermos-oxidative ageing of an epoxy adhesive. *Polymer Degradation and Stability*, v. 68, n. 3, p. 403-411. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(00\)00028-8](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(00)00028-8)

CABRAL-FONSECA, S.; CORREIA, J. R.; RODRIGUES, M. P.; BRANCO, F. A. (2011). Artificial accelerated ageing of GFRP pultruded profiles made of polyester and vinylester resins: characterization of physical-chemical and mechanical damage. *Strain*, v. 48, p. 162-173. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2011.00810.x>

CALLISTER JR. W.D.; RETHWISH, D.G. *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*. 8ª ed., Rio de Janeiro, RJ: LTC Editora, 2012.

CAMACHO, L. F. C. (2011). A utilização de varões de GFRP nas estruturas de betão armado. 2011. 189p. Dissertação de Mestrado - Universidade da Madeira, Funchal, 2011.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. CAN CSA S806: Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers. Ontario – Canadá, 2012.

\_\_\_\_\_. CAN CSA S807: Specification for fibre-reinforced polymers. Ontario – Canadá, 2012.

CARNEIRO, L. A. V.; TEIXEIRA, A. M. A. J. (2008). Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na engenharia e construção. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, v. 3, p. 54 – 66.

CELINA, M. C.; DAYILE, A. R.; QUINTANA, A. (2013). A perspective on the inherent oxidation sensitivity of epoxy materials. *Polymer*, v. 54, n. 13, p. 3290-3296. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2013.04.042>

CERONI, F.; COSENZA, E.; GAETANO, M.; PECCE, M. (2006). Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members. *Cement and Concrete Composites*, v. 28, n. 10, p. 857 – 868. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.004>

CHEN, Y.; DAVALOS, J. F.; RAY, I.; KIM, H. Y. (2007). Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures. *Composite Structures*, v. 78, n. 1, p. 101-111. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.08.015>

CHEN, Z.; LI, S.; ZHOU, J.; XU, R.; DAI, S. (2022). Flexural behavior of GFRP bars reinforced seawater sea sand concrete beams exposed to marine environment: Experimental and numerical study. *Construction and Building Materials*, v. 349, 128784. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128784>

CHIN, J. W.; AOUADI, K.; HAIGHT, M. R.; HUGHES, W. L.; NGUYEN, T. (2001). Effects of water, salt solution and simulated concrete pore solution on the properties of composite matrix resins used in civil engineering applications. *Polymer Composites*, v. 22, n. 2, p. 282-297. <https://doi.org/10.1002/pc.10538>

COLIN, X.; VERDU, J. (2003). Thermal ageing and lifetime prediction for organic matrix composites. *Plastics, Rubber and Composites*, v. 32, n. 8-9, p. 349-356. <https://doi.org/10.1179/146580103225004117>

COSTA, M. L.; ALMEIDA, S. F. M.; REZENDE, M. C. (2005). Hygrothermal effects on dynamic mechanical analysis and fracture behavior of polymeric composites. *Materials Research*, v. 8, n. 3, p. 335-340. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392005000300019>

COUSIN, P.; HASSAN, M.; VIJAY, P. V.; BENMOKRANE, B. (2019). Chemical resistance of carbon, basalt and glass fibers used in FRP reinforcing bars. *Journal of Composite Materials*, v. 53, n. 26-27, p. 3651-3670. <https://doi.org/10.1177/0021998319844306>

DALFRÉ, G. M. Cruzetas de polímeros reciclados: caracterização dos materiais, análise numérica e ensaios de modelos reduzidos. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

DALFRÉ, G. M.; PARSEKIAN, G. A. Introdução. In: DALFRÉ, G. M. *Polímeros Reforçados com Fibras na Construção Civil: Dimensionamento de sistemas de reforço e armaduras não metálicas à flexão e ao cisalhamento segundo normas ACI (1ª ed)*. São Carlos, EdUFSCar, 2022, p. 15 – 60.

DAVALOS, J. F.; CHEN, Y.; RAY, I. (2011). Long-term durability prediction models for GFRP bars in concrete environment. *Journal of Composite Materials*, v. 46, n. 16, p. 1899-1914. <https://doi.org/10.1177/0021998311427777>

DEBAIKY, A. S.; NKURUNZIZA, G.; BENMOKRANE, B.; COUSIN, P. (2006). Residual tensile properties of GFRP reinforcing bars after loading in severe environments. *Journal of Composites for Construction*, v. 10, n. 5, p. 370 – 380. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2006\)10:5\(370\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:5(370))

DEJKE, V.; TEPFERS, R. (2001). Durability and service life prediction of GFRP for concrete reinforcement. In: *Proc., 5th Int. Conf. on Fiber-Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-5)*. London: Thomas Telford, 2001, p. 505-516.

DOWN, J. L. (1984). The yellowing of epoxy resin adhesives: report on natural dark aging. *Studies in Conservation*, v. 29, n. 2, p. 63-76. <https://doi.org/10.1179/sic.1984.29.2.63>

DUARTE, I.; SANTOS, J.; FUGIYAMA, M.; PIMENTEL, L.; FORTI, N. Consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub> de barras de BFRP, GFRP e aço: estudo de caso de vigas de concreto armado. In: *WORKSHOP DE TECNOLOGIA DE PROCESSOS E SISTEMAS CONSTRUTIVOS, 3., 2021. Anais [...]*. Porto Alegre: ANTAC, 2021. P. 1 – 6. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/tecsic/article/view/1323>. Acesso em: 17 de novembro de 2023.

DUO, Y.; LIU, X.; LIU, Y.; TAFSIROJJAMAN, T.; SABBROJJAMAN, M. (2021). Environmental impact on the durability of FRP reinforcing bars. *Journal of Building Engineering*, v. 43, p. 1 – 20. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102909>

DU PLESSIX, B. P.; JACQUEMIN, F.; LEFÉBURE, P.; LE CORRE, S. (2015). Characterization and modeling of the polymerization-dependent moisture absorption behavior of an epoxy-carbon fiber-reinforced composite material. *Journal of Composite Materials*, v. 50, n. 18, p. 2495-2505. <https://doi.org/10.1177/0021998315606510>

D'ANTINO, T.; PISANI, M. A.; POGGI, C. (2018). Effect of the environment on the performance of GFRP reinforcing bars. *Composites Part B: Engineering*, v. 141, p. 123-136. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.037>

EL-GHANDOUR (1999). *Behaviour and Design of FRP RC Slabs*. Tese de Doutorado – The University of Sheffield, Sheffield, UK, 1999.

EL-HASSAN, H.; EL-MAADAWY, T.; AL-SALLAMIN, A.; AL-SAYDY, A. (2017). Performance evaluation and microstructural characterization of GFRP bars in seawater-contaminated

concrete. *Construction and Building Materials*, v. 147, p. 66-78. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.135>

EL-HASSAN, H.; EL-MAADDAWY, T. (2019). Microstructure characteristics of GFRP reinforcing bars in harsh environments. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2019, n. 1, p. 1 – 19. <https://doi.org/10.1155/2019/8053843>

EL-NEMR, A.; AHMED, E. A.; BARRIS, C.; BENMOKRANE, B. (2016). Bond-dependent coefficient of glass- and carbon-FRP bars in normal- and high-strength concretes. *Construction and Building Materials*, v. 113, p. 77-89. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.005>

EL-NEMR, A.; AHMED, E. A.; EL-SAFETY, A.; BENMOKRANE, B. (2018). Evaluation of the flexural strength and serviceability of concrete beams reinforced with different types of GFRP bars. *Engineering Structures*, v. 173, p. 606-619. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.089>

EMPARANZA, A. R.; DE CASO Y BASALO, F.; KAMPMANN, R.; USABIAGA, I. A. (2018). Evaluation of the bond-to-concrete properties of GFRP rebars in marine environments. *Infrastructures*, v. 3, n. 44. <https://doi.org/10.3390/infrastructures3040044>

EMPARANZA, A. R.; KAMPMANN, R.; DE CASO, F.; MORALES, C.; NANNI, A. (2022). Durability assessment of GFRP rebars in marine environments. *Construction and Building Materials*, v. 329, 127028. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127028>

ERNAULT, E.; RICHAUD, E.; FAYOLLE, B. (2017). Thermal-oxidation of epoxy/amine followed by glass transition temperature changes. *Polymer Degradation and Stability*, v. 138, p. 82-90. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.02.013>

ESMAEILI, Y.; ESLAMI, A.; NEWHOOK, J.; BENMOKRANE, B. (2020). Performance of GFRP-Reinforced concrete beams subjected to high-sustained load and natural aging for 10 years. *Journal of Composites for Construction*, v. 24, n. 5. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001065](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001065)

EUROCOMP. Structural design of polymer composites: design code and handbook. Londres: John L. Clarke (ed.), 1996.

FASIL, M.; AL-ZAHRANI, M. M. (2023). Transverse shear capacity predictions of GFRP bars subjected to accelerated aging using artificial neural networks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 35, n. 4. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004686](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004686)

FASIL, M.; AL-ZAHRANI, M. M. (2024). Interlaminar shear strength retention of GFRP bars exposed to alkaline and acidic conditioning and capacity prediction using artificial neural networks. *Journal of Composites for Construction*, v. 28, n. 6. <https://doi.org/10.1061/JCCOF2.CCENG-4752>

FAZA, S. S.; GANGARAO, H. V. S. (1993). Theoretical and experimental correlation of behavior of concrete beams reinforced with fiber reinforced plastic rebars. In: *ACI Int. Symposium - Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures*, p. 599-614, 1993, Detroit, MI.

FEESER, W. K.; BROWN, V. L. Guide Examples for Design of Concrete Reinforced with FRP Bars. In: *INTERNACIONAL SYMPOSIUM OF FIBER-REINFORCED POLYMER REINFORCEMENT FOR CONCRETE STRUCTURES*, 7., v. 230, p. 935-954, 2005, Kansas. Anais... Kansas, 2005.

FELIX, E. F.; BALABUCH, T. J. R.; POSTERLLI, M. C.; POSSAN, E.; CARRAZEDO, R. (2018). Service life analysis of reinforced concrete structure under uniform corrosion through ANN model coupled to the FEM. *Revista ALCONPAT*, v. 8, n. 1. <https://doi.org/10.21041/ra.v8i1.256>

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

FERGANI, H.; DI BENEDETTI, M.; OLLER, C. M.; LYNSDALE, C.; GUADAGNINI, M. (2018). Durability and degradation mechanisms of GFRP reinforcement subjected to severe environments and sustained stress. *Construction and Building Materials*, v. 170, pp. 637-648. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.092>

FÉDÉRATION INTERNACIONALE DU BETÓN (FIB). *Bulletin 35: Retrofitting of concrete structures by externally bonded FRPs*. Lausanne: FIB, 2006.

\_\_\_\_\_. *Bulletin 40: FRP reinforcement in RC structures*. Lausanne: FIB, 2007.

\_\_\_\_\_. *Bulletin 90: Externally applied FRP reinforcement for concrete structures*. Lausanne: FIB, 2019.

FIGUEIRA, S. P. S. Reforço de pilares por confinamento com mantas de fibras de carbono: avaliação de modelos de comportamento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade da Madeira, Funchal, 2016.

FRAGA, A. N.; ALVAREZ, V. A.; VÁZQUEZ, A. LA OSA, O. (2003). Relationship between Dynamic mechanical properties and water absorption of unsaturated polyester and vinyl ester glass fiber composites. *Journal of Composite Materials*, v. 37, n. 17, p. 1553-1574. <https://doi.org/10.1177/0021998303029421>

GAJDOSOVÁ, K.; SONNENSCHNEIN, R.; BLAHO, S.; KINCEKOVÁ, S.; PECKA, J. (2020). Durability of FRP reinforcements and long-term properties. *Slovak Journal of Civil Engineering*, v. 28, n. 2, p. 50-55. <https://doi.org/10.2478/sjce-2020-0015>

GALANT, C.; FAYOLLE, B.; KUNTZ, M.; VERDU, J. (2010). Thermal and radio-oxidation of epoxy coatings. *Progress in Organic Coatings*, v. 69, n. 4, p. 322-329. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2010.07.005>

GAUR, U.; MILLER, B. (1989). Microbond method for determination of the shear strength of a fiber/resin interface: Evaluation of experimental parameters. *Composites Science and Technology*, v. 34, n. 1, p. 35-51. [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(89\)90076-6](https://doi.org/10.1016/0266-3538(89)90076-6)

GAY, D.; HOA, S. V.; TSAI, S. W. (2003). *Composite Materials. Design and Applications*, CRC Press, Boca Raton.

GHORAB, H. Y.; HILAL, M. S.; KISHAR, E. A. (1989). Effect of mixing and curing waters on the behaviour of cement pastes and concrete. Part 1: Microstructure of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, v. 19, n. 6, p. 868 – 878. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(89\)90099-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(89)90099-9)

GIBSON, R. F. (1994). *Principles of Composite Material Mechanics*, McGraw-Hill, Nova York.

GONÇALVES, J. F. G. Aderência de varões de GFRP no betão. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). 2013. Universidade da Madeira, 2013.

GOORANORIMI, O.; NANNI, A. (2017). GFRP reinforcement in concrete after 15 years of service. *Journal of Composites for Construction*, v. 21, n. 5, p. 1 – 9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000806](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000806)

GOORANORIMI, O.; SUARIS, W.; DAUER, E.; NANNI, A. (2017). Microstructural investigation of glass fiber reinforced polymer bars. *Composites Part B: Engineering*, v. 110, p. 388-395. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.029>

GRAEFF, A. G. (2007). Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado. 2007. 184p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

GREENWOOD, M. (2001). Pultruded Composites Durability: A Key Value. *Proceedings of Composites 2001 CFA*, Tampa F.

GROCHOSKI, M.; HELENE, P. (2008). Sistemas de reparo para estruturas de concreto com corrosão de armaduras. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*, São Paulo, n. 5, 21p. EPUSP.

GUO, J. S.; WALDRON, P. (2001). An Elastic Model to Quantify the Effect of Moisture on the Mechanical Properties of Concrete at the Time of Test. *Magazine of Concrete Research*, v. 53, n. 3, p. 151-162. <https://doi.org/10.1680/mac.2001.53.3.151>

GUO, F.; AL-SAAD, S.; SINGH RAMAN, R. K.; ZHAO, X. L. (2018). Durability of fiber reinforced polymer (FRP) in simulated seawater sea sand concrete (SWSSC) environment. *Corrosion Science*, v. 141, p. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.06.022>

HABEEB, M. N.; ASHOUR, A. F. (2008). Flexural behavior of continuous GFRP reinforced concrete beams. *Journal of Composites for Construction*, v. 12, n. 2, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2008\)12:2\(115\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:2(115))

HASSAN, M.; BENMOKRANE, B.; ELSAFTY, A.; FAM, A. (2016). Bond durability of basalt-fiber-reinforced-polymer (BFRP) bars embedded in concrete in aggressive environments. *Composites Part B: Engineering*, v. 106, p. 262-272. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.039>

HAYES, M. D.; GARCIA, K.; VERGHESE, N.; LESKO, J. J. (1998). The Effects of Moisture on the Fatigue Behavior of a Glass/Vinyl Ester Composite. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Fibre Composites in Infrastructure – ICCI 98*, v. 1, p. 1 – 13.

HE, X. J.; YANG, J.; BAKIS, C. E. (2013). Tensile strength characteristics of GFRP bars in concrete beams with work cracks under sustained loading and severe environments. *Journal of Wuhan University of Technology – Mater. Sci. Ed.*, v. 28, p. 934-937. <https://doi.org/10.1007/s11595-013-0796-0>

HE, X. J.; DAI, L.; YANG, W. R. (2017). Durability and degradation mechanism of GFRP bars embedded in concrete beams with cracks. *Plastics, Rubber and Composites*, v. 46, n. 1, p. 17-24. <https://doi.org/10.1080/14658011.2016.1245807>

HEAD, M.; ASHBY-BEY, E.; EDMONDS, K.; EFE, S.; GROSE, S.; MASON, I. (2015). *Stainless Steel Prestressing Strands and Bars for use in Prestressed Concrete Girders and Slabs*. Maryland State Highway Administration / Morgan State University, Baltimore, p. 121.

HELENE, P. R. L. *Corrosão em armaduras para concreto armado* (4<sup>a</sup> ed). São Paulo, PINI, 1999, 48 p.

HOLLAWAY, L. C. (2003). The Evolution of and the way forward for advanced Polymer composites in the civil infrastructure. *Construction and Building Materials*, v. 17, n. 6-7, p. 365-378. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(03\)00038-2](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(03)00038-2)

HOLLAWAY, L. C. (2010). A review of the present and future utilization of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 12, p. 2419-2445. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.062>

HONG, B.; XIAN, G.; LI, H. (2018). Effects of water or alkali solution immersion on the water uptake and physicochemical properties of a pultruded carbon fiber reinforced polyurethane plate. *Polymer Composites*, v. 40, n. 2, p. 738-748. <https://doi.org/10.1002/pc.24730>

HU, X.; PENG, G.; NIU, D.; WANG, J. (2020). Experimental study on bond properties between early-age concrete and deformed steel bars. *Construction and Building Materials*, v. 236. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117593>

IBRACON/ABECE. Prática recomendada CT 303: Estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras (FRP). São Paulo, 2021.

IDRISI, A. H.; MOURAD, A. H. I.; SHERIF, M. M. (2021). Impact of Prolonged Exposure of Eleven Years to Hot Seawater on the Degradation of a Thermoset Composite. *Polymers*, v. 13, n. 13, 2154. <https://doi.org/10.3390/polym13132154>

IFRAHIM, M. S.; SANGI, A. J.; AHMAD, S. H. (2023). Experimental and numerical investigation of flexural behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars. *Structures*, v. 56, 104951. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104951>

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa – BDMEP. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

IQBAL, M.; ZHANG, D.; JALAL, F. E.; JAVED, M. F. (2021). Computational AI prediction models for residual tensile strength of GFRP bars aged in the alkaline concrete environment. *Ocean Engineering*, v. 232, 109134. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109134>

ISIS. Durability of FRP Composites for Construction: Educational Module no.8, The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, ISIS Canada Corporation, Manitoba, Canada, 2006.

ISIS, Canada. Design 3: Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers. Canadá, 2007.

ISSA, M. S.; METWALLY, I. M.; ELZEINY, S. M. (2011). Influence of fibers on flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with GFRP rebars. *Engineering Structures*, v. 33, n. 5, p. 1754-1763. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.014>

JIA, D.; GUO, Q.; MAO, J.; LV, J.; YANG, Z. (2020). Durability of glass fibre-reinforced Polymer (GFRP) bars embedded in concrete under various environments. I: Experiments and analysis. *Composite Structures*, v. 234. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111687>

KAMAL, A.; BOULFIZA, M. (2011). Durability of GFRP rebars in simulated concrete solutions under accelerated aging conditions. *Journal of Composites for Construction*, v. 15, n. 4, p. 473-481. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000168](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000168)

KARBHARI, V. M.; ZHANG, S. (2003). E-Glass/Vinylester Composites in aqueous environments – I: Experimental results. *Applied Composite Materials*, v. 10, n. 1, p. 19-48. <https://doi.org/10.1023/A:1021153315780>

KARBHARI, V. M.; CHIN, J. W.; HUNSTON, D.; BENMOKRANE, B.; JUSKA, T.; MORGAN, R.; LESKO, J. J.; SORATHIA, U.; REYNAUD, D. (2003). Durability gap analysis for fiber-reinforced polymer composites in civil infrastructure. *Journal of Composites for Construction*, v. 7, n. 3, p. 238-247. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2003\)7:3\(238\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2003)7:3(238))

KARBHARI, V. Durability of composites for civil structural applications. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2007.

