



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**RUAN CARLOS DE ARAÚJO MOURA**

**ANÁLISE DA DURABILIDADE DE ARMADURAS POLIMÉRICAS  
REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO SUBMETIDAS AO AMBIENTE  
ALCALINO E A ELEVADAS TEMPERATURAS**

Salvador  
2021



**RUAN CARLOS DE ARAÚJO MOURA**

**ANÁLISE DA DURABILIDADE DE ARMADURAS POLIMÉRICAS  
REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO SUBMETIDAS AO AMBIENTE  
ALCALINO E A ELEVADAS TEMPERATURAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Véras Ribeiro

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima

Agência Financiadora: Sem financiamento.

Salvador

2021

M929 Moura, Ruan Carlos de Araújo.

Análise da durabilidade de armaduras poliméricas reforçadas com fibras de vidro submetidas ao ambiente alcalino e a elevadas temperaturas / Ruan Carlos de Araújo Moura. – Salvador, 2021.

146 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Véras Ribeiro.

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima.

Tese (Doutorado – Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2021.


1. Vergalhão de GFRP. 2. Concreto. 3. Alcalinidade. 4. Degradação. I. Ribeiro, Daniel Véras. II. Lima, Paulo Roberto Lopes. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDD: 620.136

**RUAN CARLOS DE ARAÚJO MOURA****ANÁLISE DA DURABILIDADE DE ARMADURAS POLIMÉRICAS REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO SUBMETIDAS AO AMBIENTE ALCALINO E A ELEVADAS TEMPERATURAS**

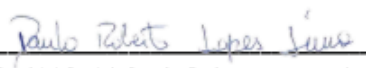
Tese apresentada como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia.

Aprovada em 02 de dezembro de 2021.

**BANCA EXAMINADORA**


---

Prof.(a) Dr.(a) **Daniel Véras Ribeiro**  
**Orientador**  
PPEC-UFBA



---

Prof.(a) Dr.(a) **Paulo Roberto Lopes Lima**  
**Coorientador**  
PPEC-UFBA



---

Prof.(a) Dr.(a) **Cleber Marcos Ribeiro Dias**  
PPEC-UFBA




---

Prof.(a) Dr.(a) **Gláucia Maria Dalfré**  
PPGECiv/UFSCar



---

Prof.(a) Dr.(a) **Sandro Campos Amico**  
PPGE3M (UFRGS)



---

Prof.(a) Dr.(a) **Bernardo Fonseca Tutikian**  
PPGEC (UNISINOS)



## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a minha Família.*





## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me conduzido, abençoado, iluminado e cuidado em todos os momentos.

A minha esposa Brenda e ao meu filho Théo, por ter me apoiado e aconselhado nesta caminhada.

A toda a minha Família, que sempre me apoiou.

Ao Prof. Dr. Daniel Vêras Ribeiro, pela orientação, amizade, confiança, acolhimento e estrutura disponibilizada (LEDMa/UFBA).

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima, pela orientação, apoio, incentivo, amizade e compreensão e estrutura disponibilizada (Laboratório de Materiais de Construção/UEFS).

A Universidade Estadual de Santa Cruz, pela liberação das atividades e em especial aos Professores Aprígio Augusto Lopes Bezerra, Celso Carlino Maria Fornari Júnior, Joabson Lima Alves e José Renato de Castro Pessoa que me incentivaram e assumiram minhas atividades durante o afastamento.

Aos amigos Ricardo de Carvalho Alvim (*in memoriam*), Rosana de Albuquerque Árleo Alvim, Sergio Mota Alves (*in memoriam*), Fernando Tamariz Luna, Roberto Carlos Felício, Manoel Camilo Moleiro Cabrera, Evandro Sena Freire (*in memoriam*), Paulo Neilson dos Anjos e Adélia Maria Carvalho de Melo Pinheiro, pelo apoio, confiança e incentivo.

Ao Centro Tecnológico da Argamassa da UFBA, em especial ao técnico Paulo César de Jesus Sant'anna e aos Professores Vanessa Silveira Silva e Cleber Marcos Ribeiro Dias, por disponibilizarem sua infraestrutura para realização de ensaios.

Ao Laboratório de Geotecnia da UFBA, em especial ao técnico Armando José da Silva e à Professora Luciene de Moraes Eirado Lima, por disponibilizarem sua infraestrutura para realização de ensaios.

Ao Laboratório de Caracterização de Materiais do IFBA, em especial a técnica Carina Soares do Nascimento e o Professor Rodrigo Estevam Coelho, por disponibilizarem sua infraestrutura para realização de ensaios.

Ao Laboratório de Polímeros da UESC, em especial Professor Celso Carlino Maria Fornari Júnior, por disponibilizar sua infraestrutura para realização de ensaios.

Ao Laboratório de Biologia de Fungos da UESC, em especial Professores Cristina Pungartinik e Luiz Carlos Salay, por disponibilizarem sua infraestrutura para realização de ensaios.

Aos amigos técnicos de laboratório: Jeová, Ricardo (GEOAMB/UFBA) e Jamile Bomfim (CME/UESC) pela ajuda e cooperação nos experimentos desenvolvidos.

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica da FIOCRUZ/Salvador, em especial ao técnico Márcio Ferreira dos Santos e à Professora Adriana Lanfredi Rangel, por disponibilizarem sua infraestrutura para realização de ensaios.

A todos os companheiros e companheiras do LEDMa, em especial: Fernanda, Tatiana, Silas, Tiago, Gessivaldo, Igor Parente, Henrique, Bruna Silva, Mariana, Iago, Raphael Almeida, Helen Miranda e Gabriela.

À Haizer pelo fornecimento de parte dos vergalhões de GFRP e atenção dispensada a este trabalho.

À Stratus Compósitos Estruturais pelo fornecimento de parte dos vergalhões de GFRP e atenção dispensada a este trabalho.

Ao Ensino Público Brasileiro, que me permitiu chegar até aqui gratuitamente.

A todos os Professores e Técnicos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFBA, pelo apoio para que este trabalho pudesse ser realizado.

## FORMAÇÃO DO CANDIDATO

Técnico em Edificações, formado pelo Instituto Federal de Educação Tecnológica da Bahia (IFBA), 2003.

Bacharel em Engenharia de Produção e Sistemas, formado pela Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), 2009.

Mestre em Ciência Inovação e Modelagem em Materiais pela UESC, 2012.

*‘Eu vos escolhi e vos constituí para que vades e produzais fruto, e o vosso fruto permaneça. Eu assim vos constituí, a fim de que tudo o que pedirdes ao Pai em meu nome, Ele vos conceda’*

*(João 15, 16)*



## RESUMO

O vergalhão de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP) tem sido considerado uma alternativa para minimizar a degradação das estruturas de concreto armado e reduzir o impacto econômico resultante das atividades de manutenção e reabilitação destas estruturas. No entanto, esses vergalhões podem ter sua vida útil reduzida por alterações físicas, químicas e mecânicas que podem ocorrer quando expostos a ambiente alcalino ou elevadas temperaturas. Nesse contexto, buscando uma melhor compreensão dos mecanismos de degradação em ambientes de elevada agressividade, este trabalho avaliou a durabilidade dos vergalhões de GFRP, fabricados com matrizes poliméricas poliéster isoftálica, éster vinílico e epóxi, com diâmetros nominais de 6,0 e 13,0 mm. Assim, foram realizados ensaios de envelhecimento acelerado nos vergalhões de GFRP expostos a solução alcalina (pH 8,5, 12,6 e 13,5), nas temperaturas de 23°C, 40°C e 60°C e com diferentes períodos de exposição (500 h, 1000 h e 3000 h). Além dos vergalhões isolados, foram avaliadas amostras embutidas em concretos, com ou sem adição de sílica ativa, e em concreto carbonatado. Ensaio de tração direta e cisalhamento interlaminar foram realizados em vergalhões, isolados ou embutidos no concreto, submetidos a elevadas temperaturas (23°C, 150°C, 300°C e 350°C). A degradação das fibras de vidro, das matrizes poliméricas e das interfaces fibra-matriz e vergalhão-concreto foi avaliada antes e após o envelhecimento acelerado, utilizando as técnicas de análise termogravimétrica (TGA), calorimetria exploratória diferencial (DSC), análise térmica diferencial (DTA), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Os resultados mostraram que a degradação dos vergalhões de GFRP embutidos no concreto e envelhecidos foi inferior àqueles envelhecidos diretamente em solução alcalina. Os efeitos degradativos foram atenuados pela adição de sílica ativa, com perda na resistência ao cisalhamento interlaminar de 11,3%. Observou-se que a carbonatação do concreto resultou em um ambiente menos nocivo aos vergalhões de GFRP, com redução de 10,7% na resistência ao cisalhamento interlaminar após 3.000 horas de exposição. Quando expostos a elevadas temperaturas, o comportamento à tração dos vergalhões de GFRP tem influência significativa da matriz polimérica. Além disso, o uso de sílica ativa melhorou o desempenho do revestimento de concreto e, conseqüentemente, a proteção aos vergalhões de GFRP, dificultando a difusão de oxigênio e do calor. A aderência vergalhão/concreto foi comprometida pela degradação térmica das nervuras do vergalhão de GFRP. Após analisar uma combinação de fatores de degradação, os vergalhões de GFRP com matriz epóxi, dentre os vergalhões estudados, foi o que apresentou melhor desempenho em ambientes com exposição a elevadas temperaturas, e, em ambiente alcalino os vergalhões de GFRP com matriz éster vinílico apresentou melhor desempenho.

*Palavras-chave: Vergalhão de GFRP. Concreto. Alcalinidade. Degradação. Envelhecimento acelerado. Desempenho.*



## ANALYSIS OF DURABILITY OF POLYMERIC REINFORCEMENTS REINFORCED WITH GLASS FIBER SUBJECTED TO ALKALINE ENVIRONMENT AND ELEVATED TEMPERATURES

### ABSTRACT

Glass fiber reinforced polymer (GFRP) rebar has been considered an alternative to minimize the degradation of reinforced concrete structures and reduce the economic impact resulting from the maintenance and rehabilitation activities of these structures. However, these rebars may have their service life reduced by physical, chemical, and mechanical changes that can occur when exposed to alkaline environment or elevated temperatures. In this context, seeking a better understanding of degradation mechanisms in highly aggressive environments, this study evaluated the durability of GFRP rebars, manufactured with polymeric isophthalic polyester, vinyl ester, and epoxy, with nominal diameters of 6.0 and 13.0 mm. Thus, accelerated aging tests were performed in the GFRP rebars exposed to the alkaline solution (pH 8.5, 12.6, and 13.5), at temperatures of 23 °C, 40 °C, and 60 °C and with different exposure periods (500 h, 1000 h, and 3000 h). In addition to the isolated rebars, samples embedded in concrete, with or without the addition of silica fume, and carbonated concrete were evaluated. Tensile strength and interlaminar shear tests were performed in rebar, isolated, or embedded in concrete, subjected to elevated temperatures (23 °C, 150 °C, 300 °C, and 350 °C). The degradation of glass fibers, polymeric matrices and fiber-matrix and rebar-concrete interfaces was evaluated before, and after accelerated aging, using the techniques of thermogravimetric analysis (TGA), differential exploratory calorimetry (DSC), differential thermal analysis (DTA), scanning electron microscopy (SEM), and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The results showed that the degradation of GFRP rebars embedded in concrete and aged was lower than those directly aged in alkaline solution. The degradable effects were attenuated by the addition of silica fume, with a loss in interlaminar shear strength of 11.3%. It was observed that the carbonation of the concrete resulted in an environment less harmful to GFRP rebars, with a 10.7% reduction in interlaminar shear strength after 3,000 h of exposure. When exposed to elevated temperatures, the tensile strength behavior of GFRP rebars has a significant influence on the polymer matrix. In addition, the use of silica fume improved the performance of concrete covering and, consequently, the protection of GFRP rebars, making it difficult to diffuse oxygen and heat. The rebar/concrete adhesion was compromised by the thermal degradation of the ribs of the GFRP rebar. After analyzing a combination of degradation factors, GFRP rebars with epoxy matrix, among the rebars studied, presented the best performance in environments with exposure to elevated temperatures, and in an alkaline environment, the GFRP rebars with vinyl ester matrix presented better performance.