KASZYNSKA, M.; BLYSZKO, J.; OLCZYK, N. (2017). Comparison of failure process of bended beams reinforced with steel bars and GFRP bars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 245, 022028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/2/022028>

KATO, Y.; YAMAGUCHI, T.; NISHIMURA, T.; UOMOTO, T. (1997). Computational model for deterioration of aramid fibre by ultraviolet rays. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, v. 2, p. 163 – 170.

KATZ, A. (2004). Environmental impact of steel and Fiber Reinforced Polymer reinforced pavements. *Journal of Composites for Construction*, v. 8, n. 6, p. 481-488. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2004\)8:6\(481\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:6(481))

KHATIBMASJEDI, M.; NANNI, A. (2018). Durability of GFRP reinforcement in seawater concrete. *International Concrete Abstracts Portal*, v. 327, p. 42.1-42.12. <https://doi.org/10.14359/51713363>

KHATIBMASJEDI, M.; RAMANATHAN, S.; SURANENI, P.; NANNI, A. (2020). Durability of commercially available GFRP reinforcement in seawater-mixed concrete under accelerated aging conditions. *Journal of Composites for Construction*, v. 24, n. 4. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001035](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001035)

KIM, H. Y.; PARK, Y. H.; YOU, Y. J., MOON, C. K. (2008). Short-term durability test for GFRP rods under various environmental conditions. *Composite Structures*, v. 83, n. 1, p. 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.03.005>

KOTYNIA, R.; SZCZECH, D.; KASZUBSKA, M. (2017). Bond behavior of GFRP Bars to Concrete in Beam Test. *Procedia Engineering*, v. 193, p. 401 – 408. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.230>

KRAUKLIS, A. E.; ECHTERMEYER, A. T. (2018). Mechanism of yellowing: carbonyl formation during hygrothermal aging in a common amine epoxy. *Polymers*, v. 10, n. 9, 1017. <https://doi.org/10.3390/polym10091017>

KSOURI, I.; HADDAR, N. (2018). Long term ageing of polyamide 6 and polyamide 6 reinforced with 30 % of glass fibers: temperature effect. *Journal of Polymer Research*, v. 25, n. 153. <https://doi.org/10.1007/s10965-018-1551-1>

KUTTNER, C.; HANISCH, A.; SCHMALZ, H.; EDER, M.; SCHLAAD, H.; BURGERT, I.; FERY, A. (2013). Influence of the polymeric interphase design on the interfacial Properties of (fiber-reinforced) composites. *ACS Applied Materials & Interfaces*, v. 5, n. 7, p. 2469-2478. <https://doi.org/10.1021/am302694h>

LABORATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL. *Fluorescência de Raios X*. São Carlos: DEMa/UFSCar, [s.d.]. Disponível em: <https://www.lce-dema.ufscar.br/fluorescencia-de-raios-x/>. Acesso em: 30 jun. 2025

LEVINE, H.; SLADE, L. Water as a plasticizer: physico-chemical aspects of low-moisture polymeric systems. In: FRANKS, F. *Water Science Reviews 3: Water Dynamics* (3<sup>a</sup> ed). Cambridge, Cambridge University Press, 1988, p. 79-185. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511552083.002>

LI, K.; WANG, K.; ZHAN, M. S.; XU, W. (2013). The change of thermal-mechanical properties and chemical structure of ambiente cured DGEBA/TEPA under accelerated thermos-oxidative aging. *Polymer Degradation and Stability*, v. 98, n. 11, p. 2340-2346. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.08.014>

LI, W.; WEN, F.; ZHOU, M.; LIU, F.; JIAO, Y.; WU, Q.; LIU, H. (2022). Assessment and Prediction Model of GFRP Bars' Durability Performance in Seawater Environment. *Buildings*, v. 12, n. 2, 127. <https://doi.org/10.3390/buildings12020127>

LU, C.; YANG, J.; LI, H.; LIU, R. (2017). Experimental studies on chloride penetration and steel corrosion in cracked concrete beams under drying-wetting cycles. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 29, n. 9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.000195](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000195)

LU, C.; NI, M.; CHU, T.; HE, L. (2020). Comparative investigation on tensile performance of FRP bars after exposure to water, seawater, and alkaline solutions. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 32, n. 7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003243](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003243)

LU, Z.; LI, J.; XIE, J.; HUANG, P.; XUE, L. (2021). Durability of flexural strengthened RC beams with prestressed CFRP sheet under wet-dry cycling in a chloride containing environment. *Composite Structures*, v. 255. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112869>

LU, C.; YANG, Y.; HE, L. (2021). Mechanical and durability Properties of GFRP bars exposed to aggressive solution environments. *Science and Engineering of Composite Materials*, v. 28, n. 1, p. 11-23. <https://doi.org/10.1515/secm-2021-0002>

LU, Z.; LI, S.; XIE, J.; HUANG, Q.; ZHANG, B.; HUANG, P.; LI, J.; LI, L. (2022). Durability of GFRP bars embedded in seawater sea-sand concrete: A coupling effect of prestress and immersion in seawater. *Construction and Building Materials*, v. 326, 126979. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126979>

LU, D.; SHI, X.; ZHONG, J. (2022). Understanding the role of unzipped carbon nanotubes in cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, v. 126. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104366>

LU, C.; QI, Z.; ZHENG, Y.; XUAN, G.; YAN, Y. (2023). Long-term tensile performance of GFRP bars in loaded concrete and aggressive solutions. *Journal of Building Engineering*, v. 64, 105587. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105587>

MADHUKAR, M. S.; DRZAL, L. T. (1991). Fiber-matrix adhesion and its effect on composite mechanical Properties: II. Longitudinal (0°) and tranverse (90°) tensile and flexure behavior of graphite/epoxy composites. *Journal of Composite Materials*, v. 25, n. 8, p. 958-991. <https://doi.org/10.1177/002199839102500802>

MAILHOT, B.; MORLAT-THÉRIAS, S.; OUAHIOUNE, M.; GARDETTE, J. (2005). Study of the degradation of an Epoxy/Amine resin, 1. *Macromolecular Chemistry and Physics*, v. 206, n. 5, p. 575-584. <https://doi.org/10.1002/macp.200400395>

MANALO, A. C.; ALAJARMEH, O.; COOPER, D.; SORBELLO, C. D.; WEERAKOON, S. Z.; BENMOKRANE, B. (2020a). Manufacturing and structural performance of glass-fiber-reinforced precast-concrete boat ramp planks. *Structures*, v. 28, p. 37-56. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.041>

MANALO, A.; MARANAN, G.; BENMOKRANE, B.; COUSIN, P.; ALAJARMEH, O.; FERDOUS, W.; LIANG, R.; HOTA, G. (2020b). Comparative durability of GFRP composite reinforcing bars in concrete and in simulated concrete environments. *Cement and Concrete Composites*, v. 109. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103564>

MANALO, A.; ALAJARMEH, O.; YANG, X.; FERDOUS, W.; EBRAHIMZADEH, S.; BENMOKRANE, B.; SORBELLO, C. D.; WEERAKOON, S.; LUTZE, D. (2022). Development and mechanical performance evaluation of a GFRP-reinforced concrete boat-approach slab. *Structures*, v. 46, p. 73-87. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.10.040>

MARTYNOVA, E.; CEBULA, H. Glass Fibers. In: MAHTIG, B.; KYOSEV, Y. *Inorganic and Composite Fibers*, Elsevier, p. 131 – 163, 2018.

MAZZÚ, A. D. E. (2020). Estudo sobre a substituição de armadura metálica por barras de GFRP em vigas de concreto armadas à flexão quando submetidas ao ataque acelerado de íons cloreto. 2020. 190p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

MICELLI, F.; NANNI, A. (2004). Durability of FRP rods for concrete structures. *Construction and Building Materials*, v. 18, n. 7, p. 491 – 503. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.012>

MICELLI, F.; AIELLO, M. A. (2019). Residual tensile strength of dry and impregnated reinforcement fibres after exposure to alkaline environments. *Composites Part B: Engineering*, v. 159, p. 490-501. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.005>

MILLER, B.; GAUR, U.; HIRT, D. E. (1991). Measurement and mechanical aspects of the microbond pull-out technique for obtaining fiber/resin interfacial shear strength. *Composites Science and Technology*, v. 42, n. 1-3, p. 207-219. [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(91\)90018-K](https://doi.org/10.1016/0266-3538(91)90018-K)

MINISTRY OF CONSTRUCTION AND HOUSING AND COMMUNAL SERVICES OF THE RUSSIAN FEDERATION. SP 295.1325800: Concrete structures reinforced with polymer composite reinforcement – Design Rules. Moscou, 2017.

MINISTRY OF REGIONAL DEVELOPMENT OF THE RUSSIAN FEDERATION. SP 63.13330: Concrete and reinforced concrete structures – General points. Moscou, 2012.

MOHAMED, O. A.; AL HAWAT, W.; KESHAWARZ, M. (2021). Durability and mechanical properties of concrete reinforced with basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars: Towards sustainable infrastructure. *Polymers*, v. 13, n. 9, 1402. <https://doi.org/10.3390/polym13091402>

MONTAIGU, M.; ROBERT, M.; AHMED, E. A.; BENMOKRANE, B. (2013). Laboratory characterization and evaluation of durability performance of new polyester and vinylester E-glass GFRP dowels for jointed concrete pavement. *Journal of Composites for Construction*, v. 17, n. 2, p. 176 – 187. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000317](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000317)

MORALES, C. N.; CLAURE, G.; EMPARANZA, A. R.; NANNI, A. (2021). Durability of GFRP reinforcing bars in seawater concrete. *Construction and Building Materials*, v. 270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121492>

MOURA, R. C. A. (2021). Análise da durabilidade de armaduras poliméricas reforçadas com fibras de vidro submetidas ao ambiente alcalino e a elevadas temperaturas. 2021. 176p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021.

MOURA, R. C. A.; RIBEIRO, D. V.; LIMA, P. R. L. (2021). Mechanical Damage Assessment of GFRP Rebars with Different Resins due to Hydrothermal Aging. *Materials Research*, v. 24, n. 5. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0172>

MOURA, R. C. A.; LIMA, P. R. L.; RIBEIRO, D. V. (2022). Effect of temperature on mechanical behavior of concrete reinforced with different types of GFRP bar. *Polymers*, v. 14, n. 17, 3437. <https://doi.org/10.3390/polym14173437>

MOURAD, A. H. I.; IDRISI, A. H.; WRAGE, M. C.; ABDEL-MAGID, B. M. (2019). Long-term durability of thermoset composites in seawater environment. *Composites Part B: Engineering*, v. 168, p. 243-253. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.076>

MOUZAKIS, D. E.; ZOGA, H.; GALIOTIS, C. (2008). Accelerated environmental ageing study of polyester/glass fiber reinforced composites (GFRPCs). *Composites Part B: Engineering*, v. 39, n. 3, p. 467-475. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.10.004>

MUFTI, A.; ONOFREI, M.; BENMOKRANE, B.; BANTHIA, N.; BOULFIZA, M.; NEWHOOK, J.; BAKHT, B.; TADROS, G.; BRETT, P. (2005). Durability of GFRP reinforcement concrete in field structures. *ACI Symposium Publication*, v. 230, p. 1361-1378. <https://doi.org/10.14359/14898>

MUFTI, A. A.; ONOFREI, M.; BENMOKRANE, B.; BANTHIA, N.; BOULFIZA, M.; NEWHOOK, J. P.; BAKHT, B.; TADROS, G. S.; BRETT, P. (2007). Field study of glass-fibre-reinforced polymer durability in concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 34, n. 3, p. 355-366. <https://doi.org/10.1139/l06-138>

MUKHERJEE, A.; ARWIKAR, S. J. (2005). Performance of glass fiber-reinforced polymer reinforcing bars in tropical environments – Part I: Structural scale tests. *ACI Structural Journal*, v. 102, n. 5, p. 745-753.

MYERS, J. J.; GREMEL, D.; ERICSON, A.; KAMPEN, C. V. (2023). New ACI 440.11 code adopted for design of concrete reinforced with glass-fiber-reinforced polymer bars. *PCI Journal*, v. 68, n. 2, p. 22-28. <https://doi.org/10.15554/pcij68.2-05>

NANNI, A. (1993). Flexural behavior and design of RC members using FRP reinforcement. *Journal of Structural Engineering*, v. 119, n. 11, p. 3344-3359. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1993\)119:11\(3344\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:11(3344))

NANNI, A.; DE LUCA, A.; ZADEH, H. J. (2014). Reinforced concrete with FRP bars: Mechanics and Design. Boca Raton: CRC Press.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA. National Building Code of Canada. Ottawa – Canadá, 2015.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS (NACE). International measures of prevention, application and economics of corrosion technologies (IMPACT) study. Houston – Texas, 2016.

NEVILLE, A. Chloride attack of reinforced concrete: an overview. *Materials and Structures*, v. 28, p. 63-70. <https://doi.org/10.1007/BF02473172>

NGONO, Y.; MARÉCHAL, Y.; MERMILLIOD, N. (1999). Epoxy-amine reticulates observed by infrared spectrometry. I: Hydration process and interaction configurations of embedded H<sub>2</sub>O molecules. *Journal of Physical Chemistry B*, v. 103, n. 24, p. 4979-4985. <https://doi.org/10.1021/jp984809y>

NGONO, Y.; MARÉCHAL, Y. (2001). Epoxy-amine reticulates observed by infrared spectrometry. III. Modifications of the structure and hydration abilities after irradiation in a humid atmosphere. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, v. 39, n. 11, p. 1129-1136. <https://doi.org/10.1002/polb.1089>

NKURUNZIZA, G.; DEBAIKY, A.; COUSIN, P.; BENMOKRANE, B. (2005). Durability of GFRP bars: a critical review of the literature. *Progress in Structural Engineering and Materials*, v. 7, n. 4, p. 194-209. <https://doi.org/10.1002/pse.205>

NOOBUT, W.; KOENIG, J. L. (1999). Interfacial behavior of epoxy/E-glass fiber composites under wet-dry cycles by Fourier transform infrared microspectroscopy. *Polymer Composites*, v. 20, n. 1, p. 38-47. <https://doi.org/10.1002/pc.10333>

NOSKOV, A. M. (1975). Photochemistry of epoxy films. *Journal of Applied Spectroscopy*, v. 23, n. 6, p. 1638-1642. <https://doi.org/10.1007/BF00615580>

OLIVEIRA, F. G. X.; FILGUEIRAS, V. J. B. F.; MEIRA, G. R.; CARNEIRO, A. M. P. (2007). Custos de Recuperação Estrutural: Um Estudo de Caso. IX Congresso Latino-Americano de Patologia das Construções - CONPAT2007. Quito, Equador, 2007.

OLIVEIRA, C. B. L.; GRECO, M.; BITTENCOURT, T. N. (2019). Analysis of the brazilian federal bridge inventory. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 12, n. 1. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952019000100002>

OLIVEIRA, M. C. Análise do comportamento estrutural e durabilidade de pilares de concreto armado reforçado com mantas de GFRP. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

OWENS CORNING. Reforço de fibra de vidro - Guia de resistência química. 2011.

OZCOBAN, E. (2017). Comparison of reinforced concrete bridge and fiber reinforced polymer bridge using life cycle assessment. 2017. 72p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Arquitetônica e Ambiental) – University of Miami, Coral Gables, Flórida, 2017.

PAN, Y.; YAN, D. (2021). Study on the durability of GFRP bars and carbon/glass hybrid fiber reinforced Polymer (HFRP) bars aged in alkaline solution. *Composite Structures*, v. 261. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113285>

PAN, Y.; YU, Y.; YU, J.; LU, Z.; CHEN, Y. (2023). Effects of simulated seawater on static and fatigue performance of GFRP bar-concrete bond. *Journal of Building Engineering*, v. 68. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105985>

PARK, Y.; KIM, Y. H.; LEE, S. H. (2014). Long-term flexural behaviors of GFRP reinforced concrete beams exposed to accelerated aging exposure conditions. *Polymers*, v. 6, p. 1773-1793. <https://doi.org/10.3390/polym6061773>

PEARSON, C.; DONCHEV, T.; LIMBACHIYA, M. (2011). An investigation into the sustainability of FRP reinforcement bars. CDCC-11 4<sup>th</sup> International Conference on Durability and Sustainability of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction and Rehabilitation, Quebec, Canadá, 2011.

PECHYEN, C.; ATONG, D.; AHT-ONG, D. (2011). Effect of additives on mechanical properties and photo-stability of filament-wound glass fiber reinforced epoxy pipes. *Polymers and Polymer Composites*, v. 19, p. 161-170. <https://doi.org/10.1177/09673911111019002-317>

PHIFER, S. P. Hygrothermal evaluation of pultruded polymer composite laminates – experimentation, analysis, and prediction. Blacksburg, VA: Virginia Tech, 2003.

PILAKOUTAS, K.; NEOCLEOUS, K.; GUADAGNINI, M. (2002). Design Philosophy Issues of Fiber Reinforced Polymer Reinforced Concrete Structures. *Journal of Composites for Construction*, v. 6, n. 3. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:3\(154\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:3(154))

RAMANATHAN, S.; BENZECRY, V.; SURANENI, P.; NANNI, A. (2021). Condition assessment of concrete and glass fiber reinforced polymer (GFRP) rebar after 18 years of service life. *Case Studies in Construction Materials*, v. 14, e00494. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00494>

RASOLDIER, N.; COLIN, X.; VERDU, J.; BOCQUET, M.; OLIVIER, L.; CHOCINSKI-ARNAULT, L.; LAFARIE-FRENOT, M. C. (2008). Model systems for thermos-oxidised epoxy composite matrices. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 39, n. 9, p. 1522-1529. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.05.016>

RAY, B. C.; RATHORE, D. (2014). Durability and integrity studies of environmentally conditioned interfaces in fibrous polymeric composites: Critical concepts and comments. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 209, p. 68-83. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2013.12.014>

REZENDE, M. A. M. Corrosão de armaduras em meios aquosos e porosos de argamassas com agregados alternativos (ACBC e LETA). 2022. 217p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

RIFAI, M. A.; EL-HASSAN, H.; EL-MAADDAWY, T.; ABED, F. (2020). Durability of basalt FRP reinforcing bars in alkaline solution and moist concrete environments. *Construction and Building Materials*, v. 243, 118258. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118258>

ROBERT, M.; COUSIN, P.; BENMOKRANE, B. (2009). Durability of GFRP reinforcing bars embedded in moist concrete. *Journal of Composites for Construction*, v. 13, n. 2, p. 66-73. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2009\)13:2\(66\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2009)13:2(66))

ROBERT, M.; WANG, P.; COUSIN, P.; BENMOKRANE, B. (2010). Temperature as an accelerating factor for long-term durability testing of FRPs: Should there be any limitations?. *Journal of Composites for Construction*, v. 14, n. 4, p. 361-367. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000102](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000102)

ROBERT, M.; BENMOKRANE, B. (2013). Combined effects of saline solution and moist concrete on long-term durability of GFRP reinforcing bars. *Construction and Building Materials*, v. 38, p. 274-284. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.021>

ROCHA, I. B. C. M.; RAIJMAEKERS, S.; NIJSSEN, R. P. L.; VAN DER MEER, F. P.; SLUYS, L. J. (2017). Hygrothermal ageing behaviour of a glass/epoxy composite used in wind turbine blades. *Composite Structures*, v. 174, p. 110-122. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.028>

ROSA, I. C., FIRMO, J. P., CORREIA, J. R., BARROS, J. A. O. (2019). Bond behaviour of sand coated GFRP bars to concrete at elevated temperature – Definition of bond vs. slip

relations. *Composites Part B: Engineering*, v. 160, p. 329 – 340. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.020>

ROSSELLI, F.; SANTARE, M. H. (1997). Comparison of the short beams shear (SBS) and interlaminar shear device (ISD) tests. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 28, n. 6, p. 587-594. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(97\)00009-2](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(97)00009-2)

ROSU, D.; ROSU, L.; CASCAVAL, C. N. (2009). IR-change and yellowing of polyurethane as a result of UV radiation. *Polymer Degradation and Stability*, v. 94, n. 4, p. 591-596. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.01.013>

RYOU, H.; PASHLEY, D. H.; TAY, F. R.; AROLA, D. (2013). A characterization of the mechanical behavior of resin-infiltrated dentin using nanoscopic Dynamic Mechanical Analysis. *Dental Materials*, v. 29, n. 7, p. 719-728. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2013.03.022>

SANTOS, L. F. O. (2024). Estudo do efeito hidrotérmico no comportamento mecânico de vigas de concreto armado com barras de Polímero Reforçado com Fibras de Vidro. 144p. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2024.

SAWPAN, M. A.; MAMUN, A. A.; HOLDSWORTH, P. G. (2014). Long term durability of pultruded polymer composite rebar in concrete environment. *Materials and Design*, v. 57, p. 616-624. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.049>

SCHOECK, 2020. Disponível em: <<https://www.schoeck.com>>. Acesso em: 01 de maio de 2020.

SEN, R.; MULLINS, G.; SALEM, T. (2002). Durability of E-glass/vinylester reinforcement in alkaline solution. *ACI Structural Journal*, v. 99, n. 3, p. 369-375. <https://doi.org/10.14359/11921>

SETHI, S.; RAY, M. C. (2015). Environmental effects on fibre reinforced polymeric composites: Evolving reasons and remarks on interfacial strength and stability. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 217, p. 43-67. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.12.005>

SHANOUR, A. S.; MAHMOUD, A. A.; ADAM, M. A.; SAID, M. (2014). Experimental investigation of concrete beams reinforced with GFRP bars. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, v. 5, n. 11, p. 154-164.

SHENG-PING, W.; JIANG, J. Y. (2012). Research status of durability of FRP bars. *Journal of North China Institute of Water Resources and Electric Power*, v. 33, n. 6, p. 124-128.

SHI, J.; LIU, B.; HE, Z.; LIU, Y.; JIANG, J.; XIONG, T.; SHI, J. (2021). A green ultra-lightweight chemically foamed concrete for building exterior: A feasibility study. *Journal of cleaner production*, v. 288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125085>

SILVA, A. S. Comportamento de pilares curtos confinados por compósitos de fibras de vidro e carbono. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SILVA, M. A. G.; FONSECA, B. S.; BISCAIA, H. (2014). On estimates of durability of FRP based on accelerated tests. *Composite Structures*, v. 116, p. 377-387. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.05.022>

SILVA, M. P.; SANTOS, P.; PARENTE, J. M.; VALVEZ, S.; REIS, P. N. B.; PIEDADE, A. P. (2020). Effect of post-cure on the static and viscoelastic properties of a polyester resin. *Polymers*, v. 12, n. 9, 1927. <https://doi.org/10.3390/polym12091927>

SILVA, G. A. S.; D'ALMEIDA, J. R. M.; CARDOSO, D. C. T. (2024). Investigation on moisture absorption behavior on GFRP and neat epoxy systems in hygrothermal salt fog aging. *Composites Part B*, v. 272, 111214. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111214>

SOARES, S. M. Durabilidade de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com incorporação de pó de vidro frente à ação de cloretos. 2021. 256p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

SOLYOM, S.; BALÁZS, G. L. (2018). Comparative study of bond behaviour for different FRP and steel bars. In: Proc., 12<sup>th</sup> fib International Ph.D Symposium in Civil Engineering. Lausanne, Switzerland: CEB FIB, 2018, p. 153-160.

SOLYOM, S.; DI BENEDETTI, M.; GUADAGNINI, M.; BALÁZS, G. L. (2020). Effect of temperature on the bond behaviour of GFRP bars in concrete. *Composites Part B: Engineering*, v. 183. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107602>

SPAGNUOLO, S.; RINALDI, Z.; DONNINI, J.; NANNI, A. (2021). Physical, mechanical and durability Properties of GFRP bars with modified acrylic resin (modar) matrix. *Composite Structures*, v. 262. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113557>

STARKOVA, O.; ANISKEVICH, K.; SEVCENKO, J. (2021). Long-term moisture absorption and durability of FRP pultruded rebars. *Materials Today: Proceedings*, v. 34, n. 1, p. 36-40. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.154>

STRATUS. Stratus FRP, 2020. Processo de Pultrusão. Disponível em: <[http://www.stratusfrp.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=13&Itemid=25](http://www.stratusfrp.com/index.php?option=com_content&view=article&id=13&Itemid=25)>. Acesso em: 16 de novembro de 2020.

SUN, Y.; JIN, Z.; ZHANG, X.; ZHANG, S.; HE, S.; PANG, B. (2023). Initial stage degradation of GFRP bars based on functional group ratio change using FTIR in high temperature and alkaline solution. *Journal of Building Engineering*, v. 68, 106190. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106190>

SUN, J. H.; SU, N. J.; HE, Z. Q.; JIA, R. X.; LIU, Y.; LIN, F. K.; KA, T. A. (2024). Durability of concrete-encapsulated GFRP bars subjected to seawater immersion. *Case Studies in Construction Materials*, v. 20, e03249. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03249>

TANNOUS, F. E.; SAADATMANESH, H. (1999). Durability of AR glass fiber reinforced plastic bars. *Journal of Composites for Construction*, v. 3, n. 1, p. 12-19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1999\)3:1\(12\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1999)3:1(12))

TAVARES, D. H. (2006). Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de GFRP. 2006. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

TENNENT, N. H. (1979). Clear and pigmented epoxy resins for stained glass conservation: Light ageing studies. *Studies in Conservation*, v. 24, n. 4, p. 153-164. <https://doi.org/10.1179/sic.1979.018>

THOMASON, J. L. (1995). The interface region in glass fibre-reinforced epoxy resin composites: 2. Water absorption, voids and the interface. *Composites*, v. 26, n. 7, p. 477-485. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(95\)96805-G](https://doi.org/10.1016/0010-4361(95)96805-G)

THOMASON, J.; XYPOLIAS, G. (2023). Hydrothermal Ageing of Glass Fibre Reinforced Vinyl Ester Composites: A Review. *Polymers*, v. 15, n. 4, 835. <https://doi.org/10.3390/polym15040835>

TSOTSIS, T. K. (1995). Thermo-oxidative aging of composite materials. *Journal of Composite Materials*, v. 29, n. 3. <https://doi.org/10.1177/002199839502900307>

TU, J.; XIE, H.; GAO, K. (2020). Prediction of the long-term performance and durability of GFRP bars under the combined effect of a sustained load and severe environments. *Materials*, v. 13, n. 10, p. 1 – 18. <https://doi.org/10.3390/ma13102341>

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Why is the ocean salty? USGS, Reston, VA, 11 maio 2023. Disponível em: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/why-ocean-salty#overview>. Acesso em: 25 jun. 2025.

UOMOTO, T.; NISHIMURA, T. (1997). Development of new alkali resistant hybrid AGFRP rod. In: *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, v. 2, p. 67-74, Sapporo, Japan.

VIJAY, P. V.; GANGARAO, H. V. S. (2001). Bending behavior and deformability of Glass Fiber-Reinforced Polymer reinforced concrete members. *ACI Structural Journal*, v. 98, n. 6, p. 834-842. <https://doi.org/10.14359/10750>

VISCO, A. M.; BRANCATO, V.; CAMPO, N. (2011). Degradation effects in polyester and vinyl ester resin induced by accelerated aging in seawater. *Journal of Composite Materials*, v. 46, n. 17, p. 2025-2040. <https://doi.org/10.1177/0021998311428533>

WANG, Y. C.; WONG, P. M. H.; KODUR, V. (2007). An experimental study of the mechanical Properties of fibre reinforced Polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures. *Composite Structures*, v. 80, n. 1, p. 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.04.069>

WANG, J.; GANGARAO, H.; LIANG, R.; LIU, W. (2016). Durability and prediction models of fiber-reinforced polymer composites under various environmental conditions: A critical review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 35, n. 3, p. 1-33. <https://doi.org/10.1177/0731684415610920>

WANG, Z.; ZHAO, X.; XIAN, G.; WU, G.; RAMAN, R. K. S.; AL-SAAD, S. (2017a). Durability study on interlaminar shear behaviour of basalt-, glass- and carbon-fibre reinforced Polymer (B/G/CFRP) bars in seawater sea sand concrete environment. *Construction and Building Materials*, v. 156, p. 985-1004. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.045>

WANG, Z.; ZHAO, X.; XIAN, G.; WU, G.; RAMAN, R. K. S.; AL-SAAD, S.; HAQUE, A. (2017b). Long-term durability of basalt- and glass-fibre reinforced polymer (BFRP/GFRP) bars in seawater and sea sand concrete environment. *Construction and Building Materials*, v. 139, p. 467-489. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.038>

WANG, L.; YADONG, M.; HAIBO, L.; SHUANG, C.; WEI, L. (2018a). Bond Properties between FRP bars and coral concrete under seawater conditions at 30, 60, and 80 °C. *Construction and Building Materials*, v. 162, p. 442-449. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.058>

WANG, Z.; ZHAO, X.; XIAN, G.; WU, G.; RAMAN, R. K. S.; AL-SAAD, S. (2018b). Effect of sustained load and seawater and sea sand concrete environment on durability of basalt- and glass-fibre reinforced polymer (B/GFRP) bars. *Corrosion Science*, v. 138, p. 200-218. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.04.002>

WANG, A.; XIAN, G.; LI, H. (2019). Effects of Fiber Surface Grafting with Nano-Clay on the Hydrothermal Ageing Behavior of Flax Fiber/Epoxy Composite Plates. *Polymers*, v. 11, n. 8, 1278. <https://doi.org/10.3390/polym11081278>

WANG, Z.; XIE, J.; LI, J.; LIU, P.; SHI, C.; LU, Z. (2022). Flexural behaviour of seawater-sea sand concrete beams reinforced with GFRP bars: Effects of the reinforcement ratio, stirrup ratio, shear span ratio and prestress level. *Journal of Building Engineering*, v. 54, 104566. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104566>

WANG, Z.; XIE, J.; MAI, Z.; LIU, P.; LU, Z.; LI, L. (2023). Durability of GFRP bar-reinforced seawater-sea sand concrete beams: Coupled effects of sustained loading and exposure to a chloride environment. *Engineering Structures*, v. 283. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115814>

WANG, Y.; XIONG, Z.; WANG, X.; LIU, D.; JIN, Y.; ZHOU, Y.; LI, W.; ZHAN, B. (2024). Deterioration mechanism and hardness degradation for GFRP bars used in marine concrete structures. *Case Studies in Construction Materials*, v. 20, e02932. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02932>

WEBER, A. (2006a). Advanced reinforcement technology with GFRP Rebar. In: *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International fib Congress, Nápoles, Itália*.

WEBER, A. (2006b). Durability approach for GFRP Rebars. *Proceedings of the Third International Conference of FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2006)*, Miami, Flórida, EUA.

WEI, B.; CAO, H.; SONG, S. (2010). Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after Chemical treatment. *Materials & Design*, v. 31, n. 9, p. 4244-4250. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.009>

WEITSMAN, Y. J. *Fluid effects in polymers and polymeric composites. Mechanical engineering series*, Springer, 2012.

WON, J. P.; LEE, S. J.; KIM, Y. J.; JANG, C. I.; LEE, S. W. (2008). The effect of exposure to alkaline solution and water on the strength-porosity relationship of GFRP rebar. *Composites Part B: Engineering*, v. 3, n. 5, p. 764-772. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.11.002>

WON, J. P.; YOON, Y. N.; HONG, B. T.; CHOI, T. J.; LEE, S. J. (2012). Durability characteristics of nano-GFRP composites reinforcing bars for concrete structures in moist and alkaline environments. *Composite Structures*, v. 94, n. 3, p. 1236 – 1242. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.11.006>

WU, W.; HE, X.; WU, C.; HE, J.; YANG, W. (2021). Fracture performance of GFRP-RC beams with working cracks in alkaline environment for eight years. *Construction and Building Materials*, v. 299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123757>

WU, W.; HE, X.; HE, L.; WU, C.; HE, J.; ZHU, A. (2022a). Joints fatigue damage prediction for a steel Truss suspension bridge considering corrosion environment. *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 47, n. 4, p. 4879-4892. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06318-8>

WU, W.; HE, X.; YANG, W.; DAI, L.; WANG, Y.; HE, J. (2022b). Long-time durability of GFRP bars in the alkaline concrete environment for eight years. *Construction and Building Materials*, v. 314, part A. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125573>

WU, W.; HE, X.; YI, Z.; ZHU, Z.; HE, J.; WANG, W.; ZHAO, C. (2022c). Flexural fatigue behaviors of high-content hybrid fiber-polymer concrete. *Construction and Building Materials*, v. 349. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128772>

WU, C.; MENG, B. C.; TAM, L.; HE, L. (2022d). Yellowing mechanisms of epoxy and vinyl ester resins under thermal, UV and natural aging conditions and protection methods. *Polymer Testing*, v. 114, 107708. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107708>

WU, W.; HE, X.; YANG, W.; ALAM, M. S.; WEI, B.; HE, J. (2023). Degradation factors and microstructure degradation characteristics of B/GFRP bars in harsh environment: A review. *Construction and Building Materials*, v. 366, p. 1 – 21. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130246>

XIAO, J.; QIANG, C.; NANNI, A.; ZHANG, K. (2017). Use of sea-sand and seawater in concrete construction: Current status and future opportunities. *Construction and Building Materials*, v. 155, p. 1101-1111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.130>

XIONG, Z.; LIN, L.; QIAO, S.; LI, L.; LI, Y.; HE, S.; LI, Z.; LIU, F.; CHEN, Y. (2022). Axial performance of seawater sea-sand concrete columns reinforced with basalt fibre-reinforced polymer bars under concentric compressive load. *Journal of Building Engineering*, v. 47, 103828. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103828>

YANG, Y.; XIAN, G.; LI, H.; SUI, L. (2015). Thermal aging of an anhydride-cured epoxy resin. *Polymer Degradation and Stability*, v. 118, p. 111-119. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.04.017>

YANG, W.; HE, X.; DAI, L.; ZHAO, X.; SHEN, F. (2016). Fracture performance of GFRP bars embedded in concrete beams with cracks in a alkaline environment. *Journal of Composites for Construction*, v. 20, n. 6. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.000006](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.000006)

YANG, W.; TANG, Z.; WU, W.; ZHANG, K.; YUAN, J.; LI, H.; FENG, Z. (2022). Effect of different fibers on impermeability of steam cured recycled concrete. *Construction and Building Materials*, v. 328. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127063>

YOUNG, T. J.; MONCLUS, M.; BROUGHTON, W. R.; OGIN, S. L.; SMITH, P. A. (2012). Observations on interphase characterisation in Polymer composites by nanoscale indentation and use of AFM cantilever torsion to identify measurement artefacts. *Plastics, Rubber and Composites*, v. 41, n. 6, p. 240-246. <https://doi.org/10.1179/1743289811Y.0000000031>

YOUNIS, A.; EBEAD, U.; SURANENI, P.; NANNI, A. (2018). Fresh and hardened properties of seawater-mixed concrete. *Construction and Building Materials*, v. 190, p. 276 – 286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.126>

YOUSIF, E.; HADDAD, R. (2013). Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review. *SpringerPlus*, v. 2, n. 398. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-398>

YU, Y.; LIU, S.; PAN, Y.; MIU, X.; LIU, J. (2021). Durability of glass fiber-reinforced polymer bars in water and simulated concrete pore solution. *Construction and Building Materials*, v. 299, 123995. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123995>

ZHANG, J.; XU, Y. C.; HUANG, P. (2009). Effect of cure cycle on curing process and hardness for epoxy resin. *eXPRESS Polymer Letters*, v. 3, n. 9, p. 534-541. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2009.67>

ZHONG, Y.; ZHOU, J. (1999). Study of Thermal and Hygrothermal Behaviors of Glass/Vinyl Ester Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 18, n. 17. <https://doi.org/10.1177/073168449901801706>

ZHOU, Y.; GAO, H.; HU, Z.; QIU, Y.; GUO, M.; HUANG, X.; HU, B. (2021). Ductile, durable, and reliable alternative to FRP bars for reinforcing seawater sea-sand recycled concrete beams: steel/FRP composite bars. *Construction and Building Materials*, v. 269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121264>

ZHU, H. G.; LEUNG, C. K. L.; KIM, J. K.; LIU, M. Y. (2011). Degradation of glass fiber-reinforced plastic composites containing nanoclay in alkaline environment. *Journal of Composite Materials*, v. 45, n. 21, p. 2147 - 2156. <https://doi.org/10.1177/0021998311401064>

# APÊNDICE A

Apresentam-se, a seguir, os resultados completos e o passo a passo dos cálculos realizados para determinação da capacidade resistente teórica da viga de concreto armada com barras de GFRP mantida em solução salina durante 1000 horas (V\_ACP\_GFRP\_1000h), a qual foi ensaiada por Mazzú (2020). Os cálculos para as demais vigas seguiram os mesmos procedimentos.

## A.1 ACI 440.11 (2022)

A Tabela 67 apresenta os dados utilizados para o cálculo da capacidade resistente, segundo o ACI 440.11 (2022), das vigas com armadura de GFRP ensaiadas por Mazzú (2020).