*Keywords: GFRP rebars. Concrete. Alkalinity. Degradation. Accelerated aging. Performance.*





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vergalhões de FRP: (A) com fibra de vidro (GFRP), (B) com fibra de carbono (CFRP); (C) com fibra de aramida (AFRP) e (D) com fibra de basalto (BFRP). .....	4
Figura 2. Estrutura química da resina poliéster isoftálica. ....	6
Figura 3. Estrutura química de uma resina éster vinílica. ....	7
Figura 4. Estrutura química de uma resina epóxi diglicidil éter do bisfenol A (DGEBA). ....	7
Figura 5. Representação esquemática de uma interfase. ....	10
Figura 6. Reatividade dos agentes promotores de adesão organosilanos. ....	11
Figura 7. Classificação dos vergalhões de FRP. ....	12
Figura 8. Processo de fabricação dos vergalhões de GFRP com nervuras helicoidais. ....	13
Figura 9. Tipos de superfície dos vergalhões de FRP: (A) nervurada com fibra enrolada helicoidalmente, (B) nervurada com fibra enrolada helicoidalmente e revestida com areia e (C) nervurada com conformação na resina. ....	14
Figura 10. Fatores que podem interferir na durabilidade dos vergalhões de GFRP. ....	17
Figura 11. Comportamento característico da absorção de água, como função da raiz quadrada tempo, nos vergalhões de GFRP. ....	18
Figura 12. Processo de degradação dos vergalhões de GFRP expostos ao ambiente alcalino. ....	20
Figura 13. Representação esquemática da reação de termoxidação e consequentes danos à matriz polimérica, com a formação de microtrincas na superfície dos vergalhões de GFRP. ....	26

Figura 14. Retenção da resistência à tração em função da temperatura de exposição e do diâmetro do vergalhão de GFRP.....	27
Figura 15. Desenho esquemático e amostras de vergalhões de GFRP.....	31
Figura 16. Fluxograma da metodologia utilizada na presente pesquisa.....	33
Figura 17. Determinação da razão $OH/CH$ .....	36
Figura 18. Gabarito para fixação do sistema de ancoragem nas extremidades do vergalhão de GFRP.....	38
Figura 19. (A) Máquina universal INSTRON 23 – 200; (B) Posicionamento do corpo de prova na máquina universal (medidas em centímetros).....	39
Figura 20. Posicionamento do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento interlaminar.....	40
Figura 21. Preparação dos vergalhões de GFRP para o envelhecimento acelerado. .....	48
Figura 22. Formas cilíndricas (tubo PVC) utilizados para moldagem do concreto. .....	49
Figura 23. Preparação dos corpos de prova para o envelhecimento acelerado.	49
Figura 24. Sentido e direção do fluxo de $CO_2$ .....	50
Figura 25. Corpo de prova vergalhão de GFRP-N submetidos a elevadas temperaturas (dimensões em centímetros).....	52
Figura 26. Corpos de prova GFRP-C: (A) Dimensões (comprimento em centímetros), (B) Formas cilíndricas (tubo PVC) para moldagem do concreto e (C) Corpos de prova após a moldagem. ....	52
Figura 27. Montagem do ensaio de tração: (A) Corpo de prova GFRP-C (Medidas em centímetros), (B) Forno elétrico instalado com lã mineral nas extremidades dos corpos de prova, (C) Corpo de prova com termopar. ....	53

Figura 28. Curvas de TG e DTG das amostras de vergalhões de GFRP com: (A) matriz poliéster, (B) matriz éster vinílica e (C) matriz epóxi.....	57
Figura 29. Curvas DSC das amostras de vergalhões de GFRP com matriz poliéster, éster vinílica e epóxi.....	59
Figura 30. Distribuição granulométrica dos materiais utilizados para produção do concreto: (A) cimento CPV ARI e sílica ativa e (B) areia e brita.....	61
Figura 31. Difratoograma de raios X das amostras de cimento CP V ARI. ....	61
Figura 32. Difratoograma de raios X da amostra de sílica ativa. ....	62
Figura 33. Curvas TG e DTA das pastas de cimento: (A) REF e (B) SA-10, aos 28 dias.....	63
Figura 34. Profundidades de carbonatação observadas em concretos de referência (REF) após 56, 63 e 70 dias de carbonatação acelerada.....	66
Figura 35. Absorção de água média em função do tempo de imersão dos vergalhões de GFRP em solução alcalina nas temperaturas: (A) 23°C, (B) 40°C e (C) 60°C.....	68
Figura 36. Resistência ao cisalhamento interlaminar média em função do tempo de condicionamento dos vergalhões de GFRP-P, GFRP-V e GFRP-E em solução alcalina para as temperaturas: (A) 23°C, (B) 40°C e (C) 60°C.....	73
Figura 37. Resistência ao cisalhamento interlaminar média em função da absorção de água dos vergalhões de (A) GFRP-P, (B) GFRP-V e (C) GFRP-E envelhecidos nas soluções alcalinas por 3000 h com pH iguais a 8,5, 12,6 e 13,5 e a diferentes temperaturas (23°C, 40°C e 60°C). ....	75
Figura 38. Espectros de FTIR dos vergalhões de GFRP com matrizes: poliéster (P), éster vinílica (V) e epóxi (E), imersos em soluções alcalinas com pH 8,5; 12,6 e 13,5 na temperatura de 60°C durante 3000 h. ....	77

Figura 39. Micrografias das superfícies de fratura em vergalhões de GFRP submetidos ao ensaio de cisalhamento interlaminar após 3000 h de imersão em solução alcalina a 60°C. ....	78
Figura 40. Micrografias da seção transversal dos vergalhões de GFRP com matriz (A, B) poliéster; e (C, D) éster vinílica, antes da imersão em solução alcalina, obtidas por MEV. ....	80
Figura 41. Micrografias da seção transversal dos vergalhões de GFRP com matriz (A, B) poliéster e (C, D) éster vinílica, imersas em solução alcalina a 23°C durante 1000 horas, obtidas por MEV. ....	81
Figura 42. Micrografias da seção transversal dos vergalhões de GFRP com matriz (A, B) poliéster e (C, D) éster vinílica, imersas em solução alcalina a 60°C durante 1000 h, por MEV. ....	82
Figura 43. Espectros de FTIR dos vergalhões de GFRP com matriz: (A) Poliéster (P), (B) Éster vinílica (V). ....	83
Figura 44. Absorção de água média dos vergalhões de GFRP com matrizes poliéster (P) e éster vinílica (V), imersas em solução alcalina a 23°C e 60°C. ...	85
Figura 45. Modelo de degradação do vergalhão de GFRP degradado em ambiente alcalino. ....	92
Figura 46. Resistência residual em função do dano à matriz e fibra de vidro, para o vergalhão de GFRP com fração volumétrica da fibra de vidro de 60 %. ....	93
Figura 47. Efeito do dano na matriz ( $D_m$ ) e do dano na fibra ( $D_f$ ) na resistência residual dos vergalhões de GFRP (linhas tracejadas representam os resultados da modelagem): (A) GFRP-P e (B) GFRP-V. ....	94

Figura 48. Retenção da resistência ao cisalhamento interlaminar média em função do tempo de imersão no concreto dos vergalhões de GFRP nas temperaturas: (A) 23°C, (B) 40°C e (C) 60°C.....	98
Figura 49. Espectros de FTIR dos vergalhões de GFRP com matrizes: poliéster (P), éster vinílica (V) e epóxi (E), imersos em concreto (REF, SA-10 e CAR), na temperatura de 60°C durante 3000 h.....	100
Figura 50. Micrografias da superfície de fratura em vergalhões de GFRP embutidos em concreto e envelhecidos durante 3000 horas a 60°C, após o ensaio de cisalhamento interlaminar.....	102
Figura 51. Curvas de força média em função do deslocamento para os vergalhões de GFRP submetidos a diferentes temperaturas: (A) GFRP-P, (B) GFRP-V e (C) GFRP-E.....	103
Figura 52. Fratura nos vergalhões de GFRP testados em temperaturas iguais a (A) 150°C e (B) 300°C.....	106
Figura 53. Micrografia das amostras submetidas a temperaturas elevadas: (A) GFRP-P, (B) GFRP-V e (C) GFRP-E.....	108
Figura 54. Relação entre a resistência à tração média e a resistência ao cisalhamento interlaminar média das amostras submetidas às temperaturas de 150°C e 300°C.....	109
Figura 55. Relação entre a força média aplicada e o deslocamento dos corpos de prova GFRP-C, com concreto de referência, REF, (A-C-E) e concreto contendo 10% de sílica ativa, SA-10, (B-D-F) submetidos a elevadas temperaturas. ....	110
Figura 56. Relação entre a retenção da resistência à tração média e a temperatura de teste das amostras: (A) GFRP-N, (B) GFRP-C-REF e (C) GFRP-C-SA10..	112

Figura 57. Falha longitudinal do concreto armado com vergalhões de (A) GFRP-P, (B) GFRP-V e (C) GFRP-E submetidos a 300°C. ....	114
Figura 58. Fratura na seção transversal dos corpos de prova de concreto: (A) GFRP-P, (B) GFRP-V e (C) GFRP-E submetida a elevadas temperaturas.....	115
Figura 59. Comportamento de um corpo de prova de concreto reforçado com vergalhão submetido à tração.....	117
Figura 60. Fissuras em corpos de prova GFRP-C: (A) padrão de fissuração, (B) Comportamento típico de carga <i>versus</i> deslocamento. ....	118
Figura 61. Curvas de força média <i>versus</i> deslocamento dos corpos de prova GFRP-C com concreto REF e SA-10 nas temperaturas de: (A) 23°C, (B) 300°C REF, e (C) 300°C SA. ....	119
Figura 62. Esquema de fissuração nos corpos de prova GFRP-C.....	120
Figura 63. Retenção da tensão de aderência dos vergalhões de GFRP inseridos ao concreto (A) de referência, REF e (B) contendo 10% de sílica ativa, SA-10. ....	122
Figura 64. Resistência à compressão diametral dos concretos REF e SA-10 submetidos a elevadas temperaturas. ....	123
Figura 65. Definição da área relativa da nervura ( $a_s$ ).....	124
Figura 66. Densificação da zona de transição entre o concreto e o vergalhão de GFRP devido a adição de sílica ativa. ....	125