**Tabela 67: Características das vigas – ACI 440.11 (2022)**

<b>Seção transversal</b>	
b (mm)	120
h (mm)	200
d (mm)	175
c (mm)	15
L (mm)	2300
<b>Concreto</b>	
$\epsilon_{cu}$ (‰)	3,0
$f_c'$ (V_LAB_GFRP_45d) (MPa)	32,79
$f_c'$ (V_LAB_GFRP_1000h) (MPa)	33,49
$f_c'$ (V_ACP_GFRP_1000h) (MPa)	34,60
<b>Armadura longitudinal</b>	
nº barras	2
$\phi_l$ (mm)	10
$A_f$ (mm <sup>2</sup> )	157,08
$f_{fu}^*$ (MPa)	1047
$E_f$ (GPa)	48
$\epsilon_{fu}^*$ (‰)	21,81
<b>Armadura transversal</b>	
$f_{yk}$ (MPa)	600
$\phi_t$ (mm)	5
s (mm)	100

Para levar em consideração a ação do ambiente, a norma recomenda a utilização de um coeficiente  $C_E$  igual a 0,85. Desta forma, foi possível obter os valores de cálculo da resistência à tração e deformação última da barra de GFRP.

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^* = 0,85 \cdot 1047 = 889,95 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{fu} = f_{fu}/E_f = 889,95/48 = 18,54 \text{ ‰}$$

Para determinar o modo de ruína que governa o elemento estrutural, determinou-se a taxa de armadura e a taxa de armadura balanceada, bem como o parâmetro  $\beta_1$ .

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d} = \frac{157,08}{120 \cdot 175} = 0,0075 = 0,75 \%$$

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \cdot \frac{(f'_c - 27,6)}{6,9} = 0,85 - 0,05 \cdot \frac{(34,60 - 27,6)}{6,9} = 0,799$$

$$\rho_{fb} = 0,85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_{tu}} \cdot \frac{E_f \cdot \varepsilon_{cu}}{E_f \cdot \varepsilon_{cu} + f_{tu}} = 0,85 \cdot 0,799 \cdot \frac{34,60}{889,95} \cdot \frac{48 \cdot 3,0}{48 \cdot 3,0 + 889,95}$$

$$\rho_{fb} = 0,0037 = 0,37 \%$$

Desta forma, como  $\rho_f \geq \rho_{fb}$ , o modo de ruína é o esmagamento do concreto comprimido e a tensão instalada na armadura de GFRP, a qual é inferior à resistência à tração da barra, foi determinada conforme apresentado a seguir.

$$f_f = \left( \sqrt{\frac{(E_f \cdot \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f'_c}{\rho_f} \cdot E_f \cdot \varepsilon_{cu} - 0,5 \cdot E_f \cdot \varepsilon_{cu}} \right) \leq f_{tu}$$

$$f_f = \left( \sqrt{\frac{(48 \cdot 3,0)^2}{4} + \frac{0,85 \cdot 0,799 \cdot 34,60}{0,0075} \cdot 48 \cdot 3,0 - 0,5 \cdot 48 \cdot 3,0} \right)$$

$$f_f = 604,55 \text{ MPa}$$

Conhecendo-se a tensão instalada na barra de GFRP foi possível determinar a altura do diagrama retangular equivalente de tensões no concreto, e, conseqüentemente o momento nominal resistido pela seção transversal.

$$a = \frac{A_f \cdot f_f}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} = \frac{157,08 \cdot 604,55}{0,85 \cdot 34,60 \cdot 120} = 26,91 \text{ mm}$$

$$M_n = A_f \cdot f_f \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right) = 157,08 \cdot 604,55 \cdot \left( 175 - \frac{26,91}{2} \right) = 15,34 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Para este valor de momento nominal (não minorado), tendo em vista o esquema estático da viga (Figura 122), foi obtida a força resistida pela seção transversal.

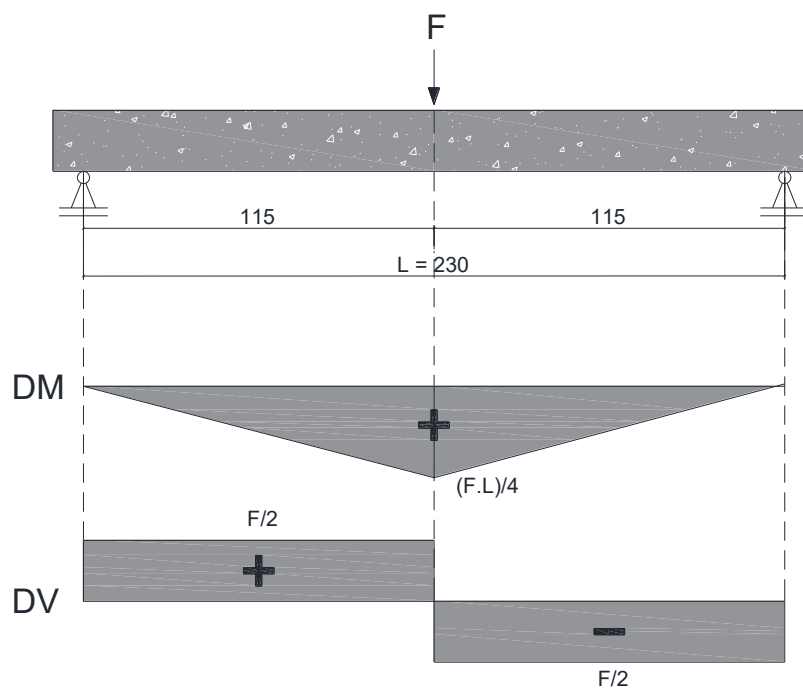
$$F_n = \frac{4 \cdot M_n}{L} = \frac{4 \cdot 15,34}{2,30} = 26,68 \text{ kN}$$

O momento resistente de cálculo pode ser obtido minorando-se o momento resistente nominal pelo coeficiente  $\phi$ , o qual é igual a 0,65 caso  $\rho_f \geq 1,4\rho_{fb}$ . Determinou-se, então, a força resistida pela seção transversal considerando-se o momento resistente de cálculo.

$$M_u = \phi \cdot M_n = 0,65 \cdot 15,34 = 9,97 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$F_u = \frac{4 \cdot M_u}{L} = \frac{4 \cdot 9,97}{2,30} = 17,34 \text{ kN}$$

**Figura 122: Diagrama de momento fletor (DM) e esforço cortante (DV) na viga de concreto armado – unidades em centímetros**



Fonte: Próprio autor

A Tabela 68 apresenta os resultados teóricos de capacidade resistente obtidos para as vigas ensaiadas por Mazzú (2020).

**Tabela 68: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_LAB\_GFRP\_45d, V\_LAB\_GFRP\_1000h e V\_ACP\_GFRP\_1000h de Mazzú (2020) utilizando-se o ACI 440.11 (2022)**

V_LAB_GFRP_45d		V_LAB_GFRP_1000h		V_ACP_GFRP_1000h	
$C_E$	0,85	$C_E$	0,85	$C_E$	0,85
<b>Propriedades</b>					
$f_{tu}$ (MPa)	889,95	$f_{tu}$ (MPa)	889,95	$f_{tu}$ (MPa)	889,95
$\epsilon_{tu}$ (‰)	18,54	$\epsilon_{tu}$ (‰)	18,54	$\epsilon_{tu}$ (‰)	18,54
<b>Modo de ruína</b>					
$\rho_f$ (%)	0,75	$\rho_f$ (%)	0,75	$\rho_f$ (%)	0,75
$\beta_1$	0,812	$\beta_1$	0,807	$\beta_1$	0,799
$\rho_{fb}$ (%)	0,35	$\rho_{fb}$ (%)	0,36	$\rho_{fb}$ (%)	0,37
Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto	
<b>Momento resistente</b>					
$f_r$ (MPa)	592,14	$f_r$ (MPa)	597,04	$f_r$ (MPa)	604,55
$a$ (mm)	27,81	$a$ (mm)	27,45	$a$ (mm)	26,91
$M_n$ (kN.m)	14,98	$M_n$ (kN.m)	15,12	$M_n$ (kN.m)	15,34
$\phi$	0,65	$\phi$	0,65	$\phi$	0,65
$M_u$ (kN.m)	9,74	$M_u$ (kN.m)	9,83	$M_u$ (kN.m)	9,97

Tabela 68: Continuação...

Força resistida					
$F_n$ (kN)	26,06	$F_n$ (kN)	26,30	$F_n$ (kN)	26,68
$F_u$ (kN)	16,94	$F_u$ (kN)	17,10	$F_u$ (kN)	17,34

## A.2 CAN CSA S806 (2012)

A Tabela 69 apresenta os dados das vigas com armadura de GFRP ensaiadas por Mazzú (2020) utilizados para o cálculo da capacidade resistente segundo o CAN CSA S806 (2012).

Tabela 69: Características das vigas – CAN CSA S806 (2012)

Seção transversal	
b (mm)	120
h (mm)	200
d (mm)	175
c (mm)	15
L (mm)	2300
Concreto	
$\epsilon_{cu}$ (‰)	3,5
$f'_c$ (V_LAB_GFRP_45d) (MPa)	32,79
$f'_c$ (V_LAB_GFRP_1000h) (MPa)	33,49
$f'_c$ (V_ACP_GFRP_1000h) (MPa)	34,60
$\phi_c$	0,65
Armadura longitudinal	
$n^\circ$ barras	2
$\phi_l$ (mm)	10
$A_f$ (mm <sup>2</sup> )	157,08
$f_{fu}$ (MPa)	1047
$E_f$ (GPa)	48
$\epsilon_{fu}$ (‰)	21,81
$\phi_f$	0,75
Armadura transversal	
$f_{yk}$ (MPa)	600
$\phi_t$ (mm)	5
s (mm)	100

De acordo com o CAN CSA S806 (2012), elementos de concreto armado devem ser dimensionados para se obter ruína pelo esmagamento do concreto comprimido. Em um primeiro momento foram desconsiderados os coeficientes de redução da resistência à tração do GFRP e da resistência à compressão do concreto, assim, as resistências de cálculo do concreto e do GFRP são iguais 34,60 MPa e 1047 MPa, respectivamente.

Os parâmetros que determinam a tensão e a altura do diagrama retangular equivalente de tensões no concreto foram calculados como apresentado a seguir:

$$\alpha_1 = 0,85 - 0,0015 \cdot f'_c = 0,85 - 0,0015 \cdot 34,60 = 0,798 > 0,67$$

$$\beta_1 = 0,97 - 0,0025 \cdot f'_c = 0,97 - 0,0025 \cdot 34,60 = 0,884 > 0,67$$

Posteriormente, foi determinada a tensão de tração instalada na barra de GFRP, considerando  $\phi_f$  e  $\phi_c$  iguais a 1.

$$\phi_f \cdot f_f = \left( \sqrt{\frac{(E_f \cdot \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{\alpha_1 \cdot \beta_1 \cdot \phi_c \cdot f'_c \cdot b \cdot d}{A_f} \cdot E_f \cdot \varepsilon_{cu}} - 0,5 \cdot E_f \cdot \varepsilon_{cu} \right)$$

$$1 \cdot f_f = \left( \sqrt{\frac{(48 \cdot 3,5)^2}{4} + \frac{0,798 \cdot 0,884 \cdot 1 \cdot 34,60 \cdot 120 \cdot 175}{157,08} \cdot 48 \cdot 3,5} - 0,5 \cdot 48 \cdot 3,5 \right)$$

$$f_f = 660,99 \text{ MPa}$$

Desta forma, foi possível determinar a profundidade da linha neutra e o momento resistente da seção transversal.

$$c = \frac{A_f \cdot \phi_f \cdot f_f}{\alpha_1 \cdot \phi_c \cdot f'_c \cdot b \cdot \beta_1} = \frac{157,08 \cdot 1 \cdot 660,99}{0,798 \cdot 1 \cdot 34,60 \cdot 120 \cdot 0,884} = 35,46 \text{ mm}$$

$$M_f = A_f \cdot \phi_f \cdot f_f \cdot \left( d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) = 157,08 \cdot 1 \cdot 1047 \cdot \left( 175 - \frac{0,884 \cdot 35,46}{2} \right)$$

$$M_f = 16,54 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Por fim, determinou-se a força resistida pela seção transversal, tal como apresentado a seguir.

$$F_f = \frac{4 \cdot M_f}{L} = \frac{4 \cdot 16,54}{2,30} = 28,77 \text{ kN}$$

Considerando-se a aplicação dos coeficientes de redução das resistências do concreto ( $\phi_c = 0,65$ ) e do GFRP ( $\phi_f = 0,75$ ), as resistências de cálculo do concreto e do GFRP são calculadas de acordo com as equações a seguir.

$$f'_{c,f} = \phi_c \cdot f'_c = 0,65 \cdot 34,60 = 22,49 \text{ MPa}$$

$$f_{fu,f} = \phi_f \cdot f_{fu} = 0,75 \cdot 1047 = 785,25 \text{ MPa}$$

Como os parâmetros que determinam a tensão e a altura do diagrama retangular equivalente de tensões no concreto dependem da resistência à compressão do concreto não minorada, os valores permanecem os mesmos, ou seja  $\alpha_1 = 0,798$  e  $\beta_1 = 0,884$ . Assim, determinou-se a tensão instalada na barra de GFRP.

$$\phi_f \cdot f_r = \left( \sqrt{\frac{(E_f \cdot \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{\alpha_1 \cdot \beta_1 \cdot \phi_c \cdot f'_c \cdot b \cdot d}{A_f} \cdot E_f \cdot \varepsilon_{cu}} - 0,5 \cdot E_f \cdot \varepsilon_{cu} \right)$$

$$\phi_f \cdot f_r = \left( \sqrt{\frac{(48 \cdot 3,5)^2}{4} + \frac{0,798 \cdot 0,884 \cdot 22,49 \cdot 120 \cdot 175}{157,08} \cdot 48 \cdot 3,5} - 0,5 \cdot 48 \cdot 3,5 \right)$$

$$\phi_f \cdot f_r = 518,69 \text{ MPa}$$

Posteriormente, determinou-se a profundidade da linha neutra, o momento resistente e a força resistida, tal como apresentado a seguir.

$$c = \frac{A_f \cdot \phi_f \cdot f_r}{\alpha_1 \cdot \phi_c \cdot f'_c \cdot b \cdot \beta_1} = \frac{157,08 \cdot 518,69}{0,798 \cdot 22,49 \cdot 120 \cdot 0,884} = 42,81 \text{ mm}$$

$$M_f = A_f \cdot \phi_f \cdot f_r \cdot \left( d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) = 157,08 \cdot 518,69 \cdot \left( 175 - \frac{0,884 \cdot 42,81}{2} \right)$$

$$M_f = 12,72 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$F_r = \frac{4 \cdot M_f}{L} = \frac{4 \cdot 12,72}{2,30} = 22,12 \text{ kN}$$

Ressalta-se que o CAN CSA S806 (2012) não apresenta formulação que considere os efeitos da exposição ambiental. A Tabela 70 a Tabela 72 apresentam os resultados teóricos de capacidade resistente obtidos para as vigas ensaiadas por Mazzú (2020).

**Tabela 70: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_LAB\_GFRP\_45d de Mazzú (2020) utilizando-se o CAN CSA S806 (2012)**

V_LAB_GFRP_45d			
Com redução		Sem redução	
Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto	
<b>Propriedades</b>			
$f_{c,f}$ (MPa)	21,31	$f_{c,f}$ (MPa)	32,79
$f_{ru,f}$ (MPa)	785,25	$f_{ru,f}$ (MPa)	1047
<b>Diagrama de tensões no concreto</b>			
$\alpha_1$	0,801	$\alpha_1$	0,801
$\beta_1$	0,888	$\beta_1$	0,888
<b>Tensão na armadura</b>			
$\phi_f f_r$ (MPa)	505,47	$f_r$ (MPa)	644,55
<b>Profundidade da linha neutra</b>			
$c$ (mm)	43,65	$c$ (mm)	36,18
<b>Momento resistente</b>			
$M_f$ (kN.m)	12,36	$M_f$ (kN.m)	16,09
<b>Força resistida</b>			
$F_f$ (kN)	21,49	$F_f$ (kN)	27,99

**Tabela 71: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_LAB\_GFRP\_1000h de Mazzú (2020) utilizando-se o CAN CSA S806 (2012)**

V_LAB_GFRP_1000h			
Com redução		Sem redução	
Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto	
<b>Propriedades</b>			
$f_{c,f}'$ (MPa)	21,77	$f_{c,f}'$ (MPa)	33,49
$f_{fu,f}$ (MPa)	785,25	$f_{fu,f}$ (MPa)	1047
<b>Diagrama de tensões no concreto</b>			
$\alpha_1$	0,800	$\alpha_1$	0,800
$\beta_1$	0,886	$\beta_1$	0,886
<b>Tensão na armadura</b>			
$\phi_f f_r$ (MPa)	510,65	$f_r$ (MPa)	650,99
<b>Profundidade da linha neutra</b>			
c (mm)	43,32	c (mm)	35,90
<b>Momento resistente</b>			
$M_r$ (kN.m)	12,50	$M_r$ (kN.m)	16,27
<b>Força resistida</b>			
$F_f$ (kN)	21,73	$F_f$ (kN)	28,29

**Tabela 72: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_ACP\_GFRP\_1000h de Mazzú (2020) utilizando-se o CAN CSA S806 (2012)**

V_ACP_GFRP_1000h			
Com redução		Sem redução	
Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto	
<b>Propriedades</b>			
$f_{c,f}'$ (MPa)	22,49	$f_{c,f}'$ (MPa)	34,60
$f_{fu,f}$ (MPa)	785,25	$f_{fu,f}$ (MPa)	1047
<b>Diagrama de tensões no concreto</b>			
$\alpha_1$	0,798	$\alpha_1$	0,798
$\beta_1$	0,884	$\beta_1$	0,884
<b>Tensão na armadura</b>			
$\phi_f f_r$ (MPa)	518,69	$f_r$ (MPa)	660,99
<b>Profundidade da linha neutra</b>			
c (mm)	42,81	c (mm)	35,46
<b>Momento resistente</b>			
$M_r$ (kN.m)	12,72	$M_r$ (kN.m)	16,54
<b>Força resistida</b>			
$F_f$ (kN)	22,12	$F_f$ (kN)	28,77

### A.3 FIB BULLETIN 40 (2007)

Com a aplicação do modelo de dimensionamento do FIB *Bulletin* 40 (2007) obteve-se modo de ruína baseado no esmagamento do concreto comprimido para as vigas V\_LAB\_GFRP\_45d e V\_LAB\_GFRP\_1000h e na ruptura da barra para as vigas V\_ACP\_GFRP\_1000h. Assim, visando a exemplificação dos cálculos realizados para ambos os modos de ruína, será apresentado o passo a passo para as vigas V\_LAB\_GFRP\_1000h e V\_ACP\_GFRP\_1000h considerando-se a utilização dos coeficientes de redução da resistência do concreto e do GFRP. No caso da desconsideração da redução da resistência, os cálculos foram realizados de maneira análoga, mas com os coeficientes de redução com valores iguais a 1.

A Tabela 73 apresenta os dados das vigas com armadura de GFRP ensaiadas por Mazzú (2020) utilizados para o cálculo da capacidade resistente segundo o FIB *Bulletin* 40 (2007).

O primeiro passo a ser realizado é a avaliação da exposição ambiental, a qual impactará nas propriedades mecânicas do FRP. Assim, para as vigas V\_LAB\_GFRP\_1000h, as quais foram mantidas em ambiente laboratorial padrão durante 1000 horas, foi considerado ambiente seco ( $n_{mo} = -1$ ), com temperatura média de 23 °C ( $n_T = 0,5$ ), vida útil de 50 anos ( $n_{SL} = 2,7$ ) e diâmetro igual ao ensaiado pelo fabricante ( $n_d = 0$ ). Desta forma, o parâmetro  $n$  foi calculado conforme apresentado a seguir.

$$n = n_{mo} + n_T + n_{SL} + n_d = -1 + 0,5 + 2,7 + 0 = 2,2$$

**Tabela 73: Características das vigas – FIB *Bulletin* 40 (2007)**

<b>Seção transversal</b>	
b (mm)	120
h (mm)	200
d (mm)	175
c (mm)	15
L (mm)	2300
<b>Concreto</b>	
$\epsilon_{cu}$ (‰)	3,5
$f_{ck}$ (V_LAB_GFRP_45d) (MPa)	32,79
$f_{ck}$ (V_LAB_GFRP_1000h) (MPa)	33,49
$f_{ck}$ (V_ACP_GFRP_1000h) (MPa)	34,60
<b>Armadura longitudinal</b>	
nº barras	2
$\phi_l$ (mm)	10
$A_l$ (mm <sup>2</sup> )	157,08
$f_{fk,0}$ (MPa)	1047
$E_f$ (GPa)	48
$\epsilon_{fu}$ (‰)	21,81
<b>Armadura transversal</b>	
$f_{yk}$ (MPa)	600
$\phi_t$ (mm)	5
s (mm)	100

O parâmetro  $R_{10}$  foi tomado igual a 25 %, conforme a Tabela 18, e, como as vigas V\_LAB\_GFRP\_1000h permaneceram em ambiente laboratorial (interno e protegido), espera-se que a resistência à tração do GFRP se mantenha durante as 1000 horas. Assim, o valor de  $f_{fk1000h}$  foi adotado igual a 1047 MPa (resistência à tração da barra fornecida pelo fabricante –  $f_{fk0}$ ). Desta maneira, pôde-se calcular o fator ambiental de redução da resistência à tração do FRP.

$$\eta_{\text{env,t}} = \frac{\frac{f_{\text{fk1000h}}}{f_{\text{fk0}}}}{\left(\frac{100 - R_{10}}{100}\right)^n} = \frac{\frac{1047}{1047}}{\left(\frac{100 - 25}{100}\right)^{2,2}} = 1,88$$

Assim, a resistência à tração de cálculo pode ser determinada, sabendo-se que o fator de redução da resistência é igual a 1,25.

$$f_{\text{fd}} = \frac{f_{\text{fk0}}}{\eta_{\text{env,t}} \cdot \gamma_f} = \frac{1047}{1,88 \cdot 1,25} = 444,81 \text{ MPa}$$

Para a determinação do modo de ruína é necessário determinar a taxa de armadura e a taxa de armadura balanceada.

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d} = \frac{157,08}{120 \cdot 175} = 0,0075 = 0,75 \%$$

$$\rho_{\text{fb}} = \frac{0,81 \cdot (f_{\text{ck}} + 8) \cdot \varepsilon_{\text{cu}}}{f_{\text{fk}} \cdot \left(\frac{f_{\text{fk}}}{E_{\text{fk}}} + \varepsilon_{\text{cu}}\right)} = \frac{0,81 \cdot (33,49 + 8) \cdot 3,5}{1047 \cdot \left(\frac{1047}{48} + 3,5\right)} = 0,0044 = 0,44 \%$$

Como  $\rho_f > \rho_{\text{fb}}$ , o modo de ruína é o esmagamento do concreto comprimido, e para a determinação do momento resistente é necessária a determinação dos parâmetros envolvidos no diagrama retangular equivalente de tensões no concreto.

$$\eta = \begin{cases} 1 & \text{se } f_{\text{ck}} \leq 50 \text{ MPa} \\ 1 - \left(\frac{f_{\text{ck}} - 50}{200}\right) & \text{se } 50 < f_{\text{ck}} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \rightarrow \eta = 1$$

$$\lambda = \begin{cases} 0,8 & \text{se } f_{\text{ck}} \leq 50 \text{ MPa} \\ 0,8 - \left(\frac{f_{\text{ck}} - 50}{400}\right) & \text{se } 50 < f_{\text{ck}} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \rightarrow \lambda = 0,8$$

Sabendo-se que o fator de redução da resistência à compressão do concreto é igual a 1,5, foram calculadas a resistência à compressão de cálculo do concreto, a deformação de tração no FRP e o fator que relaciona a profundidade da linha neutra e a altura útil.

$$f_{\text{cd}} = \frac{\alpha_{\text{cc}} \cdot f_{\text{ck}}}{\gamma_c} = \frac{1 \cdot 33,49}{1,5} = 22,33 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_f = \frac{-\varepsilon_{\text{cu}} + \sqrt{\varepsilon_{\text{cu}}^2 + \frac{4 \cdot \eta \cdot \alpha_{\text{cc}} \cdot f_{\text{ck}} \cdot \lambda \cdot \varepsilon_{\text{cu}}}{\gamma_c \cdot \rho_f \cdot E_f}}}{2}$$

$$\varepsilon_f = \frac{-3,5 + \sqrt{3,5^2 + \frac{4 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 33,49 \cdot 0,8 \cdot 3,5}{1,5 \cdot 0,0075 \cdot 48}}}{2} = 11,56 \text{ ‰}$$

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_f + \varepsilon_{cu}} = \frac{3,5}{11,56 + 3,5} = 0,23$$

Por fim, calculou-se o momento resistente e a força resistida pelo elemento estrutural.

$$M_u = \eta \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2 \cdot (\lambda \cdot \xi) \cdot \left(1 - \frac{\lambda \cdot \xi}{2}\right)$$

$$M_u = 1 \cdot 22,33 \cdot 120 \cdot 175^2 \cdot (0,8 \cdot 0,23) \cdot \left(1 - \frac{0,8 \cdot 0,23}{2}\right) = 13,84 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$F_u = \frac{4 \cdot M_u}{L} = \frac{4 \cdot 13,84}{2,30} = 24,06 \text{ kN}$$

Para as vigas V\_ACP\_GFRP\_1000h, as quais foram mantidas em tanque com solução de NaCl com concentração de 3,5 % e temperatura de  $50 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 1000h, foi considerado ambiente saturado ( $n_{mo} = 1$ ), com temperatura média de  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $n_T = 1$ ), vida útil de 50 anos ( $n_{SL} = 2,7$ ) e diâmetro igual ao ensaiado pelo fabricante ( $n_d = 0$ ). Assim, calculou-se o parâmetro  $n$ .

$$n = n_{mo} + n_T + n_{SL} + n_d = 1 + 1 + 2,7 + 0 = 4,7$$

O parâmetro  $R_{10}$  foi tomado igual a 25 %, conforme a Tabela 18, e o valor de  $f_{fk1000h}$  foi calculado conforme apresentado abaixo. Desta maneira, pôde-se calcular o fator ambiental de redução da resistência à tração do FRP.

$$f_{fk1000h} = f_{fk0} \cdot \left[\frac{100 - R_{10}}{100}\right]^2 = 1047 \cdot \left[\frac{100 - 25}{100}\right]^2 = 588,94 \text{ MPa}$$

$$\eta_{env,t} = \frac{\frac{f_{fk1000h}}{f_{fk0}}}{\left(\frac{100 - R_{10}}{100}\right)^n} = \frac{\frac{588,94}{1047}}{\left(\frac{100 - 25}{100}\right)^{4,7}} = 2,17$$

Determinou-se a resistência à tração de cálculo considerando o fator de redução da resistência à tração do FRP igual a 1,25. Foram determinadas, ainda, a taxa de armadura e a taxa de armadura balanceada para a obtenção do modo de ruína que governa o comportamento do elemento estrutural.

$$f_{fd} = \frac{f_{fk0}}{\eta_{env,t} \cdot \gamma_f} = \frac{1047}{2,17 \cdot 1,25} = 385,21 \text{ MPa}$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d} = \frac{157,08}{120 \cdot 175} = 0,0075 = 0,75 \%$$

$$\rho_{fb} = \frac{0,81 \cdot (f_{ck} + 8) \cdot \varepsilon_{cu}}{f_{fk} \cdot \left(\frac{f_{fk}}{E_{fk}} + \varepsilon_{cu}\right)} = \frac{0,81 \cdot (34,60 + 8) \cdot 3,5}{588,94 \cdot \left(\frac{588,94}{48} + 3,5\right)} = 0,0130 = 1,30 \%$$

Como  $\rho_f < \rho_{fb}$ , o modo de ruína é a ruptura da barra de FRP tracionada e a análise do equilíbrio da seção transversal torna-se complexa. Desta forma, considerando-se o pior caso para a análise da seção, assumiu-se que a deformação no concreto é igual a seu valor último (3,5 ‰ para concretos com resistência à compressão menor que 50 MPa). Assim, obteve-se o menor valor possível para o momento resistente. Foi calculado o fator que relaciona a profundidade da linha neutra e a altura útil e o parâmetro que determina a altura do diagrama retangular de tensões no concreto. Por fim, foi calculado o momento resistente e a força resistida pelo elemento estrutural. A Tabela 74 a Tabela 76 apresentam os resultados teóricos de capacidade resistente obtidos para as vigas ensaiadas por Mazzú (2020).

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{3,5}{21,81 + 3,5} = 0,14$$

$$\lambda = \begin{cases} 0,8 & \text{se } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 0,8 - \left( \frac{f_{ck} - 50}{400} \right) & \text{se } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \rightarrow \lambda = 0,8$$

$$M_u = A_f \cdot f_{fd} \cdot d \cdot \left( 1 - \frac{\lambda \cdot \xi}{2} \right) = 157,08 \cdot 385,21 \cdot 175 \cdot \left( 1 - \frac{0,8 \cdot 0,14}{2} \right) = 10,00 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$F_u = \frac{4 \cdot M_u}{L} = \frac{4 \cdot 10,00}{2,30} = 17,40 \text{ kN}$$

**Tabela 74: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_LAB\_GFRP\_45d de Mazzú (2020) utilizando-se o FIB *Bulletin* 40 (2007)**

V_LAB_GFRP_45d			
Com redução		Sem redução	
<b>Propriedades de projeto</b>			
$\gamma_f$	1,25	$\gamma_f$	1
$f_{fd}$ (MPa)	837,6	$f_{fd}$ (MPa)	1047
<b>Modo de ruína</b>			
$\rho_f$ (%)	0,75	$\rho_f$ (%)	0,75
$\rho_{fb}$ (%)	0,44	$\rho_{fb}$ (%)	0,44
Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto	
<b>Momento resistente</b>			
$\eta$	1,00	$\eta$	1,00
$\gamma_c$	1,5	$\gamma_c$	1
$\alpha_{cc}$	1,00	$\alpha_{cc}$	1,00
$f_{cd}$ (MPa)	21,86	$f_{cd}$ (MPa)	32,79
$\lambda$	0,8	$\lambda$	0,8
$\epsilon_f$ (‰)	11,42	$\epsilon_f$ (‰)	14,34
$\xi$	0,23	$\xi$	0,20
$M_u$ (kN.m)	13,66	$M_u$ (kN.m)	17,43
<b>Força resistida</b>			
$F_u$ (kN)	23,75	$F_u$ (kN)	30,32

**Tabela 75: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_LAB\_GFRP\_1000h de Mazzú (2020) utilizando-se o FIB *Bulletin* 40 (2007)**

V_LAB_GFRP_1000h			
Com redução		Sem redução	
$n_{mo}$	-1	$n_{mo}$	-1
$n_T$	0,5	$n_T$	0,5
$n_{SL}$	2,7	$n_{SL}$	2,7
$n_d$	0	$n_d$	0
$n$	2,2	$n$	2,2
$R_{10}$ (%)	25	$R_{10}$ (%)	25
$f_{fk,1000h}$ (MPa)	1047	$f_{fk,1000h}$ (MPa)	1047
$\eta_{env,t}$	1,88	$\eta_{env,t}$	1,88
Propriedades de projeto			
$\gamma_f$	1,25	$\gamma_f$	1
$f_{fd}$ (MPa)	444,81	$f_{fd}$ (MPa)	556,01
Modo de ruína			
$\rho_f$ (%)	0,75	$\rho_f$ (%)	0,75
$\rho_{fb}$ (%)	0,44	$\rho_{fb}$ (%)	0,44
Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto	
Momento resistente			
$\eta$	1,00	$\eta$	1,00
$\gamma_c$	1,5	$\gamma_c$	1
$\alpha_{cc}$	1,00	$\alpha_{cc}$	1,00
$f_{cd}$ (MPa)	22,33	$f_{cd}$ (MPa)	33,49
$\lambda$	0,8	$\lambda$	0,8
$\epsilon_f$ (‰)	11,56	$\epsilon_f$ (‰)	14,51
$\xi$	0,23	$\xi$	0,19
$M_u$ (kN.m)	13,84	$M_u$ (kN.m)	17,65
Força resistida			
$F_u$ (kN)	24,06	$F_u$ (kN)	30,70

**Tabela 76: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_ACP\_GFRP\_1000h de Mazzú (2020) utilizando-se o FIB *Bulletin* 40 (2007)**

V_ACP_GFRP_1000h			
Com redução		Sem redução	
$n_{mo}$	1	$n_{mo}$	1
$n_T$	1	$n_T$	1
$n_{SL}$	2,7	$n_{SL}$	2,7
$n_d$	0	$n_d$	0
$n$	4,7	$n$	4,7
$R_{10}$ (%)	25	$R_{10}$ (%)	25
$f_{fk,1000h}$ (MPa)	588,94	$f_{fk,1000h}$ (MPa)	588,94
$\eta_{env,t}$	2,17	$\eta_{env,t}$	2,17
Propriedades de projeto			
$\gamma_f$	1,25	$\gamma_f$	1
$f_{fd}$ (MPa)	385,21	$f_{fd}$ (MPa)	481,52
Modo de ruína			
$\rho_f$ (%)	0,75	$\rho_f$ (%)	0,75
$\rho_{fb}$ (%)	1,30	$\rho_{fb}$ (%)	1,30
Ruptura da barra		Ruptura da barra	

**Tabela 76: Continuação...**

<b>Momento resistente</b>			
Assumindo a deformação no concreto igual a deformação última (pior caso)			
$\epsilon_c$ (‰)	3,5	$\epsilon_c$ (‰)	3,5
$\xi$	0,14	$\xi$	0,14
$\lambda$	0,8	$\lambda$	0,8
$M_u$ (kN.m)	10,00	$M_u$ (kN.m)	12,50
<b>Força resistida</b>			
$F_u$ (kN)	17,40	$F_u$ (kN)	21,75

**A.4 SP 295.1325800 (2017)**

A Tabela 77 apresenta os dados das vigas com armadura de GFRP ensaiadas por Mazzú (2020) utilizados para o cálculo da capacidade resistente segundo o SP 295.1325800 (2017).

**Tabela 77: Características das vigas – SP 295.1325800 (2017)**

<b>Seção transversal</b>	
b (mm)	120
h (mm)	200
$h_0$ (mm)	175
c (mm)	15
L (mm)	2300
<b>Concreto</b>	
$\epsilon_{b2}$ (‰)	3,5
$R_b$ (V_LAB_GFRP_45d) (MPa)	32,79
$R_b$ (V_LAB_GFRP_1000h) (MPa)	33,49
$R_b$ (V_ACP_GFRP_1000h) (MPa)	34,60
$\gamma_b$	1,3
<b>Armadura longitudinal</b>	
nº barras	2
$\phi_l$ (mm)	10
$A_f$ (mm <sup>2</sup> )	157,08
$R_{f,n}$ (MPa)	1047
$E_{f,n}$ (GPa)	48
$\epsilon_{fu,n}$ (‰)	21,81
<b>Armadura transversal</b>	
$f_{yk}$ (MPa)	600
$\phi_t$ (mm)	5
s (mm)	100

As vigas V\_ACP\_GFRP\_1000h permaneceram em tanque com solução salina durante 1000 horas, assim, considerou-se exposição ambiental externa, resultando em  $\gamma_{r1}$  igual a 0,7. Desta forma, considerando-se os fatores de redução da resistência à tração da barra igual a 1,5 e da resistência à compressão do concreto igual a 1,3, foi possível obter os valores de cálculo da resistência à tração da barra de GFRP, da deformação última do GFRP e da resistência à compressão do concreto.

$$R_f = \frac{\gamma_{f1} \cdot R_{f,n}}{\gamma_f} = \frac{0,7 \cdot 1047}{1,5} = 488,60 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{f,ult} = \frac{R_f}{E_f} = \frac{488,60}{48} = 10,18 \text{ ‰}$$

$$R_b = \frac{R_{b,n}}{\gamma_b} = \frac{34,60}{1,3} = 26,62 \text{ MPa}$$

Neste trabalho, como o modelo de dimensionamento foi aplicado em vigas de concreto armado com seção retangular, a obtenção da capacidade resistente se deu com base nas forças últimas. Assim, primeiramente foi calculada a profundidade da linha neutra, sabendo-se que o parâmetro que determina a região comprimida de concreto no diagrama retangular equivalente de tensões é igual a 0,8.

$$E_{b2} = \frac{R_b}{\varepsilon_{b2}} = \frac{26,62}{3,5} = 7,60 \text{ GPa}$$

$$\alpha_2 = \frac{E_f}{E_{b2}} = \frac{48}{7,60} = 6,31$$

$$\mu_f = \frac{A_f}{b \cdot h_0} = \frac{157,08}{120 \cdot 175} = 0,0075 = 0,75 \text{ ‰}$$

$$x = \sqrt{(0,5 \cdot \mu_f \cdot \alpha_2 \cdot h_0)^2 + \mu_f \cdot \alpha_2 \cdot h_0^2 \cdot \omega} - 0,5 \cdot \mu_f \cdot \alpha_2 \cdot h_0$$

$$x = \sqrt{(0,5 \cdot 0,0075 \cdot 6,31 \cdot 175)^2 + 0,0075 \cdot 6,31 \cdot 175^2 \cdot 0,8} - 0,5 \cdot 0,0075 \cdot 6,31 \cdot 175$$

$$x = 30,13 \text{ mm}$$

Conhecendo-se a profundidade da linha neutra, foi possível determinar o modo de ruína que governa o comportamento do elemento estrutural, comparando-se os parâmetros  $\xi$  e  $\xi_R$ .

$$\xi = \frac{x}{h_0} = \frac{30,13}{175} = 0,17$$

$$\xi_R = \frac{x_R}{h_0} = \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_{f,ult}}{\varepsilon_{b2}}} = \frac{1}{1 + \frac{10,18}{3,5}} = 0,26$$

Assim, como  $\xi_R > \xi$ , a ruína é governada pelo esmagamento do concreto comprimido e, desta forma, pôde-se determinar o momento resistente e a respectiva força resistida.

$$M_{ult} = R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - 0,5 \cdot x)$$

$$M_{ult} = 26,62 \cdot 120 \cdot 30,13 \cdot (175 - 0,5 \cdot 30,13) = 15,39 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$F_{ult} = \frac{4 \cdot M_{ult}}{L} = \frac{4 \cdot 15,39}{2,30} = 26,77 \text{ kN}$$