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Propriedades físicas e mecânicas das resinas termorrígidas utilizadas na produção de materiais de FRP. ....	6
Tabela 2. Propriedades físico-mecânicas dos principais tipos de fibras de vidro. 9	
Tabela 3. Composição química das fibras de vidro. ....	9
Tabela 4. Classificação dos vergalhões de GFRP conforme diâmetro e resistência à tração, de acordo com a ASTM D7957. ....	14
Tabela 5. Coeficiente de expansão térmica típico do concreto, do aço e do vergalhão de GFRP. ....	15
Tabela 6. Resistência à tração dos vergalhões de GFRP expostos ao ambiente alcalino. ....	23
Tabela 7. Resistência à tração dos vergalhões de GFRP expostos à elevadas temperaturas. ....	29
Tabela 8. Especificação dos vergalhões de GFRP analisados. ....	31
Tabela 9. Critérios de avaliação do concreto com base na velocidade de propagação de onda ultrassônica. ....	46
Tabela 10. Composição e pH das soluções. ....	47
Tabela 11. Caracterização geométrica, física e mecânica média dos vergalhões de GFRP M6 e M13. ....	56
Tabela 12. Caracterização física dos materiais utilizados para a confecção de concreto. ....	60
Tabela 13. Composição química do cimento CP V e da sílica ativa (% em massa), determinada por FRX, na forma de óxidos. ....	62
Tabela 14. Propriedades físico-mecânicas dos concretos confeccionados sem sílica ativa (REF) e com adição de sílica ativa (SA-10). ....	65

Tabela 15. Coeficientes de difusão médios ( $D \times 10^{-7} \text{ mm}^2/\text{s}$ ) dos vergalhões de GFRP com matrizes poliéster, éster vinílico e epóxi, imersos em solução alcalina a 23°C, 40°C e 60°C, com diferentes pHs 8,5, 12,6 e 13,5. ....	70
Tabela 16. Resistência ao cisalhamento interlaminar média dos vergalhões de GFRP com matrizes poliéster (P), éster vinílico (V) e epóxi (E), imersas em solução alcalina a 23°C, 40°C e 60°C durante 500 h, 1000 h e 3000 h. ....	71
Tabela 17. Razão entre as áreas dos picos <i>OH/CH</i> . ....	84
Tabela 18. Temperatura de transição vítrea dos vergalhões de GFRP antes e após o envelhecimento. ....	84
Tabela 19. Concentrações de saturação médias <i>M<sub>m</sub></i> e os coeficientes de difusão <i>D</i> dos vergalhões de GFRP com matrizes poliéster e éster vinílico, imersas em solução alcalina a 23°C e 60°C. ....	86
Tabela 20. Composição química das fibras de vidro (% em massa) das amostras dos vergalhões de GFRP, com matriz poliéster (P) e éster vinílico (V), determinada por FRX, na forma de óxidos. ....	89
Tabela 21. Resistência à tração e módulo de elasticidade dos vergalhões de GFRP, com matriz poliéster (GFRP-P) e éster vinílico (GFRP-V), submetidas ao ataque químico. ....	90
Tabela 22. Resistência ao cisalhamento interlaminar média dos vergalhões de GFRP com matrizes poliéster, éster vinílico e epóxi, inseridas em corpos de prova de concreto nas temperaturas de 23°C, 40°C e 60°C nos períodos de 500 h, 1000 h e 3000 h. ....	97
Tabela 23. Resistência à tração média dos vergalhões de GFRP submetidos a elevadas temperaturas. ....	105



Tabela 24. Resistência ao cisalhamento interlaminar média dos vergalhões de GFRP submetidos à elevadas temperaturas.....	107
Tabela 25. Resistência à tração média dos vergalhões de GFRP com concreto de cobrimento, submetidos a elevadas temperaturas.....	111
Tabela 26. Resultados da análise ANOVA para a resistência à tração dos corpos de prova GFRP-N e GFRP-C testados em temperaturas entre 23°C e 300°C.	116
Tabela 27. Resultados da tensão de aderência, distância entre fissuras e força de primeira fissura dos corpos de prova GFRP-C nas temperaturas de 23°C, 150°C, 300°C e 350°C.....	118
Tabela 28. Resultado da análise ANOVA para a resistência de aderência dos corpos de prova GFRP-C testados nas temperaturas de 23°C – 350°C. ....	125



**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AFRP	Polímero reforçado com fibra de aramida
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
a/c	Água-cimento
BET	Brunauer, Emmett e Teller
BFRP	Polímero reforçado com fibra de basalto
BS	<i>British Standard</i>
BSE	<i>Back scattered electrons</i> – Eletrons retroespalhados
CFRP	Polímero reforçado com fibra de carbono
CP	Cimento <i>Portland</i>
CSA	<i>Canadian Standard Association</i>
DRX	Difração por raios-X
DSC	Calorimetria exploratória diferencial
DTG	Termogravimetria derivada
$d_b$	Diâmetro do vergalhão de GFRP
FIB	<i>International Federation for Structural Concrete</i>
FRX	Fluorescência de raios-X
FTIR	Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier
GFRP	Polímero reforçado com fibras de vidro
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JSCE	<i>Japan Society of Civil Engineers</i>
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	Norma Brasileira
PF	Perda ao fogo
$R_c$	Resistência à compressão
$R_T$	Resistência à tração
SE	<i>Secondary electrons</i> – Elétrons secundários
T	Temperatura
t	Tempo
$T_g$	Temperatura de transição vítrea

TGA	Análise Termogravimétrica
$\rho$	Massa específica

## SUMÁRIO

<b>BANCA EXAMINADORA.....</b>	<b>v</b>
<b>DEDICATÓRIA.....</b>	<b>vii</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>ix</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xv</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>xvii</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>xxiii</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>xxvii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>3</b>
2.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS (FRP).....	3
2.1.1 Matriz Polimérica .....	5
2.1.2 Fibra de Vidro .....	7
2.1.3 Interface.....	10
2.2 VERGALHÕES DE GFRP .....	12
2.2.1 Processo de produção .....	13
2.2.2 Características geométricas.....	13
2.2.3 Propriedades físicas .....	14
2.2.4 Propriedades mecânicas.....	15
2.3 DURABILIDADE DOS VERGALHÕES DE GFRP .....	16
2.3.1 Efeito da absorção de água .....	17
2.3.2 Efeito do meio alcalino .....	19
2.3.3 Efeito combinado do meio alcalino e temperatura.....	21
2.3.4 Efeito de elevada temperatura .....	25
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>31</b>
3.1 MATERIAIS.....	31
3.2 MÉTODOS.....	32
3.2.1 Caracterização dos materiais.....	32

3.2.1.1	Vergalhões de GFRP .....	34
3.2.1.2	Matérias-primas utilizadas na produção do concreto .....	40
3.2.1.3	Caracterização do concreto .....	42
3.2.2	Avaliação da durabilidade dos vergalhões de GFRP .....	46
3.2.2.1	Exposição ao ambiente alcalino .....	46
3.2.2.2	Exposição a elevadas temperaturas .....	51
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>55</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	55
4.1.1	Vergalhões de GFRP .....	55
4.1.2	Agregados e aglomerantes .....	60
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO .....	63
4.2.1	Análise térmica da matriz cimentícia .....	63
4.2.2	Propriedades físicas e mecânicas do concreto .....	65
4.2.3	Carbonatação do concreto .....	66
4.3	AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DOS VERGALHÕES DE GFRP .....	67
4.3.1	Envelhecimento em solução alcalina .....	67
4.3.1.1	Vergalhões de GFRP – M6 .....	67
4.3.1.2	Vergalhões de GFRP – M13 .....	79
4.3.2	Envelhecimento do concreto armado .....	95
4.3.3	Exposição a elevadas temperaturas .....	103
4.3.3.1	Vergalhões de GFRP .....	103
4.3.3.2	Concreto armado com vergalhões de GFRP.....	110
4.3.3.3	Aderência dos vergalhões de GFRP ao concreto .....	116
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>126</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>129</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>130</b>
	<b>APÊNDICE.....</b>	<b>144</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto armado é um dos materiais de construção mais utilizados em todo o mundo desde o século XIX. No entanto, a corrosão das armaduras de aço, induzida pelo ataque por cloretos e/ou carbonatação, constitui-se como a principal causa de degradação destas estruturas (MEET *et al.*, 2021). Uma vez iniciada, a corrosão progride, resultando na perda de volume do vergalhão de aço e na formação de produtos de corrosão. Como resultado, ocorre a formação de fissuras no concreto, subsequentemente, a sua fragmentação, implicando em consideráveis consequências técnicas, financeiras e sociais. Estimam-se que os prejuízos sejam de cerca de 3,5% do produto interno bruto do Brasil (CRUZ *et al.*, 2016). Uma alternativa para reduzir a degradação das estruturas de concreto armado é a utilização de vergalhões com menor susceptibilidade à agressividade ambiental, como os vergalhões de polímero reforçado com fibras de vidro (*Glass Fiber Reinforced Polymer - GFRP*) (ARCZEWSKA *et al.*, 2021).

Os vergalhões de GFRP são compósitos formados por fibras de vidro impregnadas em uma matriz polimérica. Esta matriz pode ser formada por resinas termorrígidas dos tipos poliéster, éster vinil ou epóxi, adições e aditivos (BENMOKRANE *et al.*, 2017), e o reforço é constituído por fibras de vidro contínuas. Estes vergalhões têm sido utilizados em estruturas de concreto armado, em túneis, pontes, viadutos, portos e obras de arte especiais (D'ANTINO *et al.*, 2018; JIA *et al.*, 2020), devido às suas características de elevada resistência e rigidez específicas, por não sofrer corrosão eletroquímica, possuir transparência eletromagnética e facilidade na fabricação e transporte (EL HASSAN e EL MAADAWY, 2019).

Apesar das excelentes propriedades que apresentam, os vergalhões de GFRP não são imunes à degradação e podem ser afetados por diferentes fatores ambientais, tais como: degradação química, térmica e/ou mecânica. Isso afeta a sua durabilidade e, mais especificamente, sua capacidade de manter seu desempenho estrutural em condições ambientais severas.

Quando utilizado como reforço interno ao concreto, os vergalhões de GFRP entram em contato com um ambiente caracterizado por conter em seus poros uma solução de elevada alcalinidade, com pH variando de 12 a 13,5 (RIBEIRO, 2018). Nesta solução estão presentes íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), resultantes da dissolução dos hidróxidos da matriz cimentícia ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e  $\text{KOH}$ ), que podem difundir-se através da matriz polimérica (MOURA *et al.*, 2021). Enquanto a solução, presente nos poros do

concreto, conservar o seu caráter básico, haverá um ambiente propício a degradação química dos vergalhões de GFRP (polímero reforçado com fibras de vidro).