Desconsiderando-se a aplicação dos coeficientes de redução da resistência à tração do FRP e à compressão do concreto ( $\gamma_f$  e  $\gamma_b$  iguais a 1), pôde-se obter os valores de cálculo da resistência à tração da barra de GFRP, da deformação última do GFRP e da resistência à compressão do concreto.

$$R_f = \frac{\gamma_{f1} \cdot R_{f,n}}{\gamma_f} = \frac{0,7 \cdot 1047}{1,0} = 732,90 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{f,ult} = \frac{R_f}{E_f} = \frac{732,90}{48} = 15,27 \text{ ‰}$$

$$R_b = \frac{R_{b,n}}{\gamma_b} = \frac{34,60}{1,0} = 34,60 \text{ MPa}$$

Posteriormente foi determinada a profundidade da linha neutra, tal como apresentado a seguir.

$$E_{b2} = \frac{R_b}{\varepsilon_{b2}} = \frac{34,60}{3,5} = 9,89 \text{ GPa}$$

$$\alpha_2 = \frac{E_f}{E_{b2}} = \frac{48}{9,89} = 4,86$$

$$\mu_f = \frac{A_f}{b \cdot h_0} = \frac{157,08}{120 \cdot 175} = 0,0075 = 0,75 \text{ ‰}$$

$$x = \sqrt{(0,5 \cdot \mu_f \cdot \alpha_2 \cdot h_0)^2 + \mu_f \cdot \alpha_2 \cdot h_0^2 \cdot \omega} - 0,5 \cdot \mu_f \cdot \alpha_2 \cdot h_0$$

$$x = \sqrt{(0,5 \cdot 0,0075 \cdot 4,86 \cdot 175)^2 + 0,0075 \cdot 4,86 \cdot 175^2 \cdot 0,8} - 0,5 \cdot 0,0075 \cdot 4,86 \cdot 175$$

$$x = 26,82 \text{ mm}$$

Determinou-se o modo de ruína que governa o comportamento do elemento estrutural, comparando-se os parâmetros  $\xi$  e  $\xi_R$ .

$$\xi = \frac{x}{h_0} = \frac{26,82}{175} = 0,15$$

$$\xi_R = \frac{x_R}{h_0} = \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_{f,ult}}{\varepsilon_{b2}}} = \frac{1}{1 + \frac{15,27}{3,5}} = 0,19$$

Por fim, sabendo-se que  $\xi_R > \xi$  (ruína governada pelo esmagamento do concreto comprimido) foi possível determinar o momento resistente e a respectiva força resistida.

$$M_{ult} = R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - 0,5 \cdot x)$$

$$M_{ult} = 34,60 \cdot 120 \cdot 26,82 \cdot (175 - 0,5 \cdot 26,82) = 17,99 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$F_{ult} = \frac{4 \cdot M_{ult}}{L} = \frac{4 \cdot 17,99}{2,30} = 31,29 \text{ kN}$$

A Tabela 78 a Tabela 80 apresentam os resultados teóricos de capacidade resistente obtidos para as vigas ensaiadas por Mazzú (2020).

**Tabela 78: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_LAB\_GFRP\_45d de Mazzú (2020) utilizando-se o SP 295.1325800 (2017)**

<b>V_LAB_GFRP_45d</b>			
<b>Com redução</b>		<b>Sem redução</b>	
<b>Propriedades de projeto</b>			
$E_f$ (GPa)	48	$E_f$ (GPa)	48
$\gamma_f$	1,5	$\gamma_f$	1
$\gamma_{f1}$	0,8	$\gamma_{f1}$	0,8
$R_f$ (MPa)	558,4	$R_f$ (MPa)	837,6
$\epsilon_{f,ult}$ (‰)	11,63	$\epsilon_{f,ult}$ (‰)	17,45
<b>Linha neutra</b>			
$\omega$	0,8	$\omega$	0,8
$E_{b2}$ (GPa)	7,21	$E_{b2}$ (GPa)	9,37
$\alpha_2$	6,66	$\alpha_2$	5,12
$\mu_f$ (%)	0,75	$\mu_f$ (%)	0,75
$x$ (mm)	30,85	$x$ (mm)	27,47
<b>Modo de ruína</b>			
$\xi$	0,18	$\xi$	0,16
$\xi_R$	0,23	$\xi_R$	0,17
Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto	
<b>Momento resistente</b>			
$M_{ult}$ (kN.m)	14,90	$M_{ult}$ (kN.m)	17,43
<b>Força resistida</b>			
$F_{ult}$ (kN)	25,91	$F_{ult}$ (kN)	30,32

**Tabela 79: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_LAB\_GFRP\_1000h de Mazzú (2020) utilizando-se o SP 195.1325800 (2017)**

<b>V_LAB_GFRP_1000h</b>			
<b>Com redução</b>		<b>Sem redução</b>	
<b>Propriedades de projeto</b>			
$E_f$ (GPa)	48	$E_f$ (GPa)	48
$\gamma_f$	1,5	$\gamma_f$	1
$\gamma_{f1}$	0,8	$\gamma_{f1}$	0,8
$R_f$ (MPa)	558,40	$R_f$ (MPa)	837,6
$\epsilon_{f,ult}$ (‰)	11,63	$\epsilon_{f,ult}$ (‰)	17,45
<b>Linha neutra</b>			
$\omega$	0,8	$\omega$	0,8
$E_{b2}$ (GPa)	7,36	$E_{b2}$ (GPa)	9,57
$\alpha_2$	6,52	$\alpha_2$	5,02
$\mu_f$ (%)	0,75	$\mu_f$ (%)	0,75
$x$ (mm)	30,56	$x$ (mm)	27,21
<b>Modo de ruína</b>			
$\xi$	0,17	$\xi$	0,16
$\xi_R$	0,23	$\xi_R$	0,17
Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto	
<b>Momento resistente</b>			
$M_{ult}$ (kN.m)	15,09	$M_{ult}$ (kN.m)	17,65
<b>Força resistida</b>			
$F_{ult}$ (kN)	26,25	$F_{ult}$ (kN)	30,70

**Tabela 80: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_ACP\_GFRP\_1000h de Mazzú (2020) utilizando-se o SP 295.1325800 (2017)**

<b>V_ACP_GFRP_1000h</b>			
<b>Com redução</b>		<b>Com redução</b>	
<b>Propriedades de projeto</b>			
$E_f$ (GPa)	48	$E_f$ (GPa)	48
$\gamma_f$	1,5	$\gamma_f$	1
$\gamma_{f1}$	0,7	$\gamma_{f1}$	0,7
$R_f$ (MPa)	488,60	$R_f$ (MPa)	732,90
$\epsilon_{f,ult}$ (‰)	10,18	$\epsilon_{f,ult}$ (‰)	15,27
<b>Linha neutra</b>			
$\omega$	0,8	$\omega$	0,8
$E_{b2}$ (GPa)	7,60	$E_{b2}$ (GPa)	9,89
$\alpha_2$	6,31	$\alpha_2$	4,86
$\mu_f$ (%)	0,75	$\mu_f$ (%)	0,75
$x$ (mm)	30,13	$x$ (mm)	26,82
<b>Modo de ruína</b>			
$\xi$	0,17	$\xi$	0,15
$\xi_R$	0,26	$\xi_R$	0,19
Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto	
<b>Momento resistente</b>			
$M_{ult}$ (kN.m)	15,39	$M_{ult}$ (kN.m)	17,99
<b>Força resistida</b>			
$F_{ult}$ (kN)	26,77	$F_{ult}$ (kN)	31,29

#### A.5 ABNT NBR 17196 (2025)

A Tabela 81 apresenta os dados das vigas com armadura de GFRP de Mazzú (2020), utilizados para o cálculo da capacidade resistente segundo a ABNT NBR 17196 (2025).

**Tabela 81: Características das vigas – ABNT NBR 17196 (2025)**

<b>Seção transversal</b>	
b (mm)	120
h (mm)	200
d (mm)	175
c (mm)	15
L (mm)	2300
<b>Concreto</b>	
$\epsilon_{cu}$ (‰)	3,5
$f_{ck}$ (V_LAB_GFRP_45d) (MPa)	32,79
$f_{ck}$ (V_LAB_GFRP_1000h) (MPa)	33,49
$f_{ck}$ (V_ACP_GFRP_1000h) (MPa)	34,60
<b>Armadura longitudinal</b>	
nº barras	2
$\phi_l$ (mm)	10
$A_f$ (mm <sup>2</sup> )	157,08
$f_{fk}$ (MPa)	1047
$E_f$ (GPa)	48
$\epsilon_{fk}$ (‰)	21,81
<b>Armadura transversal</b>	
$f_{yk}$ (MPa)	600
$\phi_t$ (mm)	5
s (mm)	100

Para todas as vigas foi considerado fator de redução ambiental ( $C_E$ ) igual a 0,85. Assim, sabendo-se que os coeficientes de redução da resistência à compressão do concreto e à tração do GFRP valem 1,4 e 1,3, respectivamente, foram determinadas as resistências de cálculo dos materiais.

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{34,60}{1,4} = 24,71 \text{ MPa}$$

$$f_{fd} = C_E \cdot \frac{f_{fk}}{\gamma_m} = 0,85 \cdot \frac{1047}{1,3} = 684,58 \text{ MPa}$$

Assim, prosseguiu-se com a determinação do modo de ruína por meio da comparação entre taxa de armadura e taxa de armadura balanceada. Segundo a ABNT NBR 17196 (2025), para concretos com resistência normal, os parâmetros  $\lambda$  e  $\alpha_c$  envolvidos na determinação do diagrama retangular equivalente de tensões no concreto são iguais a 0,8 e 0,85, respectivamente. Já o parâmetro  $\eta_c$  é igual a 1,0 para concretos com  $f_{ck} \leq 40$  MPa.

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d} = \frac{157,08}{120 \cdot 175} = 0,0075 = 0,75 \%$$

$$\rho_{fb} = \lambda \cdot \eta_c \cdot \alpha_c \cdot \frac{f_{cd}}{f_{fd}} \cdot \frac{E_f \cdot \varepsilon_{cu}}{E_f \cdot \varepsilon_{cu} + f_{fd}} = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 0,85 \cdot \frac{24,71}{684,58} \cdot \frac{48 \cdot 3,5}{48 \cdot 3,5 + 684,58} = 0,0048 = 0,48 \%$$

Como  $\rho_f > \rho_{fb}$ , o modo de ruína que governa o comportamento do elemento estrutural é baseado no esmagamento do concreto comprimido. Desta forma, pôde-se determinar a profundidade da linha neutra e a tensão de tração instalada na barra de GFRP.

$$x = \frac{1}{2 \cdot b} \cdot \frac{\varepsilon_{cu} \cdot A_f \cdot E_f}{\lambda \cdot \eta_c \cdot \alpha_c \cdot f_{cd}} \cdot \left( -1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{\lambda \cdot \eta_c \cdot \alpha_c \cdot f_{cd}}{\varepsilon_{cu} \cdot A_f \cdot E_f} \cdot b \cdot d} \right)$$

$$x = \frac{1}{2 \cdot 120} \cdot \frac{3,5 \cdot 157,08 \cdot 48}{0,8 \cdot 1,0 \cdot 0,85 \cdot 24,71} \cdot \left( -1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{0,8 \cdot 1,0 \cdot 0,85 \cdot 24,71}{3,5 \cdot 157,08 \cdot 48} \cdot 120 \cdot 175} \right) = 41,76 \text{ mm}$$

$$\sigma_{fd} = \frac{x \cdot b \cdot \eta_c \cdot \alpha_c \cdot \lambda \cdot f_{cd}}{A_f} = \frac{41,76 \cdot 120 \cdot 1,0 \cdot 0,85 \cdot 0,8 \cdot 24,71}{157,08} = 536,09 \text{ MPa}$$

Por fim, calculou-se o momento resistente e a respectiva força resistida pelo elemento estrutural.

$$M_{Rd} = \sigma_{fd} \cdot A_f \cdot \left( d - \frac{\lambda x}{2} \right) = 536,09 \cdot 157,08 \cdot \left( 175 - \frac{0,8 \cdot 41,76}{2} \right) = 13,33 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$F = \frac{4 \cdot M_{Rd}}{L} = \frac{4 \cdot 13,33}{2,30} = 23,18 \text{ kN}$$

Desconsiderando-se a redução da resistência dos materiais para obter resultado mais próximo à realidade de laboratório, os coeficientes de redução da resistência à compressão

do concreto e à tração do GFRP foram tomados iguais a 1 e foram determinadas as novas resistências de cálculo dos materiais e o modo de ruína.

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{34,60}{1} = 34,60 \text{ MPa}$$

$$f_{fd} = C_E \cdot \frac{f_{fk}}{\gamma_m} = 0,85 \cdot \frac{1047}{1} = 889,95 \text{ MPa}$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d} = \frac{157,08}{120 \cdot 175} = 0,0075 = 0,75 \%$$

$$\rho_{fb} = \lambda \cdot \eta_c \cdot \alpha_c \cdot \frac{f_{cd}}{f_{fd}} \cdot \frac{E_f \cdot \varepsilon_{cu}}{E_f \cdot \varepsilon_{cu} + f_{fd}} = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 0,85 \cdot \frac{34,60}{889,95} \cdot \frac{48 \cdot 3,5}{48 \cdot 3,5 + 889,95} = 0,0042 = 0,42 \%$$

Como  $\rho_f > \rho_{fb}$  o modo de ruína que governa o comportamento do elemento estrutural continua a ser o esmagamento do concreto comprimido. Determinou-se, em seguida, a profundidade da linha neutra e a tensão de tração instalada na barra de GFRP.

$$x = \frac{1}{2 \cdot b} \cdot \frac{\varepsilon_{cu} \cdot A_f \cdot E_f}{\lambda \cdot \eta_c \cdot \alpha_c \cdot f_{cd}} \cdot \left( -1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{\lambda \cdot \eta_c \cdot \alpha_c \cdot f_{cd}}{\varepsilon_{cu} \cdot A_f \cdot E_f} \cdot b \cdot d} \right)$$

$$x = \frac{1}{2 \cdot 120} \cdot \frac{3,5 \cdot 157,08 \cdot 48}{0,8 \cdot 1,0 \cdot 0,85 \cdot 34,60} \cdot \left( -1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{0,8 \cdot 1,0 \cdot 0,85 \cdot 34,60}{3,5 \cdot 157,08 \cdot 48} \cdot 120 \cdot 175} \right) = 36,04 \text{ mm}$$

$$\sigma_{fd} = \frac{x \cdot b \cdot \eta_c \cdot \alpha_c \cdot \lambda \cdot f_{cd}}{A_f} = \frac{36,04 \cdot 120 \cdot 1,0 \cdot 0,85 \cdot 0,8 \cdot 34,60}{157,08} = 647,77 \text{ MPa}$$

Por fim, calculou-se o momento resistente e a respectiva força resistida pelo elemento estrutural.

$$M_{Rd} = \sigma_{fd} \cdot A_f \cdot \left( d - \frac{\lambda x}{2} \right) = 647,77 \cdot 157,08 \cdot \left( 175 - \frac{0,8 \cdot 36,04}{2} \right) = 16,34 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$F = \frac{4 \cdot M_{Rd}}{L} = \frac{4 \cdot 16,34}{2,30} = 28,42 \text{ kN}$$

A Tabela 82 a Tabela 84 apresentam os resultados teóricos de capacidade resistente obtidos para as vigas ensaiadas por Mazzú (2020).

**Tabela 82: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_LAB\_GFRP\_45d de Mazzú (2020) utilizando-se a ABNT NBR 17196 (2025)**

V_LAB_GFRP_45d			
Com redução		Sem redução	
Propriedades de projeto			
$\gamma_c$	1,4	$\gamma_c$	1
$\gamma_m$	1,3	$\gamma_m$	1
$C_E$	0,85	$C_E$	0,85
$f_{cd}$ (MPa)	23,42	$f_{cd}$ (MPa)	32,79
$f_{fd}$ (MPa)	684,58	$f_{fd}$ (MPa)	889,95

Tabela 82: Continuação...

Modo de ruína			
$\rho_f$ (%)	0,75	$\rho_f$ (%)	0,75
$\alpha_c$	0,85	$\alpha_c$	0,85
$\lambda$	0,8	$\lambda$	0,8
$\rho_{fb}$ (%)	0,46	$\rho_{fb}$ (%)	0,40
Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto	
Momento resistente			
x (mm)	42,74	x (mm)	36,91
$\sigma_{fd}$ (MPa)	519,96	$\sigma_{fd}$ (MPa)	628,64
$M_{Rd}$ (kN.m)	12,90	$M_{Rd}$ (kN.m)	15,82
Força resistida			
F (kN)	22,43	F (kN)	27,52

Tabela 83: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_LAB\_GFRP\_1000h de Mazzú (2020) utilizando-se a ABNT NBR 17196 (2025)

V_LAB_GFRP_1000h			
Com redução		Sem redução	
Propriedades de projeto			
$\gamma_c$	1,4	$\gamma_c$	1
$\gamma_m$	1,3	$\gamma_m$	1
$C_E$	0,85	$C_E$	0,85
$f_{cd}$ (MPa)	23,92	$f_{cd}$ (MPa)	33,49
$f_{td}$ (MPa)	684,58	$f_{td}$ (MPa)	889,95
Modo de ruína			
$\rho_f$ (%)	0,75	$\rho_f$ (%)	0,75
$\alpha_c$	0,85	$\alpha_c$	0,85
$\lambda$	0,8	$\lambda$	0,8
$\rho_{fb}$ (%)	0,47	$\rho_{fb}$ (%)	0,41
Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto	
Momento resistente			
x (mm)	42,35	x (mm)	36,56
$\sigma_{fd}$ (MPa)	526,25	$\sigma_{fd}$ (MPa)	636,10
$M_{Rd}$ (kN.m)	13,07	$M_{Rd}$ (kN.m)	16,02
Força resistida			
F (kN)	22,72	F (kN)	27,87

Tabela 84: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_ACP\_GFRP\_1000h de Mazzú (2020) utilizando-se a ABNT NBR 17196 (2025)

V_ACP_GFRP_1000h			
Com redução		Com redução	
Propriedades de projeto			
$\gamma_c$	1,4	$\gamma_c$	1
$\gamma_m$	1,3	$\gamma_m$	1
$C_E$	0,85	$C_E$	0,85
$f_{cd}$ (MPa)	24,71	$f_{cd}$ (MPa)	34,60
$f_{td}$ (MPa)	684,58	$f_{td}$ (MPa)	889,95
Modo de ruína			
$\rho_f$ (%)	0,75	$\rho_f$ (%)	0,75
$\alpha_c$	0,85	$\alpha_c$	0,85
$\lambda$	0,8	$\lambda$	0,8
$\rho_{fb}$ (%)	0,48	$\rho_{fb}$ (%)	0,42
Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto	

**Tabela 84: Continuação...**

<b>Momento resistente</b>			
x (mm)	41,76	x (mm)	36,04
$\sigma_{fd}$ (MPa)	536,09	$\sigma_{fd}$ (MPa)	647,77
$M_{Rd}$ (kN.m)	13,33	$M_{Rd}$ (kN.m)	16,34
<b>Força resistida</b>			
F (kN)	23,18	F (kN)	28,42

## APÊNDICE B

Apresentam-se, a seguir, os resultados completos de capacidade resistente teórica das vigas de concreto armadas com barras de aço e de GFRP ensaiadas no âmbito deste trabalho. Foram detalhados os cálculos realizados para as vigas V\_LAB\_S\_5000h utilizando-se os procedimentos do ACI 318 (2019) e da ABNT NBR 6118 (2023), sendo que os cálculos para as demais vigas seguiram os mesmos procedimentos. Para as vigas com armadura de GFRP, o passo a passo dos cálculos encontra-se apresentado nos Apêndices A.1 e A.5.