Além disto, quando as estruturas de concreto armado são expostas a elevadas temperaturas, os vergalhões de GFRP podem sofrer degradação térmica, devido à natureza orgânica da matriz polimérica, podendo resultar em alterações nas suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, e levando à redução de sua vida útil (D'ANTINO *et al.*, 2018). Esta vulnerabilidade dos polímeros orgânicos em elevadas temperaturas é provavelmente a maior desvantagem dos vergalhões de GFRP. Embora muitos exemplos de estruturas de concreto reforçado com vergalhões de GFRP estejam disponíveis em todo o mundo, elas são frequentemente estruturas para as quais o fogo não é uma condição de projeto significativa.

As Normas internacionais geralmente fornecem sugestões para o projeto em condições normais de temperatura de estruturas de concreto armado com vergalhões de GFRP (JSCE, 1997; CNR/DT-203, 2006; FIB *Bulletin* 40, 2007; CAN/CSA-S806, 2012; ACI 440.3R, 2015). Entre os padrões listados acima, o guia técnico do Instituto Americano do Concreto (ACI 440-1R, 2015) recomenda que o reforço de FRP não deve ser usado em casos em que a resistência ao fogo seja um requisito essencial. Por outro lado, o guia canadense CAN-CSA-S806 (CAN, 2012) fornece requisitos de projeto específicos no que diz respeito aos efeitos de elevadas temperaturas em lajes de concreto armado com vergalhões de GFRP. Uma série de recomendações são fornecidas para estimar a espessura de cobrimento de concreto necessário para manter a temperatura dos vergalhões de GFRP dentro de um limite aceitável definido como “temperatura crítica” (ou seja, a temperatura da armadura de GFRP na qual se espera o colapso da laje sob cargas de serviço em condições de incêndio). No entanto, o método pode ser aplicado apenas se a temperatura crítica for conhecida.

A abundância de Normas técnicas sobre o projeto de estruturas de concreto reforçadas com vergalhões de GFRP reflete claramente que estes vergalhões apresentam um elevado desempenho, no entanto, mostra também um comportamento complicado em caso de incêndio. Desta maneira, a pesquisa sobre esse tema é necessária uma vez este material é novo, não-convencional, demandado melhor entendimento sobre seu comportamento e, também, sobre o comportamento de elementos de concreto com estes vergalhões em elevadas temperaturas.



## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS (FRP)

Os materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras, “FRP” (*Fiber Reinforced Polymer*), surgem como resultado de uma combinação racional de fibras (reforço) incorporada em uma matriz formada por polímeros, adições e aditivos (HOLLAWAY, 2010). As fibras têm a função de fornecer resistência e rigidez ao compósito, enquanto a matriz impregna as fibras, transferindo tensões e mantendo a posição e o distanciamento, além de fornecer proteção contra agentes (ACI 440-1R, 2015).

Após a Segunda Guerra Mundial, a necessidade de satisfazer a demanda da indústria aeroespacial não atendida por materiais tradicionais induziu pesquisadores e cientistas a procurar novas soluções. Como resposta foram desenvolvidos os materiais compósitos de FRP; um material leve, com resistência e rigidez superiores aos materiais convencionais, o que reduziu o peso das estruturas das aeronaves. Posteriormente outros setores indústrias, como o naval, o automotivo, e o esportivo começaram a usar compósitos de FRP (NASER *et al.*, 2019).

A expansão do sistema rodoviário nos Estados Unidos na década de 1950 aumentou a necessidade de manutenção, principalmente, devido a utilização de sais para provocar o degelo em pontes rodoviárias. Esta prática resultou na degradação das estruturas de concreto armado (corrosão) com vergalhões de aço pela ação dos íons cloro, tornando-se uma grande preocupação e levando ao alto custo de manutenção. Várias soluções foram investigadas, incluindo vergalhões com revestimento galvanizado, vergalhões com revestimento de epóxi e vergalhões de polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP) (D’ANTINO *et al.*, 2018).

Dessas opções, os vergalhões de aço revestido com epóxi parecia ser a melhor solução e, portanto, foi implementado em ambientes agressivos de corrosão. O vergalhão de GFRP não foi considerado uma solução viável e não estava disponível comercialmente até o final da década de 1970. Na década de 1980, a maior demanda de vergalhões de GFRP foi em instalações médicas para abrigar equipamentos de ressonância magnética. Os vergalhões de GFRP tornou-se o padrão neste tipo de construção. Outros usos desenvolvidos à medida que as vantagens do reforço de FRP tornaram-se mais conhecidos e desejados, especificamente na construção de muros de arrimo, bases de reatores de subestação, pistas aeroportuárias e laboratórios eletrônicos. Além disso, a detecção de corrosão nos vergalhões de aço revestidas com

epóxi, aumentou o interesse em métodos alternativos de evitar a corrosão. Mais uma vez, o reforço de GFRP começou a ser considerado como uma alternativa para resolver problemas de corrosão em decks de pontes e outras estruturas (ACI 440-1R, 2015).

Este material começou a ser utilizado no Japão na década de 1990, tendo o maior número de aplicações de reforço de FRP, com mais de 100 projetos de demonstração ou comercial. As recomendações de projeto de estruturas de concreto armado reforçadas com fibras foram incluídas nas recomendações de projeto e construção da Sociedade Japonesa de Engenharia Civil. Nos anos 2000, a China tornou-se o maior usuário de reforço de FRP para novas construções em aplicações que se estendem de decks de pontes a obras subterrâneas. O uso do reforço de FRP na Europa começou na Alemanha com a construção de uma ponte rodoviária em 1986. Desde a construção desta ponte, foram implementados programas para aumentar as pesquisas e o uso do reforço de FRP na Europa (NANNI, 2014; ACI 440-1R, 2015). Atualmente, os vergalhões de FRP vem sendo aplicados como reforço interno nas estruturas de concreto armado, principalmente em obras de infraestrutura, sendo comercializados com diferentes tipos de resinas poliméricas e diferentes tipos de fibras, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1. Vergalhões de FRP: (A) com fibra de vidro (GFRP), (B) com fibra de carbono (CFRP); (C) com fibra de aramida (AFRP) e (D) com fibra de basalto (BFRP).



Fonte: AHMED *et al.* (2020)

### 2.1.1 Matriz Polimérica

A matriz polimérica tem a função principal de integrar e transmitir as tensões nas fibras, atuando de forma mais positiva na integração interfacial fibra-matriz. Entretanto, a constituição das matrizes poliméricas apresenta uma grande variedade e ampla composição. Entre os diversos fatores que influenciam as propriedades desta matriz, podem ser citados como de importância significativa o peso molecular do polímero, a forma espacial de agrupamento (reticulação, grau de cristalinidade), a constituição química, a modificação da macromolécula e a formação de blendas.

A atuação da matriz também ocorre na proteção das fibras contra danos por abrasão e impacto e à exposição a condições ambientais severas, tais como calor, água, sais e álcalis, que afetam a durabilidade do material e fornecem volume e maiores condições de ancoramento para futuras aplicações (BENMOKRANE *et al.*, 2017).

A seleção adequada da matriz polimérica para a fabricação de um material FRP é de fundamental importância, pois suas propriedades físicas, químicas e térmicas afetam significativamente as propriedades mecânicas finais deste material, bem como o processo de fabricação (ISIS, 2007). As matrizes poliméricas podem ser classificadas como:

- Termorrígidas: não podem ser fundidas após processo de reticulação;
- Termoplásticas: podem ser fundidas após a polimerização;

As matrizes mais utilizadas para a fabricação de compósitos de FRP para aplicações estruturais são as termorrígidas, podendo ser líquidas, pastosas ou sólidas à temperatura ambiente (AMRAN *et al.*, 2018).

Ao misturar um reagente adequado, estas matrizes reticulam, unindo as cadeias com ligações intermoleculares para se tornarem um material sólido à temperatura ambiente, formando uma estrutura tridimensional rígida que não pode ser remodelada pela aplicação de calor ou pressão (HOLLAWAY, 2010).

Algumas resinas termorrígidas amplamente utilizadas em materiais de FRP desenvolvidos para aplicação no setor da construção civil são a poliéster, a éster vinílica e a epóxi (SAWPAN *et al.*, 2014). As propriedades físicas e mecânicas destes polímeros são apresentadas na Tabela 1.

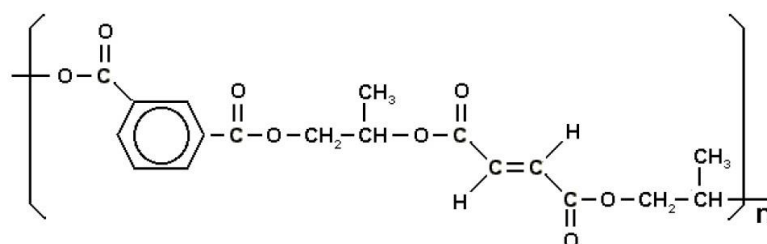
Tabela 1. Propriedades físicas e mecânicas das resinas termorrígidas utilizadas na produção de materiais de FRP.

Propriedade	Resina		
	Poliéster	Éster vinílica	Epóxi
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	1200 – 1400	1150 – 1350	1200 – 1400
Temperatura de transição vítrea (°C)	70 – 100	70 – 165	95 – 175
Coeficiente de expansão térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	55 – 100	50 – 75	45 – 65
Resistência à tração (MPa)	34,5 – 103,5	73,0 – 81,0	55,0 – 130,0
Módulo de elasticidade (GPa)	2,1 – 3,4	3,0 – 3,3	2,8 – 4,1

Fonte: Adaptado de BENMOKRANE *et al.* (2017); NANNY (2014).

As resinas do tipo poliéster são uma família de polímeros formadas a partir da reação de ácidos orgânicos carboxílicos e glicóis que, quando reagidos, dão origem a moléculas de cadeias longas lineares. Dependendo do tipo de ácido empregado, o poliéster pode ser saturado (termoplástico) ou insaturado (termofixo) (LEVY e PARDINI, 2006). Os poliésteres insaturados são formados pela reação entre um ácido insaturado, um ácido saturado e um diálcool. Dependendo do tipo de ácido insaturado utilizado, é possível obter diferentes tipos de resina poliéster. Assim, estas resinas podem ser denominadas como ortoftálica, tereftálica, isoftálica e bisfenólica, dependendo da composição macromolecular que apresentarão depois de formadas. A resina poliéster isoftálica vem sendo utilizada em materiais FRP para aplicações na construção civil devido às suas relevantes propriedades, tais como a resistência a ambientes agressivos. Estas resinas são produzidas a partir de uma reação entre o poliéster e um ácido isoftálico, apresentando uma estrutura com maior resistência química e mecânica, conforme mostrado na Figura 2.

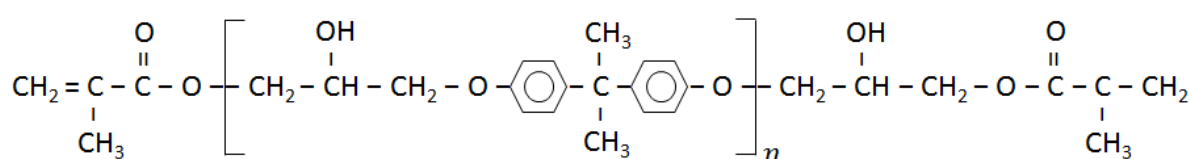
Figura 2. Estrutura química da resina poliéster isoftálica.