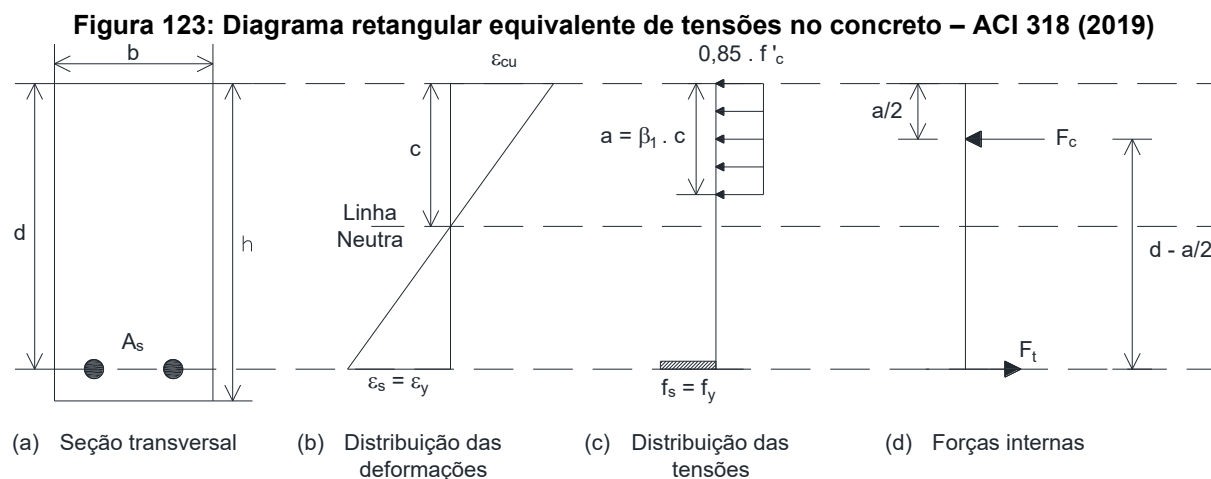
### B.1 VIGAS COM ARMADURA DE AÇO – ACI 318 (2019)

A Tabela 85 apresenta os dados utilizados para o cálculo da capacidade resistente das vigas segundo as disposições do ACI 318 (2019). Ressalta-se que a resistência à compressão do concreto, a resistência à tração e o módulo de elasticidade do aço foram obtidos por meio de ensaios experimentais.

**Tabela 85: Características das vigas – ACI 318 (2019)**

<b>Seção transversal</b>	
b (mm)	120
h (mm)	200
d (mm)	175
c (mm)	15
L (mm)	2300
<b>Concreto</b>	
$\epsilon_{cu}$ (‰)	3
$f_c'$ (V_LAB_S_5000h) (MPa)	31,8
$f_c'$ (V_ACP_S_5000h) (MPa)	36,2
$f_c'$ (V_LAB_S_10000h) (MPa)	25,1
$f_c'$ (V_ACP_S_10000h) (MPa)	38,2
<b>Armadura longitudinal</b>	
nº barras	2
$\phi_l$ (mm)	10
$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	157,08
$f_y$ (V_LAB_S_5000h) (MPa)	563,4
$f_y$ (V_ACP_S_5000h) (MPa)	549,7
$f_y$ (V_LAB_S_10000h) (MPa)	563,4
$f_y$ (V_ACP_S_10000h) (MPa)	549,7
$E_s$ (V_LAB_S_5000h) (GPa)	197,5
$E_s$ (V_ACP_S_5000h) (GPa)	190,9
$E_s$ (V_LAB_S_10000h) (GPa)	197,5
$E_s$ (V_ACP_S_10000h) (GPa)	190,9
<b>Armadura transversal</b>	
$f_{yk}$ (MPa)	600
$\phi_t$ (mm)	5
s (mm)	100

Assim como na filosofia de dimensionamento de elementos com armadura de FRP, o ACI 318 (2019) permite a utilização de um diagrama retangular equivalente de tensões no concreto quando se dimensiona elementos com armadura de aço convencional, tal como apresentado na Figura 123.



Fonte: Mazzú (2020)

No diagrama retangular equivalente de tensões no concreto, o parâmetro  $\beta_1$ , o qual determina a altura do bloco de tensões de compressão no concreto, pode ser calculado com base na resistência à compressão do concreto. Para as vigas V\_LAB\_S\_5000h a resistência à compressão do concreto é de 31,80 MPa.

$$\beta_1 = \begin{cases} 0,85 & \text{para } f_c' < 28 \text{ MPa} \\ 0,85 - \frac{0,05 \cdot (f_c' - 28)}{7} & \text{para } 28 < f_c' < 55 \text{ MPa} \\ 0,65 & \text{para } f_c' > 55 \text{ MPa} \end{cases}$$

$$\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05 \cdot (31,80 - 28)}{7} = 0,823$$

Pelo equilíbrio das forças de tração e compressão atuantes na seção transversal é possível calcular a profundidade da linha neutra.

$$c = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot \beta_1 \cdot b} = \frac{157,08 \cdot 563,36}{0,85 \cdot 31,80 \cdot 0,823 \cdot 120} = 33,16 \text{ mm}$$

A deformação de escoamento do aço pode ser determinada por meio da Lei de Hooke e a deformação instalada na armadura de aço pode ser determinada por meio da compatibilidade de deformações, levando-se em conta que o ACI 318 (2019) admite que a deformação última no concreto é igual a 3,0 %, tal como apresentado a seguir.

$$\varepsilon_{sy} = \frac{f_y}{E_s} = \frac{563,36}{197,47} = 2,85 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s = \left(\frac{d-c}{c}\right) \cdot \varepsilon_{cu} = \left(\frac{175-33,16}{33,16}\right) \cdot 3,0 = 12,83 \text{ ‰}$$

Desta forma, como a deformação na armadura é maior que a deformação de escoamento do aço ( $\varepsilon_{sy} < \varepsilon_s$ ), considera-se que o modo de ruína é o escoamento do aço e calcula-se o momento resistente nominal e a respectiva força resistida.

$$M_n = A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2}\right) = 157,08 \cdot 563,36 \cdot \left(175 - \frac{0,823 \cdot 33,16}{2}\right) = 14,28 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$F_n = \frac{4 \cdot M_n}{L} = \frac{4 \cdot 14,28}{2,30} = 24,83 \text{ kN}$$

O coeficiente de redução da capacidade resistente do elemento estrutural pode ser calculado com base na deformação de escoamento do aço e na deformação instalada na armadura, tal como apresentado abaixo.

$$\phi = \begin{cases} 0,90 & \text{para } \varepsilon_s \geq \varepsilon_{sy} + 0,003 \\ 0,65 + \frac{0,25 \cdot (\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0,003} & \text{para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < \varepsilon_{sy} + 0,003 \\ 0,65 & \text{para } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases}$$

$$\varepsilon_{sy} + 3 \text{ ‰} = 2,85 + 3 = 5,85 \text{ ‰} < \varepsilon_s = 12,83 \text{ ‰} \rightarrow \phi = 0,90$$

Assim, determinou-se o momento resistente minorado e a respectiva força resistida.

$$M_u = \phi \cdot M_n = 0,9 \cdot 14,28 = 12,85 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$F_u = \frac{4 \cdot M_u}{L} = \frac{4 \cdot 12,85}{2,30} = 22,35 \text{ kN}$$

A Tabela 86 e Tabela 87 apresentam os resultados obtidos.

**Tabela 86: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_LAB\_S\_5000h e V\_ACP\_S\_5000h utilizando-se o ACI 318 (2019)**

V_LAB_S_5000h		V_ACP_S_5000h	
Profundidade da linha neutra		Profundidade da linha neutra	
$\beta_1$	0,823	$\beta_1$	0,791
c (mm)	33,16	c (mm)	29,55
Modo de ruína		Modo de ruína	
$\varepsilon_{sy}$ (‰)	2,85	$\varepsilon_{sy}$ (‰)	2,88
$\varepsilon_s$ (‰)	12,83	$\varepsilon_s$ (‰)	14,77
Escoamento do aço		Escoamento do aço	

Tabela 86: Continuação...

Momento resistente		Momento resistente	
M <sub>n</sub> (kN.m)	14,28	M <sub>n</sub> (kN.m)	14,10
φ	0,9	φ	0,9
M <sub>u</sub> (kN.m)	12,85	M <sub>u</sub> (kN.m)	12,69
Força resistida		Força resistida	
F <sub>n</sub> (kN)	24,83	F <sub>n</sub> (kN)	24,52
F <sub>u</sub> (kN)	22,35	F <sub>u</sub> (kN)	22,07

Tabela 87: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_LAB\_S\_10000h e V\_ACP\_S\_10000h utilizando-se o ACI 318 (2019)

V_LAB_S_10000h		V_ACP_S_10000h	
Profundidade da linha neutra		Profundidade da linha neutra	
β <sub>1</sub>	0,850	β <sub>1</sub>	0,777
c (mm)	40,67	c (mm)	28,52
Modo de ruína		Modo de ruína	
ε <sub>sy</sub> (‰)	2,85	ε <sub>sy</sub> (‰)	2,88
ε <sub>s</sub> (‰)	9,91	ε <sub>s</sub> (‰)	15,41
Escoamento do aço		Escoamento do aço	
Momento resistente		Momento resistente	
M <sub>n</sub> (kN.m)	13,96	M <sub>n</sub> (kN.m)	14,15
φ	0,9	φ	0,9
M <sub>u</sub> (kN.m)	12,56	M <sub>u</sub> (kN.m)	12,74
Força resistida		Força resistida	
F <sub>n</sub> (kN)	24,27	F <sub>n</sub> (kN)	24,62
F <sub>u</sub> (kN)	21,85	F <sub>u</sub> (kN)	22,15

## B.2 VIGAS COM ARMADURA DE AÇO – ABNT NBR 6118 (2023)

A Tabela 88 apresenta os dados utilizados para o cálculo da capacidade resistente das vigas segundo as disposições da ABNT NBR 6118 (2023). Os valores de resistência à compressão do concreto, resistência à tração e módulo de elasticidade do aço apresentados na Tabela 88 foram obtidos por meio de ensaios experimentais.

Neste item será apresentado o passo a passo para o cálculo da capacidade resistente das vigas V\_LAB\_S\_5000h, e, em um primeiro momento os cálculos foram efetuados aplicando-se os coeficientes de redução da resistência do concreto e do aço, os quais são iguais a 1,4 e 1,15, respectivamente, para Estado Limite Último e combinação normal de ações. Desta forma, foram obtidos os valores de cálculo da resistência à compressão do concreto e à tração do GFRP.

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{31,80}{1,4} = 22,71 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{563,36}{1,15} = 489,88 \text{ MPa}$$

Tal como o ACI 318 (2019), a ABNT NBR 6118 (2023) admite o diagrama retangular equivalente de tensões no concreto para uma viga de seção retangular com armadura

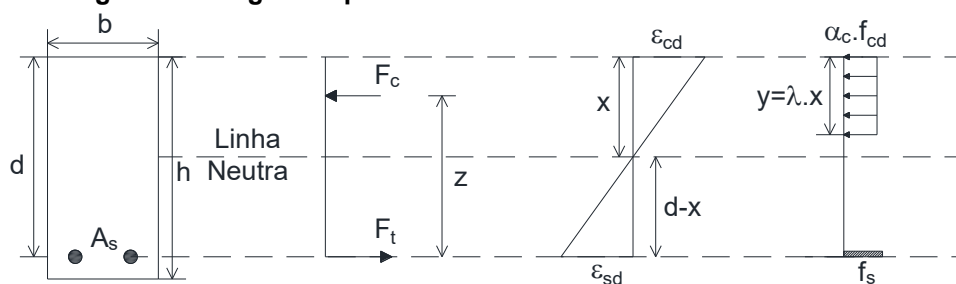
simples, como apresentado na Figura 124. Assim, por meio do equilíbrio de forças pode ser calculada a profundidade da linha neutra, sabendo-se que os parâmetros que definem o diagrama retangular de tensões,  $\lambda$  e  $\alpha_c$ , são iguais a 0,8 e 0,85, respectivamente, para concretos com resistência à compressão de até 50 MPa.

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\alpha_c \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot b_w} = \frac{157,08 \cdot 489,88}{0,85 \cdot 22,71 \cdot 0,8 \cdot 120} = 41,52 \text{ mm}$$

**Tabela 88: Características das vigas – ABNT NBR 6118 (2023)**

<b>Seção transversal</b>	
$b_w$ (mm)	120
$h$ (mm)	200
$d$ (mm)	175
$c$ (mm)	15
$L$ (mm)	2300
<b>Concreto</b>	
$\varepsilon_{cu}$ (‰)	3,5
$f_{ck}$ (V_LAB_S_5000h) (MPa)	31,8
$f_{ck}$ (V_ACP_S_5000h) (MPa)	36,2
$f_{ck}$ (V_LAB_S_10000h) (MPa)	25,1
$f_{ck}$ (V_ACP_S_10000h) (MPa)	38,2
<b>Armadura longitudinal</b>	
nº barras	2
$\phi_l$ (mm)	10
$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	157,08
$f_{yk}$ (V_LAB_S_5000h) (MPa)	563,4
$f_{yk}$ (V_ACP_S_5000h) (MPa)	549,7
$f_{yk}$ (V_LAB_S_10000h) (MPa)	563,4
$f_{yk}$ (V_ACP_S_10000h) (MPa)	549,7
$E_s$ (V_LAB_S_5000h) (GPa)	197,5
$E_s$ (V_ACP_S_5000h) (GPa)	190,9
$E_s$ (V_LAB_S_10000h) (GPa)	197,5
$E_s$ (V_ACP_S_10000h) (GPa)	190,9
<b>Armadura transversal</b>	
$f_{yk}$ (MPa)	600
$\phi_t$ (mm)	5
$s$ (mm)	100

**Figura 124: Diagrama retangular equivalente de tensões no concreto – ABNT NBR 6118 (2023)**



Fonte: Próprio autor

A ABNT NBR 6118 (2023) trabalha com o conceito de domínios de deformação para identificar o modo de ruína que governa o comportamento do elemento estrutural. Segundo esta norma, uma seção transversal deve ser dimensionada para trabalhar nos Domínios 2 ou 3, nos quais se observa o escoamento da armadura longitudinal de aço tracionada, sendo necessário determinar a profundidade de linha neutra que separa os domínios e comparar ao valor calculado para identificação do Domínio.

$$x_{2/3} = 0,259 \cdot d = 0,259 \cdot 175 = 45,33 \text{ mm}$$

Desta forma, como  $x < x_{2/3}$ , a seção encontra-se trabalhando no Domínio 2, para o qual se obtém deformação no aço igual a 10 ‰ (escoamento do aço). Por compatibilidade de deformações é possível calcular a deformação no concreto.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s \cdot \left( \frac{x}{d-x} \right) = 10 \cdot \left( \frac{41,52}{175-41,52} \right) = 3,11 \text{ ‰}$$

Por fim, foi possível calcular o momento resistente e a respectiva força resistida pela seção transversal.

$$M_d = A_s \cdot f_{yd} \cdot \left( d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right) = 157,08 \cdot 489,88 \cdot \left( 175 - \frac{0,8 \cdot 41,52}{2} \right) = 12,19 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$F_d = \frac{4 \cdot M_d}{L} = \frac{4 \cdot 12,19}{2,30} = 21,20 \text{ kN}$$

Para obter resultados mais fiéis à realidade de laboratório, os coeficientes de redução da resistência do concreto e do aço foram tomados iguais a 1,0 e foram recalculados o momento resistente e a força resistida pela seção transversal. Assim, os valores de cálculo da resistência à compressão do concreto e à tração do GFRP foram iguais aos valores característicos.

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{31,80}{1,0} = 31,80 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{563,36}{1,0} = 563,36 \text{ MPa}$$

Posteriormente, foi calculada a profundidade de linha neutra e determinado o Domínio de deformação que governa o comportamento do elemento estrutural.

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\alpha_c \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot b_w} = \frac{157,08 \cdot 563,36}{0,85 \cdot 31,80 \cdot 0,8 \cdot 120} = 34,10 \text{ mm}$$

$$x_{2/3} = 0,259 \cdot d = 0,259 \cdot 175 = 45,33 \text{ mm}$$

Como  $x < x_{2/3}$ , a seção encontra-se trabalhando no Domínio 2, com deformação no aço de 10 ‰ (aço escoando). A deformação no concreto foi então calculada por compatibilidade de deformações.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s \cdot \left( \frac{x}{d - x} \right) = 10 \cdot \left( \frac{34,10}{175 - 34,10} \right) = 2,42 \text{ ‰}$$

Assim, calculou-se o momento resistente e a respectiva força resistida pela seção transversal.

$$M_d = A_s \cdot f_{yd} \cdot \left( d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right) = 157,08 \cdot 563,36 \cdot \left( 175 - \frac{0,8 \cdot 34,10}{2} \right) = 14,28 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$F_d = \frac{4 \cdot M_d}{L} = \frac{4 \cdot 14,28}{2,30} = 24,83 \text{ kN}$$

A Tabela 89 e Tabela 90 apresentam os resultados obtidos.