Fonte: MOREIRA (2013); MALLICK (1997).

As resinas éster vinílica são sintetizadas por meio de uma reação Bisfenol A ou Bisfenol F. Posteriormente, reagem com ácido acrílico ou metacrílico. Estas resinas possuem elevada resistência química, devido a elevada quantidade de insaturações (C=C) em relação aos grupos ésteres. As duplas ligações estão localizadas nas extremidades da cadeia, sendo, portanto, menos susceptíveis ao ataque químico (GARAY *et al.*, 2015). A estrutura química típica desse tipo de resina é apresentada na Figura 3.

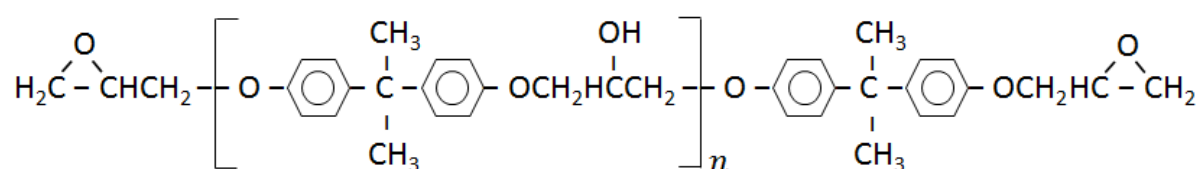
Figura 3. Estrutura química de uma resina éster vinílica.



Fonte: GARAY *et al.* (2015).

As resinas epóxi são polímeros termorrígidos de alto desempenho sendo caracterizadas por apresentar cadeias longas constituídas de grupos epoxídicos em suas extremidades. A resina epóxi à base de Bisfenol A são as mais utilizadas, pois são versáteis e de menor custo, proveniente da reação de Epicloridrina e Bisfenol A, como apresentado na Figura 4.

Figura 4. Estrutura química de uma resina epóxi diglicidil éter do bisfenol A (DGEBA).



Fonte: LEAL *et al.* (2012); MALLICK (1997).

### 2.1.2 Fibra de Vidro

Diversos tipos de fibras estão disponíveis no mercado, podendo ser classificadas em três categorias (animais, vegetais e minerais), além de naturais e sintéticas. As fibras geralmente usadas na produção de vergalhões de FRP são do tipo mineral sintéticas, sendo mais comumente aplicadas no setor industrial as de vidro, carbono e

aramida. Recentemente, as fibras contínuas de basalto tornaram-se disponíveis comercialmente como uma alternativa às fibras de vidro.

Em diversas aplicações industriais, as fibras de vidro estão presentes e ganhando cada vez mais aceitação. As fibras de vidro são comumente empregadas nos campos naval e industrial para a fabricação de materiais de FRP e são muito difundidas na engenharia civil, devido à excelente relação qualidade/preço. Estas se distinguem por sua elevada resistência à tração e por ter módulo de elasticidade inferior à das fibras de carbono e aramida (cerca de 80 GPa). Além disso, possuem excelente isolamento térmico e expansão térmica semelhante à do aço (MARTYNOVA e CEBULA, 2018).

Os requisitos estruturais e funcionais desejáveis nas fibras para aplicações em materiais de FRP são: elevado módulo de elasticidade para um uso eficiente como reforço e elevada resistência à tração; estabilidade das propriedades durante o manuseio e fabricação; uniformidade do diâmetro e superfície da fibra; alta tenacidade; durabilidade; disponibilidade em formas adequadas e custo aceitável (HOLLAWAY, 2010; FORNARI JUNIOR, 2017).

Segundo MARTYNOVA e CEBULA (2018), as fibras de vidro podem ser classificadas de acordo com as suas propriedades específicas, como:

- E (*Electrical*): baixa condutividade elétrica;
- S (*Strength*): alta resistência;
- C (*Chemical*): alta resistência química;
- M (*Modulus*): alta elasticidade;
- A (*Alkali*): alto teor de metais alcalinos, vidro de cal e sódio;
- D (*Dielectric*): baixa constante dielétrica;
- AR (*Alkali resistant*): alta resistência aos álcalis; e
- ECR (*Electrical chemically resistant*): alta resistência em ambientes com ácidos.

Algumas propriedades das principais fibras de vidro aplicadas na fabricação de materiais de FRP estão resumidas na Tabela 2. Todas essas fibras mencionadas exibem um comportamento elástico linear sob carga de tração, até a falha.

Tabela 2. Propriedades físico-mecânicas dos principais tipos de fibras de vidro.

Propriedade	Tipos de Fibra de Vidro		
	E	ECR	AR
Massa específica (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).

A composição química da fibra de vidro, inclui uma gama de óxidos na sua estrutura. O óxido de silício é o constituinte presente em maior quantidade nas fibras de vidro, conforme apresentado na Tabela 3. O silício é um grande responsável por conferir resistência às fibras de vidro, mas, ao mesmo tempo, aumenta sua fragilidade e pode reagir com as hidroxilas (OH<sup>-</sup>) da matriz cimentícia.

Tabela 3. Composição química das fibras de vidro.

Óxido	Tipo de Fibra de Vidro		
	E	ECR	AR
SiO <sub>2</sub>	52 – 56	54 – 62	55 – 75
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 – 10	---	0 – 8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12 – 16	9 – 15	0 – 5
CaO	16 – 25	17 – 25	1 – 10
MgO	0 – 5	0 – 4	---
ZnO	---	2 – 5	---
TiO <sub>2</sub>	0 – 4	0 – 4	0 – 12
ZrO <sub>2</sub>	---	---	1 – 18
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	0 – 2	0 – 2	11 – 21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 – 0,8	0 – 0,8	0 – 5
Fe <sub>2</sub>	---	---	0 – 5

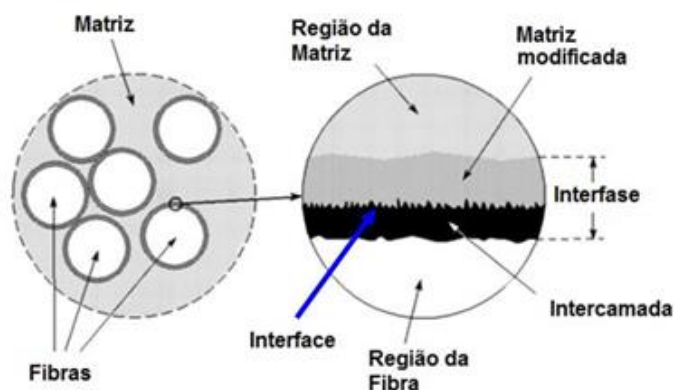
Fonte: Adaptado de MARTYNOVA e CEBULA (2018).

### 2.1.3 Interface

A interface entre a fibra de vidro e a matriz polimérica é uma região de transição anisotrópica que exibe uma gradação de propriedades através da qual ocorre a transferência esforços mecânicos da matriz para as fibras (THOMASON, 2019). Deve existir adequada compatibilidade química e física entre elas. Esta interface precisa ser estável durante a vida útil do compósito de FRP, sendo que a adesão inadequada entre as fases envolvidas na interface poderá provocar o início de falhas, comprometendo o desempenho do compósito (FAZA e GANGARAO, 1993).

De acordo com Ray e Rathore (2014), o desenvolvimento dos compósitos de FRP deve levar em consideração não apenas a contribuição específica dos seus constituintes, fibras e matriz, mas principalmente o conjunto representado pelo sistema interfaces. A interface constitui uma região tridimensional de contato entre as fibras e a matriz, envolvendo não só uma área bidimensional de contato (interface), mas, também, uma região de espessura finita que se estende em ambos os lados da interface, tanto na fibra quanto na matriz, conforme caracterizado na Figura 5.

Figura 5. Representação esquemática de uma interfase.



Fonte: Adaptado de RAY e RATHORE (2014).

No caso de compósitos de FRP, um contato íntimo a nível molecular entre as fibras e a matriz produz forças intermoleculares, com formação ou ligações químicas entre os componentes. Este contato íntimo requer que a matriz, presente as condições necessárias para molhar as fibras de vidro no momento da fabricação do compósito. Molhabilidade é o termo usado para descrever a extensão com que uma resina (líquida) se espalha sobre a superfície das fibras.



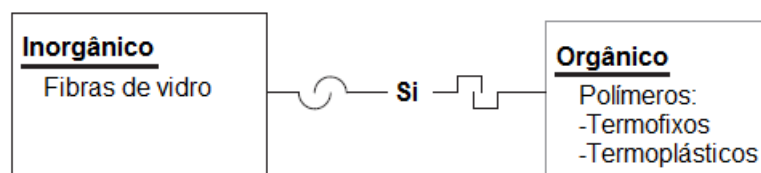
Um dos fatores que favorece a interação interfacial é o fenômeno de contração que a matriz polimérica sofre durante a sua cura (termoendurecidos) ou a sua solidificação. A contração proporciona aproximação de ambas as superfícies e aumenta a interação intermolecular ou interatômica. Se não houver formação de ligações intermoleculares fortes ou ligações químicas interatômicas, o ancoramento físico é o único processo de interação, que atua entre os constituintes.

A formação de vazios e uma menor adesão fibra-matriz, resultante de uma baixa molhabilidade levam a propriedades mecânicas reduzidas. A quantidade de vazios em compósitos de FRP é influenciada por diversos fatores, como: baixo molhamento durante a impregnação das fibras, adsorção de umidade na fibra, formação de substâncias gasosas durante o processo e contração da matriz durante a cura. Entretanto, é importante salientar que o aprisionamento mecânico de ar durante a impregnação é uma das principais razões para a formação de vazios.

No sentido de melhorar o desempenho dos compósitos de FRP, podem ser utilizados agentes promotores de adesão, que são produtos químicos que atuam na interface entre um polímero orgânico e uma superfície inorgânica (fibras de vidro) para aumentar a adesão entre os dois materiais (Figura 6). Estes agentes promotores de adesão são usualmente organosilanos, que apresentam uma estrutura do tipo  $[X-Si(OR)_3]$  (THOMASON, 2019), em que grupo R é susceptível de ligação a um grupo na matriz polimérica, e os grupos X podem hidrolisar na presença de água para formar um silanol, e condensam na superfície da fibra de vidro formando siloxanos, conforme Equação 1 (LEVY e PARDINI, 2006).



Figura 6. Reatividade dos agentes promotores de adesão organosilanos.



Fonte: Adaptado de PAPE (2011).

No entanto, essas ligações químicas que promovem a adesão entre as fibras de vidro e a matriz polimérica podem ser destruídas por mecanismos de degradação química na interface fibra-matriz e causar o descolamento físico, como será visto neste trabalho.