**Tabela 89: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_LAB\_S\_5000h e V\_ACP\_S\_5000h utilizando-se a ABNT NBR 6118 (2023)**

V_LAB_S_5000h				V_ACP_S_5000h			
Com redução		Sem redução		Com redução		Sem redução	
<b>Propriedades</b>				<b>Propriedades</b>			
$\gamma_c$	1,40	$\gamma_c$	1,00	$\gamma_c$	1,40	$\gamma_c$	1,00
$\gamma_s$	1,15	$\gamma_s$	1,00	$\gamma_s$	1,15	$\gamma_s$	1,00
$f_{cd}$ (MPa)	22,71	$f_{cd}$ (MPa)	31,80	$f_{cd}$ (MPa)	25,86	$f_{cd}$ (MPa)	36,20
$f_{yd}$ (MPa)	489,91	$f_{yd}$ (MPa)	563,40	$f_{yd}$ (MPa)	478,00	$f_{yd}$ (MPa)	549,70
<b>Profundidade da linha neutra</b>				<b>Profundidade da linha neutra</b>			
$\alpha_c$	0,85	$\alpha_c$	0,85	$\alpha_c$	0,85	$\alpha_c$	0,85
$\lambda$	0,8	$\lambda$	0,8	$\lambda$	0,8	$\lambda$	0,8
x (mm)	41,52	x (mm)	34,11	x (mm)	35,59	x (mm)	29,23
$x_{2/3}$ (mm)	45,33	$x_{2/3}$ (mm)	45,33	$x_{2/3}$ (mm)	45,33	$x_{2/3}$ (mm)	45,33
Domínio 2		Domínio 2		Domínio 2		Domínio 2	
<b>Modo de ruína</b>				<b>Modo de ruína</b>			
$\varepsilon_{sy}$ (‰)	2,85	$\varepsilon_{sy}$ (‰)	2,85	$\varepsilon_{sy}$ (‰)	2,88	$\varepsilon_{sy}$ (‰)	2,88
$\varepsilon_s$ (‰)	10,00	$\varepsilon_s$ (‰)	10,00	$\varepsilon_s$ (‰)	10,00	$\varepsilon_s$ (‰)	10,00
Escoamento do aço		Escoamento do aço		Escoamento do aço		Escoamento do aço	
$\varepsilon_c$ (‰)	3,11	$\varepsilon_c$ (‰)	2,42	$\varepsilon_c$ (‰)	2,55	$\varepsilon_c$ (‰)	2,01
<b>Momento resistente</b>				<b>Momento resistente</b>			
$M_d$ (kN.m)	12,19	$M_d$ (kN.m)	14,28	$M_d$ (kN.m)	12,07	$M_d$ (kN.m)	14,10
<b>Força resistida</b>				<b>Força resistida</b>			
$F_n$ (kN)	21,20	$F_n$ (kN)	24,83	$F_n$ (kN)	20,99	$F_n$ (kN)	24,52

**Tabela 90: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_LAB\_S\_10000h e V\_ACP\_S\_10000h utilizando-se a ABNT NBR 6118 (2023)**

V_LAB_S_10000h				V_ACP_S_10000h			
Com redução		Sem redução		Com redução		Sem redução	
<b>Propriedades</b>				<b>Propriedades</b>			
$\gamma_c$	1,40	$\gamma_c$	1,00	$\gamma_c$	1,40	$\gamma_c$	1,00
$\gamma_s$	1,15	$\gamma_s$	1,00	$\gamma_s$	1,15	$\gamma_s$	1,00
$f_{cd}$ (MPa)	17,93	$f_{cd}$ (MPa)	25,10	$f_{cd}$ (MPa)	27,29	$f_{cd}$ (MPa)	38,20
$f_{yd}$ (MPa)	489,91	$f_{yd}$ (MPa)	563,40	$f_{yd}$ (MPa)	478,00	$f_{yd}$ (MPa)	549,70
<b>Profundidade da linha neutra</b>				<b>Profundidade da linha neutra</b>			
$\alpha_c$	0,85	$\alpha_c$	0,85	$\alpha_c$	0,85	$\alpha_c$	0,85
$\lambda$	0,8	$\lambda$	0,8	$\lambda$	0,8	$\lambda$	0,8
x (mm)	52,60	x (mm)	43,21	x (mm)	33,72	x (mm)	27,70
$x_{2/3}$ (mm)	45,33	$x_{2/3}$ (mm)	45,33	$x_{2/3}$ (mm)	45,33	$x_{2/3}$ (mm)	45,33
Domínio 3		Domínio 2		Domínio 2		Domínio 2	
<b>Modo de ruína</b>				<b>Modo de ruína</b>			
$\epsilon_{sy}$ (‰)	2,85	$\epsilon_{sy}$ (‰)	2,85	$\epsilon_{sy}$ (‰)	2,88	$\epsilon_{sy}$ (‰)	2,88
$\epsilon_s$ (‰)	8,14	$\epsilon_s$ (‰)	10,00	$\epsilon_s$ (‰)	10,00	$\epsilon_s$ (‰)	10,00
Escoamento do aço		Escoamento do aço		Escoamento do aço		Escoamento do aço	
$\epsilon_{cu}$ (‰)	3,50	$\epsilon_c$ (‰)	3,28	$\epsilon_c$ (‰)	2,39	$\epsilon_c$ (‰)	1,88
<b>Momento resistente</b>				<b>Momento resistente</b>			
$M_d$ (kN.m)	11,85	$M_d$ (kN.m)	13,96	$M_d$ (kN.m)	12,13	$M_d$ (kN.m)	14,15
<b>Força resistida</b>				<b>Força resistida</b>			
$F_n$ (kN)	20,61	$F_n$ (kN)	24,27	$F_n$ (kN)	21,09	$F_n$ (kN)	24,62

### B.3 VIGAS COM ARMADURA DE GFRP – ACI 440.11 (2022)

A Tabela 91 apresenta os dados utilizados para o cálculo da capacidade resistente das vigas segundo as disposições do ACI 440.11 (2022). O cálculo da capacidade resistente foi realizado conforme o passo a passo demonstrado no Apêndice A.1, e, neste tópico encontram-se apresentados os resultados completos na Tabela 92 e Tabela 93.

**Tabela 91: Características das vigas – ACI 440.11 (2022)**

<b>Seção transversal</b>	
b (mm)	120
h (mm)	200
d (mm)	175
c (mm)	15
L (mm)	2300
<b>Concreto</b>	
$\epsilon_{cu}$ (‰)	3
$f_c'$ (V_LAB_GFRP_5000h) (MPa)	31,8
$f_c'$ (V_ACP_GFRP_5000h) (MPa)	36,2
$f_c'$ (V_LAB_GFRP_10000h) (MPa)	25,1
$f_c'$ (V_ACP_GFRP_10000h) (MPa)	38,2
<b>Armadura longitudinal</b>	
nº barras	2
$\phi_l$ (mm)	10
$A_f$ (mm <sup>2</sup> )	157,08
$f_{fu}^*$ (MPa)	1047
$E_f$ (GPa)	48
$\epsilon_{fu}^*$ (‰)	21,81

Tabela 91: Continuação...

Armadura transversal	
$f_{yk}$ (MPa)	600
$\phi_t$ (mm)	5
s (mm)	100

Tabela 92: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_LAB\_GFRP\_5000h e V\_ACP\_GFRP\_5000h utilizando-se o ACI 440.11 (2022)

V_LAB_GFRP_5000h		V_ACP_GFRP_5000h	
$C_E$	0,85	$C_E$	0,85
<b>Propriedades</b>		<b>Propriedades</b>	
$f_{fu}$ (MPa)	889,95	$f_{fu}$ (MPa)	889,95
$\varepsilon_{fu}$ (‰)	18,54	$\varepsilon_{fu}$ (‰)	18,54
<b>Modo de ruína</b>		<b>Modo de ruína</b>	
$\rho_f$ (%)	0,75	$\rho_f$ (%)	0,75
$\beta_1$	0,820	$\beta_1$	0,788
$\rho_{fb}$ (%)	0,35	$\rho_{fb}$ (%)	0,38
Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto	
<b>Momento resistente</b>		<b>Momento resistente</b>	
$f_r$ (MPa)	585,01	$f_r$ (MPa)	614,86
a (mm)	28,33	a (mm)	26,16
$\varepsilon_f$ (‰)	12,19	$\varepsilon_f$ (‰)	12,81
$M_n$ (kN.m)	14,78	$M_n$ (kN.m)	15,64
$\phi$	0,65	$\phi$	0,65
$M_u$ (kN.m)	9,61	$M_u$ (kN.m)	10,17
<b>Força resistida</b>		<b>Força resistida</b>	
$F_n$ (kN)	25,70	$F_n$ (kN)	27,20
$F_u$ (kN)	16,71	$F_u$ (kN)	17,68

Tabela 93: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_LAB\_GFRP\_10000h e V\_ACP\_GFRP\_10000h utilizando-se o ACI 440.11 (2022)

V_LAB_GFRP_10000h		V_ACP_GFRP_10000h	
$C_E$	0,85	$C_E$	0,85
<b>Propriedades</b>		<b>Propriedades</b>	
$f_{fu}$ (MPa)	889,95	$f_{fu}$ (MPa)	889,95
$\varepsilon_{fu}$ (‰)	18,54	$\varepsilon_{fu}$ (‰)	18,54
<b>Modo de ruína</b>		<b>Modo de ruína</b>	
$\rho_f$ (%)	0,75	$\rho_f$ (%)	0,75
$\beta_1$	0,850	$\beta_1$	0,773
$\rho_{fb}$ (%)	0,28	$\rho_{fb}$ (%)	0,39
Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto	
<b>Momento resistente</b>		<b>Momento resistente</b>	
$f_r$ (MPa)	523,23	$f_r$ (MPa)	626,93
a (mm)	32,10	a (mm)	25,27
$\varepsilon_f$ (‰)	10,90	$\varepsilon_f$ (‰)	13,06
$M_n$ (kN.m)	13,06	$M_n$ (kN.m)	15,99
$\phi$	0,65	$\phi$	0,65
$M_u$ (kN.m)	8,49	$M_u$ (kN.m)	10,39
<b>Força resistida</b>		<b>Força resistida</b>	
$F_n$ (kN)	22,72	$F_n$ (kN)	27,81
$F_u$ (kN)	14,77	$F_u$ (kN)	18,07

#### B.4 VIGAS COM ARMADURA DE GFRP – ABNT NBR 17196 (2025)

A Tabela 94 apresenta os dados utilizados para o cálculo da capacidade resistente das vigas segundo as disposições da ABNT NBR 17196 (2025). O cálculo da capacidade resistente foi realizado conforme o passo a passo demonstrado no Apêndice A.5, e, neste tópico encontram-se apresentados os resultados completos na Tabela 95 e Tabela 96.

**Tabela 94: Características das vigas de concreto armado com barras de GFRP – ABNT NBR 17196 (2025)**

<b>Seção transversal</b>	
b (mm)	120
h (mm)	200
d (mm)	175
c (mm)	15
L (mm)	2300
<b>Concreto</b>	
$\varepsilon_{cu}$ (‰)	3,5
$f_{ck}$ (V_LAB_GFRP_5000h) (MPa)	31,8
$f_{ck}$ (V_ACP_GFRP_5000h) (MPa)	36,2
$f_{ck}$ (V_LAB_GFRP_10000h) (MPa)	25,1
$f_{ck}$ (V_ACP_GFRP_10000h) (MPa)	38,2
<b>Armadura longitudinal</b>	
nº barras	2
$\phi_l$ (mm)	10
$A_f$ (mm <sup>2</sup> )	157,08
$f_{fk}$ (MPa)	1047
$E_f$ (GPa)	48
$\varepsilon_{fk}$ (‰)	21,81
<b>Armadura transversal</b>	
$f_{yk}$ (MPa)	600
$\phi_t$ (mm)	5
s (mm)	100

**Tabela 95: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_LAB\_GFRP\_5000h e V\_ACP\_GFRP\_5000h utilizando-se a ABNT NBR 17196 (2025)**

<b>V_LAB_GFRP_5000h</b>				<b>V_ACP_GFRP_5000h</b>			
<b>Com redução</b>		<b>Sem redução</b>		<b>Com redução</b>		<b>Sem redução</b>	
<b>Propriedades de projeto</b>				<b>Propriedades de projeto</b>			
$\gamma_c$	1,4	$\gamma_c$	1	$\gamma_c$	1,4	$\gamma_c$	1
$\gamma_m$	1,3	$\gamma_m$	1	$\gamma_m$	1,3	$\gamma_m$	1
$C_E$	0,85	$C_E$	0,85	$C_E$	0,85	$C_E$	0,85
$f_{cd}$ (MPa)	22,71	$f_{cd}$ (MPa)	31,80	$f_{cd}$ (MPa)	25,86	$f_{cd}$ (MPa)	36,20
$f_{fd}$ (MPa)	684,58	$f_{fd}$ (MPa)	889,95	$f_{fd}$ (MPa)	684,58	$f_{fd}$ (MPa)	889,95
<b>Modo de ruína</b>				<b>Modo de ruína</b>			
$\rho_f$ (%)	0,75	$\rho_f$ (%)	0,75	$\rho_f$ (%)	0,75	$\rho_f$ (%)	0,75
$\alpha_c$	0,85	$\alpha_c$	0,85	$\alpha_c$	0,85	$\alpha_c$	0,85
$\lambda$	0,8	$\lambda$	0,8	$\lambda$	0,8	$\lambda$	0,8
$\rho_{fb}$ (%)	0,44	$\rho_{fb}$ (%)	0,39	$\rho_{fb}$ (%)	0,51	$\rho_{fb}$ (%)	0,44
Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto	

Tabela 95: Continuação...

Momento resistente				Momento resistente			
x (mm)	43,30	x (mm)	37,41	x (mm)	40,95	x (mm)	35,32
$\varepsilon_f$ (‰)	10,64	$\varepsilon_f$ (‰)	12,87	$\varepsilon_f$ (‰)	11,46	$\varepsilon_f$ (‰)	13,84
$\sigma_{fd}$ (MPa)	510,95	$\sigma_{fd}$ (MPa)	617,95	$\sigma_{fd}$ (MPa)	550,01	$\sigma_{fd}$ (MPa)	664,28
$M_{Rd}$ (kN.m)	12,66	$M_{Rd}$ (kN.m)	15,53	$M_{Rd}$ (kN.m)	13,70	$M_{Rd}$ (kN.m)	16,79
Força resistida				Força resistida			
F (kN)	22,01	F (kN)	27,02	F (kN)	23,83	F (kN)	29,19

Tabela 96: Resultados teóricos obtidos para as vigas V\_LAB\_GFRP\_10000h e V\_ACP\_GFRP\_10000h utilizando-se a ABNT NBR 17196 (2025)

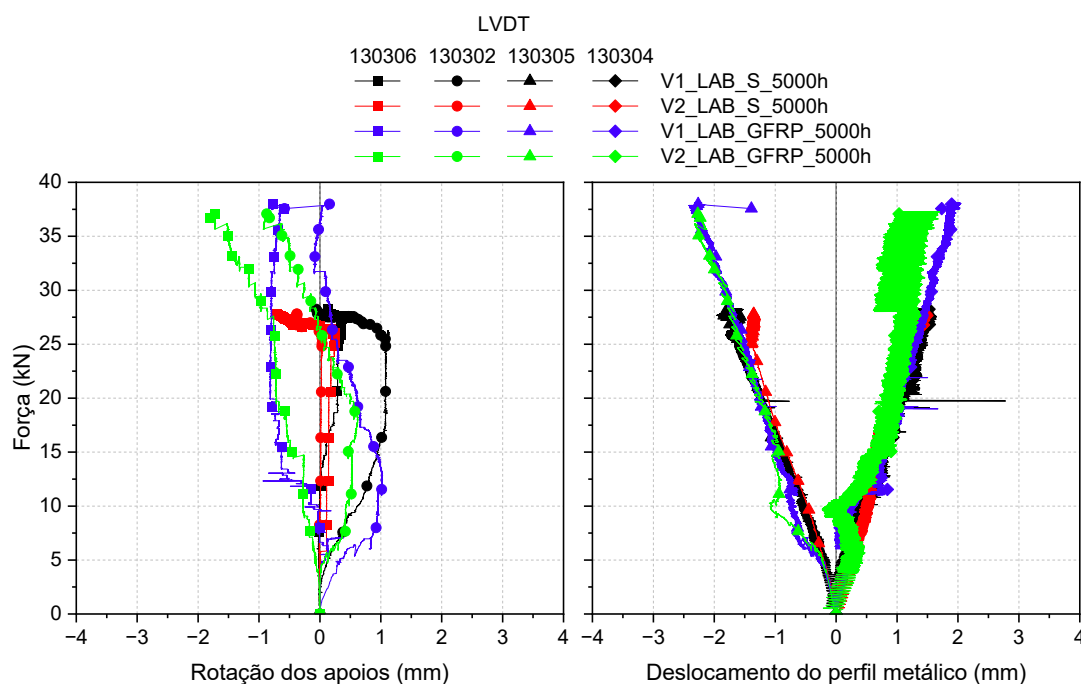
V_LAB_GFRP_10000h				V_ACP_GFRP_10000h			
Com redução		Sem redução		Com redução		Sem redução	
Propriedades de projeto				Propriedades de projeto			
$\gamma_c$	1,4	$\gamma_c$	1	$\gamma_c$	1,4	$\gamma_c$	1
$\gamma_m$	1,3	$\gamma_m$	1	$\gamma_m$	1,3	$\gamma_m$	1
$C_E$	0,85	$C_E$	0,85	$C_E$	0,85	$C_E$	0,85
$f_{cd}$ (MPa)	17,93	$f_{cd}$ (MPa)	25,10	$f_{cd}$ (MPa)	27,29	$f_{cd}$ (MPa)	38,20
$f_{fd}$ (MPa)	684,58	$f_{fd}$ (MPa)	889,95	$f_{fd}$ (MPa)	684,58	$f_{fd}$ (MPa)	889,95
Modo de ruína				Modo de ruína			
$\rho_f$ (%)	0,75	$\rho_f$ (%)	0,75	$\rho_f$ (%)	0,75	$\rho_f$ (%)	0,75
$\alpha_c$	0,85	$\alpha_c$	0,85	$\alpha_c$	0,85	$\alpha_c$	0,85
$\lambda$	0,8	$\lambda$	0,8	$\lambda$	0,8	$\lambda$	0,8
$\rho_{fb}$ (%)	0,35	$\rho_{fb}$ (%)	0,30	$\rho_{fb}$ (%)	0,53	$\rho_{fb}$ (%)	0,46
Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto		Esmagamento do concreto	
Momento resistente				Momento resistente			
x (mm)	47,88	x (mm)	41,48	x (mm)	40,00	x (mm)	34,49
$\varepsilon_f$ (‰)	9,29	$\varepsilon_f$ (‰)	11,27	$\varepsilon_f$ (‰)	11,81	$\varepsilon_f$ (‰)	14,26
$\sigma_{fd}$ (MPa)	445,98	$\sigma_{fd}$ (MPa)	540,82	$\sigma_{fd}$ (MPa)	566,99	$\sigma_{fd}$ (MPa)	684,42
$M_{Rd}$ (kN.m)	10,92	$M_{Rd}$ (kN.m)	13,46	$M_{Rd}$ (kN.m)	14,16	$M_{Rd}$ (kN.m)	17,33
Força resistida				Força resistida			
F (kN)	18,99	F (kN)	23,40	F (kN)	24,63	F (kN)	30,14

# APÊNDICE C

## C.1 AMBIENTE LABORATORIAL

Na Figura 125 e Figura 126 encontram-se os gráficos de força *versus* rotação dos apoios e força *versus* deslocamento do perfil metálico para as vigas V\_LAB\_S\_5000h, V\_LAB\_GFRP\_5000h, V\_LAB\_S\_10000h e V\_LAB\_GFRP\_10000h

**Figura 125: Gráfico de força *versus* rotação dos apoios e força *versus* deslocamento do perfil metálico para as vigas V\_LAB\_S\_5000h e V\_LAB\_GFRP\_5000h**



**Figura 126: Gráfico de força *versus* rotação dos apoios e força *versus* deslocamento do perfil metálico para as vigas V\_LAB\_S\_10000h e V\_LAB\_GFRP\_10000h**