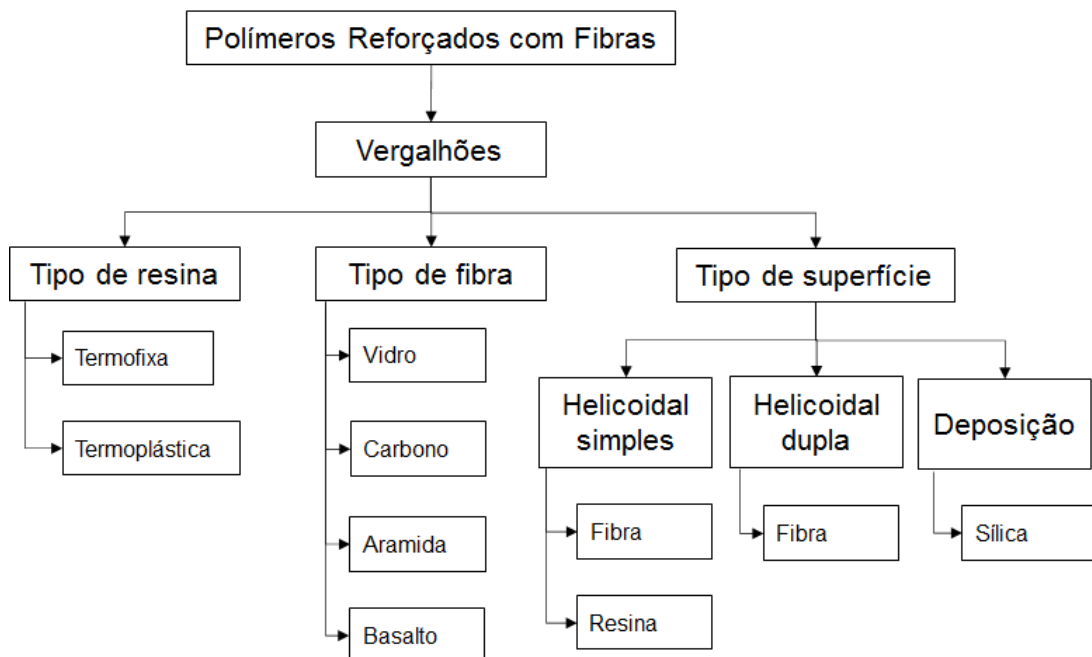
## 2.2 VERGALHÕES DE GFRP

Os vergalhões de FRP podem ser classificados de acordo com os tipos de fibras utilizadas como reforço: GFRP (Polímeros Reforçados com Fibra de Vidro), CFRP (Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono), AFRP (Polímeros Reforçados com Fibra de Aramida) e BFRP (Polímeros Reforçados com Fibras de Basalto) (AYDIN, 2018).

Assim como os vergalhões de aço, os vergalhões de FRP são produzidos em diferentes diâmetros, variando entre 6,3 e 32,3 mm, conforme ASTM D7957 (ASTM, 2017), com superfícies lisas, nervuradas, trançadas e/ou revestidas com sílica, a depender do processo de fabricação (COSENZA *et al.*, 1997). Este produto pode ser classificado, também, com base em seus constituintes e tipo de superfície, de acordo com a Figura 7.

Diferentes combinações entre tipos de fibras, matriz polimérica e superfície têm sido empregadas na produção de vergalhões de FRP, sendo os compósitos com matriz éster vinílica reforçados com fibras de vidro (GFRP), os mais comuns para aplicações na construção civil (EL-HASSAN e EL MAADDAWY, 2019).

Figura 7. Classificação dos vergalhões de FRP.



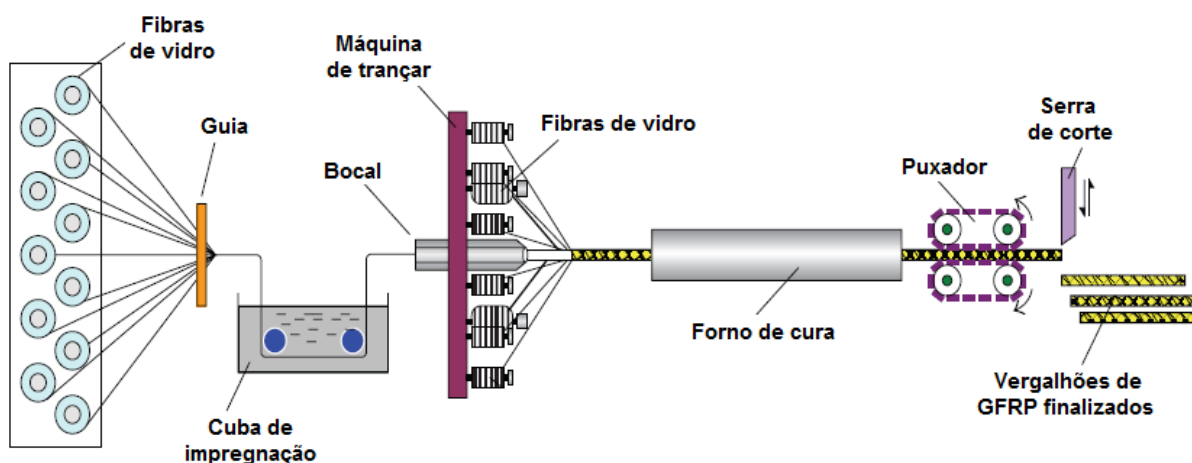
Fonte: Adaptado de EL-HASSAN e EL MAADDAWY (2019).

## 2.2.1 Processo de produção

Os vergalhões de GFRP são fabricados pelo processo de pultrusão, que se inicia com o tensionamento das fibras de vidro por uma máquina em direção a uma cuba de impregnação, em que uma resina líquida (termorrígida) impregna as fibras, em seguida, essa combinação de fibra de vidro e resina polimérica passa por um molde circular que irá conferir a forma da seção transversal do vergalhão.

No caso de vergalhões com nervuras helicoidais, ocorre a adição de fibras de vidro na sua superfície, por meio de um mecanismo giratório, concêntrico à passagem do vergalhão ainda liso, efetuando o enrolamento de uma ou mais fibras, constituindo as nervuras, de espaçamento ajustável, no corpo do vergalhão, conforme pode ser visto na Figura 8. Em seguida, o vergalhão é aquecido, ocorrendo a reticulação da resina polimérica e, finalizando o processo, o vergalhão é cortado de acordo com o comprimento desejado, estando pronto para uso (PORNOV *et al.*, 2013).

Figura 8. Processo de fabricação dos vergalhões de GFRP com nervuras helicoidais.



Fonte: Adaptado de YOU *et al.* (2015).

## 2.2.2 Características geométricas

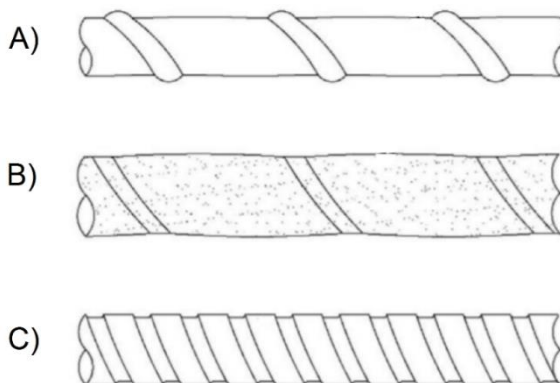
Os vergalhões de GFRP são classificados de acordo com o seu diâmetro nominal e área de seção transversal, conforme ASTM D7957 (ASTM, 2017), como pode ser visto na Tabela 4. As suas características geométricas assumem um papel importante na aderência com o concreto, uma vez que a tensão de aderência se desenvolve na camada exterior do vergalhão (BAENA *et al.*, 2009), em especial o tipo de acabamento superficial, conforme pode ser visto na Figura 9 (D'ANTINO *et al.*, 2018).

Tabela 4. Classificação dos vergalhões de GFRP conforme diâmetro e resistência à tração, de acordo com a ASTM D7957.

Designação dos vergalhões	M6	M10	M13	M16	M19	M22	M25	M29	M32
Diâmetro (mm)	6,3	9,5	12,7	15,9	19,1	22,2	25,4	28,7	32,3
Área da seção transversal (mm <sup>2</sup> )	31,2	70,9	126,7	198,6	286,5	387,1	506,7	646,9	819,4
Resistência à tração (MPa)	866,1	832,4	757,8	654,7	635,2	622,6	586,1	564,2	533,3

Fonte: Adaptado da ASTM D7957 (2017).

Figura 9. Tipos de superfície dos vergalhões de FRP: (A) nervurada com fibra enrolada helicoidalmente, (B) nervurada com fibra enrolada helicoidalmente e revestida com areia e (C) nervurada com conformação na resina.



Fonte: Adaptado de MOHAMED *et al.* (2021).

### 2.2.3 Propriedades físicas

Os vergalhões de GFRP possuem uma densidade que varia entre 1,25 e 2,10 g/cm<sup>3</sup>, isto é, cerca de 25% da densidade dos vergalhões de aço (7,90 g/cm<sup>3</sup>), o que reduz os custos de transporte e facilita o manuseio, na armazenagem ou uso no local da construção (GONÇALVES, 2013).

A fração mássica de fibras no vergalhão de GFRP é expressa pela relação entre a massa de fibras e a massa do vergalhão, conforme ASTM D3171 (ASTM, 2015). De acordo com a Norma ASTM D7957 (ASTM, 2017), os vergalhões de GFRP devem apresentar, no mínimo, 70% de fração mássica de fibras.

No processo de produção dos vergalhões de GFRP ocorre a reação de reticulação do polímero na etapa de aquecimento, resultando em um material sólido com uma fase cristalina e outra amorfa. Este processo provoca uma mudança irreversível nas propriedades da resina termoendurecível por reação química, e é denominado de cura. O grau de cura da resina polimérica, fornece informações sobre a qualidade do vergalhão de GFRP, que pode ser usada para inferir algum nível de resistência ou durabilidade química. De acordo com a Norma ASTM D7957 (ASTM, 2017), os vergalhões de GFRP devem apresentar o mínimo de 95% de cura.

O coeficiente de expansão térmica (CET) pode ser definido como o quociente que mede a alteração relativa de comprimento, ou volume, que ocorre quando o sólido experimenta uma alteração de temperatura, resultando assim, em uma dilatação térmica, conforme ASTM E1142 (ASTM, 2015). O CET dos vergalhões de GFRP, na direção longitudinal, é fortemente dependente das características das fibras, mas, na direção transversal é governado pela resina (ISIS, 2007). Na Tabela 5 é possível verificar valores típicos de CET, evidenciando que na direção longitudinal, o CET das fibras de vidro é similar ao do concreto.

Tabela 5. Coeficiente de expansão térmica típico do concreto, do aço e do vergalhão de GFRP.

Direção das Fibras	Concreto	Aço	Vergalhão de GFRP
Longitudinal ( $\alpha_L$ )	$8,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$11,3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$4,4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Transversal ( $\alpha_T$ )	$8,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$11,3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$22,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Fonte: AYDIN (2018).

#### 2.2.4 Propriedades mecânicas

A resistência à tração ( $\sigma_{GFRP}$ ) e o módulo de elasticidade ( $E_{GFRP}$ ) dos vergalhões de GFRP podem ser definidos pela contribuição de cada fase individual, matriz polimérica e fibra de vidro, e pode ser expressa pela regra das misturas, conforme apresentaram as Equações 2 e 3 (YOU *et al.*, 2015).

$$\sigma_{GFRP} = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad \text{Equação 2}$$

$$E_{GFRP} = E_f V_f + E_m V_m \quad \text{Equação 3}$$

Em que,  $\sigma_f$ ,  $V_f$ ,  $E_f$ ,  $\sigma_m$ ,  $V_m$ ,  $E_m$ , são correspondentes à resistência à tração, fração volumétrica e módulo de elasticidade da fibra de vidro e da matriz polimérica, respectivamente.

Comparativamente, os vergalhões de GFRP têm uma resistência à tração superior à dos vergalhões de aço, no entanto, apresentam menor módulo de elasticidade e não apresentam nenhum escoamento (deformação plástica) sob carga de tração e experimentam uma falha súbita e quebradiça no ponto de carregamento final (WON *et al.*, 2012). A Norma ASTM D7957 (ASTM, 2017) estabelece valores mínimos de resistência à tração para os vergalhões de GFRP, conforme Tabela 4.

Quando os vergalhões de GFRP são solicitados longitudinalmente, por meio de forças compressivas, apresentam menores valores de resistência, quando comparados aos valores obtidos a partir de ensaios de resistência à tração. Este comportamento está baseado no fato de a resistência à tração ser regida pelas fibras de vidro, enquanto a resistência à compressão é regida pela matriz polimérica. Maranan *et al.* (2016) demonstraram que a resistência à compressão associada aos vergalhões de GFRP, com diâmetro de 15,7 mm, correspondem a 51,7% da resistência à tração associada ao mesmo material.

### 2.3 DURABILIDADE DOS VERGALHÕES DE GFRP

Os vergalhões de GFRP são caracterizados pela sua resistência a corrosão eletroquímica e por apresentar maior resistência à tração em relação aos vergalhões de aço convencionais, no entanto, a sua durabilidade pode ser reduzida em ambientes alcalinos, elevadas temperaturas, ciclos de gelo/degelo e exposição à radiação ultravioleta, levando à redução de sua resistência mecânica.

Cada um dos elementos constituintes do vergalhão de GFRP (matriz polimérica, fibras de vidro e interface) pode estar suscetível à degradação, mas devem manter a integridade do vergalhão durante toda a vida útil, podendo ser avaliado por meio de ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório. A matriz polimérica deve ser resistente ao ambiente de exposição, portanto, deve evitar a deterioração das fibras de vidro e da região da interface, fornecendo uma barreira contra agentes agressivos (SAWPAN *et al.*, 2014), tais como: espécies iônicas, temperatura e radiação ultravioleta, além das características de fabricação do vergalhão como: acabamento superficial, homogeneidade da resina e defeitos de fabricação.

A possibilidade de deterioração depende de diferentes parâmetros, tais como tipo de fibra e matriz, processo de fabricação (taxa de cura, microfissuras térmicas, taxa de molhamento, conteúdo de vazio) e ambientes de exposição. Além disso, o uso dos vergalhões de GFRP como reforço interno às estruturas de concreto armado com várias condições ambientais e mecânicas faz da avaliação da durabilidade dos vergalhões de GFRP nas estruturas de concreto uma tarefa complexa e multidimensional.

O mecanismo de degradação dos vergalhões de GFRP se inicia por meio das quebras de ligações covalentes na cadeia principal ou nas cadeias secundárias da macromolécula da matriz polimérica. Essas quebras proporcionam radicais livres, ou seja, moléculas reativas com elétrons não compartilhados, podendo ser combinados a outros radicais formando ligações fracas (DE PAOLI, 2008).

De acordo com Micelli e Nanni (2004), o desempenho dos vergalhões de GFRP é reduzido devido às interferências ambientais, mecânicas ou à combinação destas, como pode ser verificado na Figura 10.

Figura 10. Fatores que podem interferir na durabilidade dos vergalhões de GFRP.



Fonte: Adaptado da ISIS (2007).

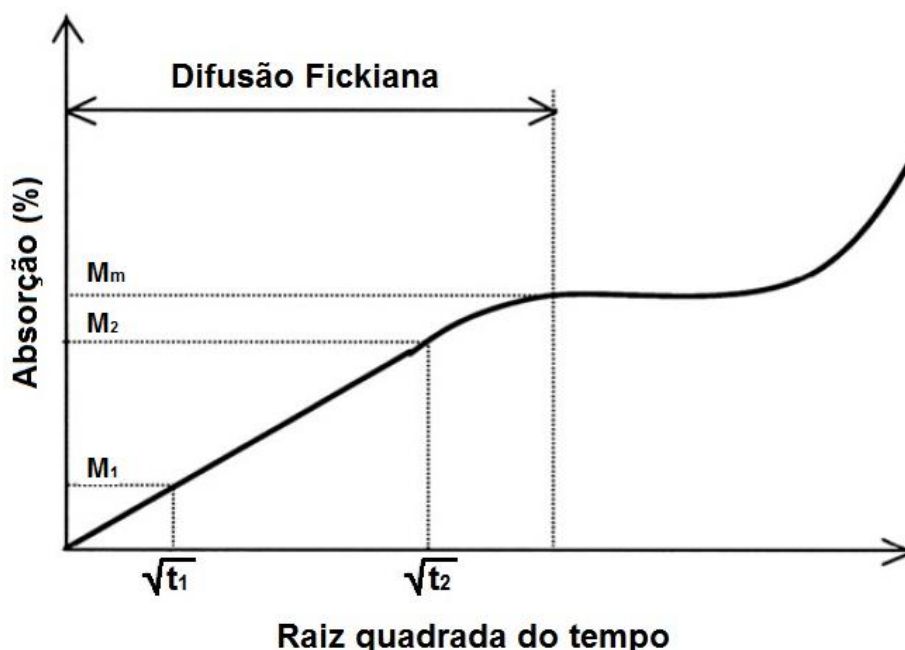
### 2.3.1 Efeito da absorção de água

A absorção de água tem um impacto significativo na degradação dos vergalhões de GFRP. Esta ocorre através da matriz polimérica, sendo transmitida radialmente por ação capilar até a superfície da fibra de vidro. O contato da água com as fibras de

vidro, faz com que seja iniciadas reações químicas entre as moléculas de água, íons hidroxila o óxido de silício, o que pode provocar a sua decomposição. Este processo prossegue até a obtenção do equilíbrio. A entrada de água está associada ao aumento da separação entre as cadeias moleculares da matriz polimérica, induzindo, assim, tensões internas, fenômeno conhecido por plastificação (WEITSMAN, 2012). Além disso, o volume da matriz polimérica aumenta e microfissuras se formam em direção ao interior do vergalhão de GFRP (WON *et al.*, 2012).

O comportamento típico de difusão no vergalhão de GFRP é mostrado na Figura 11. A quantidade de água absorvida aumenta linearmente durante um certo tempo. Em seguida, a absorção permanece constante quando o vergalhão chega ao estado de saturação, podendo aumentar, à medida que a água penetra nas microfissuras que se formaram devido à degradação da matriz polimérica.

Figura 11. Comportamento característico da absorção de água, como função da raiz quadrada tempo, nos vergalhões de GFRP.



Fonte: Adaptado de WON *et al.* (2012).

A interface entre a fibra de vidro e a matriz polimérica é enfraquecida, provocando o seu descolamento. Os efeitos degradativos devido à absorção de água afetam, também, o desempenho mecânico do vergalhão de GFRP, alterando a temperatura de transição vítrea e a elasticidade, resultando em uma perda da capacidade de



proteção e transmissão de esforços para as fibras de vidro (WEITSMAN, 2012). A difusão de água no interior da matriz polimérica difere em função da quantidade de moléculas absorvidas e características microestruturais, como polaridade, grau de reticulação, presença de monômeros residuais, tais como o estireno, no caso da resina do tipo poliéster (YIN *et al.*, 2019).

Para modelar o processo de difusão de água, inúmeros modelos foram propostos ao longo dos anos. O modelo Fickiano unidimensional vem sendo utilizado devido à sua simplicidade (Equação 4)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{Equação 4}$$

Em que  $c$  é a concentração,  $x$  é a direção da difusão e  $D$  é o coeficiente de difusão na direção  $x$ . A absorção de água ( $M_t$ ) em função do tempo pode ser calculada utilizando a Equação 5 (WANG *et al.*, 2016).

$$M_t = M_m \left\{ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ -\frac{Dt}{h^2} \pi^2 (2n+1)^2 \right] \right\} \quad \text{Equação 5}$$

Em que  $M_m$  é a absorção de saturação (ou percentual) de água e  $h$  é a espessura da amostra (adotada como o diâmetro do vergalhão de GFRP).

O coeficiente de difusão ( $D$ ) pode ser obtido na faixa linear da Figura 11 e calculado por meio da Equação 6 (WON *et al.*, 2012).

$$D = \frac{\pi}{16} \left[ \frac{h(M_2 - M_1)}{M_m(\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1})} \right]^2 \quad \text{Equação 6}$$

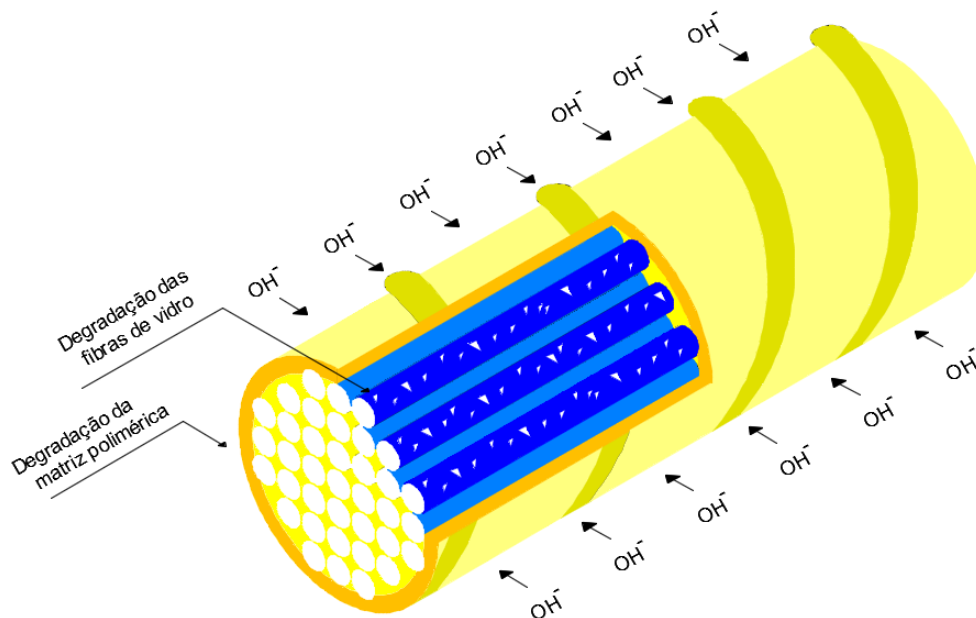
Em que  $M_1$  e  $M_2$  representam a absorção de água para os tempos  $t_1$  e  $t_2$ , respectivamente.

### 2.3.2 Efeito do meio alcalino

Estudos mostram que a elevada alcalinidade da solução dos poros do concreto (pH entre 12,5 e 13,5) é a principal responsável pela degradação dos vergalhões de GFRP (MICELLI e NANNI, 2004; CERONI *et al.*, 2006; D'ANTINO *et al.*, 2018). A degradação dos vergalhões de GFRP submetidos ao ambiente alcalino (concreto) tem início quando os íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), moléculas de água e íons alcalinos se difundem

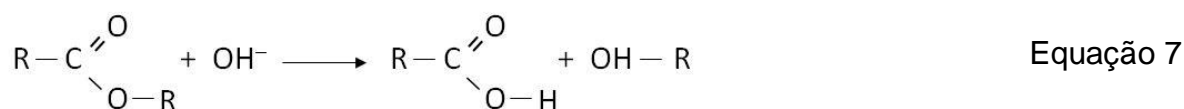
por meio da matriz polimérica, conforme esquema mostrado na Figura 12, sendo responsável por diversos mecanismos degradantes na matriz polimérica e nas fibras de vidro.

Figura 12. Processo de degradação dos vergalhões de GFRP expostos ao ambiente alcalino.



Fonte: O autor.

O mecanismo de degradação dos vergalhões de GFRP em ambiente alcalino se inicia com a difusão dos íons hidroxila e das moléculas de água, inicialmente, na matriz polimérica da região periférica do vergalhão de GFRP. Esta difusão envolve um grau de complexidade maior quando comparada a materiais com estrutura cristalina definida. A matriz polimérica pode apresentar regiões parcialmente cristalinas (semicristalinas) e cristais dispersos na parte amorfa restante, fazendo com que o transporte de massa ocorra através de dela. As regiões amorfas possuem maior abertura entre as moléculas, o que viabiliza a interdifusão dos íons hidroxila e das moléculas de água (SAWPAN, 2016). Essas espécies iônicas promovem o rompimento de ligações, principalmente no grupo éster, de ligação mais fraca, provocando a reação de hidrólise, conforme Equação 7, com a formação de álcool e sal de ácido carboxílico (ZHU *et al.*, 2011).



A degradação da resina polimérica provoca o aumento de volume, fissuração e plastificação, o que pode afetar suas propriedades físicas e mecânicas (CHEN *et al.*, 2007). Com o prosseguimento da difusão, os íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), que se encontram na solução dos poros do concreto, quebram as ligações de sílica. Com o tempo, as fibras de vidro perdem peso e resistência (Equação 8), gerando sua fragilização (ARABI *et al.*, 2018). A degradação não estará mais relacionada apenas à taxa de difusão, mas, também, à atividade de dissolução da  $\text{SiO}_2$ .



### 2.3.3 Efeito combinado do meio alcalino e temperatura

A ação combinada do meio alcalino com a temperatura provoca uma aceleração da degradação dos vergalhões de GFRP, provocando maior difusão de espécies iônicas na matriz polimérica. Além disso, a diferença no coeficiente de dilatação térmica entre a matriz polimérica e a fibra de vidro (como pode ser visto nas Tabelas 1 e 2) pode resultar em tensões internas ao vergalhão de GFRP e conseqüentemente danos na interface fibra-matriz.

Para investigar o comportamento a longo prazo dos vergalhões de GFRP submetidos ao ambiente alcalino e temperatura, vários grupos de pesquisa vêm realizando testes para determinar as alterações das propriedades físicas, químicas e mecânicas nestes vergalhões. Abbasi e Hogg (2005) realizaram uma investigação da durabilidade de três categorias de vergalhões de GFRP com fibras de vidro E, sendo a primeira constituída por resina poliéster isoftálica, a segunda constituída por resina éster vinílica e a terceira constituída por resina epóxi. Estes vergalhões foram expostos ao ambiente alcalino ( $\text{pH} = 13,6$ ) a  $60^\circ\text{C}$  por 30, 60 e 120 dias. Os resultados revelaram que a natureza da resina polimérica determina a magnitude e a taxa de degradação do vergalhão de GFRP, sendo a resistência à tração reduzida devido à exposição ao ambiente alcalino, conforme pode ser verificado na Tabela 6. Estes pesquisadores ainda relataram que este comportamento pode estar relacionado a alterações na transferência de tensão entre as fibras e a matriz do vergalhão de GFRP.

Chen *et al.* (2007) conduziram uma investigação da durabilidade de vergalhão de GFRP sob várias condições ambientais (água, solução alcalina com pH semelhante à solução dos poros do concreto, solução salina e solução alcalina combinada com cloretos) nas temperaturas de 40°C e 60°C, durante 70 dias. Após o período de exposição, os vergalhões de GFRP foram submetidos ao ensaio de tração. Os resultados do teste de tração mostraram um comportamento elástico até a falha, devido à ruptura das fibras. Os autores evidenciaram que o ambiente alcalino (com pH = 13,6) foi a condição mais agressiva para os vergalhões de GFRP e que a elevação da temperatura acelerou sua degradação, o que provocou a perda da resistência à tração.

Em outro trabalho, Al-Salloum *et al.* (2013) realizaram testes em vergalhões de GFRP em algumas condições ambientais (água, água do mar e solução alcalina) na temperatura de 50°C durante 6, 12 e 18 meses. Para verificar o efeito da exposição destes ambientes nos vergalhões de GFRP, estes pesquisadores realizaram ensaios de tração ao término de cada período de exposição. Os resultados mostraram que a 50°C a água e a solução alcalina provocaram um efeito prejudicial significativo na resistência à tração nos vergalhões de GFRP, comparativamente à exposição à água do mar. As reduções na resistência à tração foram iguais a 11%, 18% e 24% após a exposição alcalina em períodos de 180, 365 e 540 dias, respectivamente, em comparação à resistência à tração original.

Sawpan (2016) investigou o efeito provocado pelo condicionamento alcalino e a temperatura a longo prazo nas propriedades físicas e mecânicas de vergalhões de GFRP. Estes vergalhões foram imersos em solução alcalina ( $\text{pH} \cong 13$ ) durante 23 meses a 23°C e durante 24 meses a 60°C. Os resultados revelaram que após o condicionamento em solução alcalina, a resistência à tração dos vergalhões de GFRP foi reduzida em 6 e 26% quando expostas em temperaturas de 23°C e 60°C, respectivamente. A maior redução da resistência à tração a 60°C foi atribuída à grande quantidade de água absorvida, que provocou a degradação da interface fibras/matriz, reduzindo a eficiência de transferência de carga da matriz para as fibras.

Fergani *et al.* (2018) conduziram uma investigação para avaliar as propriedades físicas e mecânicas de vergalhões de GFRP expostos a ambientes severos (água, água do mar e solução alcalina) na temperatura de 50°C, durante 42, 83 e 270 dias. Os resultados obtidos por estes pesquisadores revelaram uma redução da resistência à tração dos vergalhões de GFRP ocorreu devido a dois motivos: (i) dissociação entre as fibras de vidro e a matriz polimérica, o que reduziu a capacidade de transferência

de tensão e; (ii) dissolução das fibras de vidro, resultando em uma redução local do número de fibras, interferindo negativamente na transferência de tensões.

Tu *et al.* (2020) estudaram a durabilidade de vergalhões de GFRP envelhecidas em solução salina e solução alcalina a temperaturas de 23°C, 40°C e 60°C por 30, 60 e 90 dias, sendo tais vergalhões submetidos ao ensaio de tração após cada ciclo de envelhecimento. Foi observado que o ambiente alcalino foi o mais agressivo para os vergalhões de GFRP, sendo que a elevação da temperatura intensificou a degradação, obtendo-se redução na resistência à tração da ordem de 32%.

Recentemente, Lu *et al.* (2021) conduziram um programa experimental de forma a avaliar a interferência da exposição dos vergalhões de GFRP (produzidas com fibra de vidro E e resina éster vinílica) a soluções alcalinas com pH 7,1 e 12,7 em temperatura de 20°C durante 45, 90, 135 e 180 dias. Segundo os autores, foram observadas reduções da resistência à tração devido a degradação da matriz polimérica e consequente perda da capacidade de transferência de esforços, além de degradação localizada na superfície das fibras de vidro, sendo observadas reduções na resistência à tração de até 23% após 180 dias de envelhecimento em solução alcalina.

A Tabela 6 engloba, em ordem cronológica, diversos trabalhos envolvendo vergalhões de GFRP, destacando os efeitos da exposição ao ambiente alcalino nas propriedades físicas, químicas e mecânicas destes vergalhões.

Tabela 6. Resistência à tração dos vergalhões de GFRP expostos ao ambiente alcalino.

Referência	Fibra / Matriz	$d_b$ (mm)	Condicionamento	Temp. (°C)	Período de exposição (dias)	Perda de resistência à tração (%)
Abbasi e Hogg (2005)	Vidro E/ poliéster isoftálica	12,7	Solução alcalina (pH=13)	60	30, 120, 240	5, 11, 22
	Vidro E/ Éster vinílica				30, 120	16, 20
Chen <i>et al.</i> (2007)	Vidro E/Éster vinílica	9,5	Água	20, 40, 60	120 para 20°C, 70 para 40°C e 60°C	5, 3, 29
			Solução alcalina (pH=13,6)			14, 11, 36
			Solução alcalina (pH=12,7)			8, 8, 27
			Água do mar			3, 2, 26

Fonte: O autor.

Tabela 6 (continuação). Resistência à tração dos vergalhões de GFRP expostos ao ambiente alcalino.

Referên- cia	Fibra / Matriz	d <sub>b</sub> (mm)	Condiciona- mento	Temp · (°C)	Período de exposição (dias)	Perda de re- sistência à tração (%)
Al- Salloum <i>et al.</i> (2013)	Vidro E/És- ter vinílica	12,0	Água	50	180, 360, 540	13, 22, 23
			Água do mar			4, 7, 9
			Solução al- calina			11, 18, 24
Sawpan (2016)	Vidro E- CR/Éster vi- nílica	14,0	Solução alcalina (pH ≅ 13,0)	23 e 60	690 para 23°C e 720 para 60°C	9, 26
Fergani <i>et al.</i> (2018)	Vidro E- CR/Éster vi- nílica	8,0	Solução alcalina (pH=12,7)	20, 40, 60	42, 83, 270	20°C (3, 5, 6) 40°C (9, 10, 16) 60°C (16,27, 36)
			Concreto			20°C (5, 8, 10) 40°C (5, 11, 26) 60°C (20,21, 31)
Tu <i>et al.</i> (2020)	Vidro E/Epóxi	9,2	Solução salina (pH=8,1)	23, 40, 60	30, 60 e 90	23°C (0, 1, 2) 40°C (3, 7, 10) 60°C (6, 9, 17)
			Solução alcalina (pH=13,4)			23°C (5, 7, 10) 40°C (10, 11, 15) 60°C (18,23, 32)
Lu <i>et al.</i> (2021)	Vidro E/És- ter vinílica	15,6	Solução alcalina (pH=7,1)	20	45, 90, 135, 180	5, 6, 9, 12
			Solução alcalina (pH=12,7)			16, 17, 19, 23

Fonte: O autor.

A partir da análise da Tabela 6 é possível verificar que o número de estudos existentes sobre a durabilidade dos vergalhões de GFRP envelhecidos no concreto, ainda é muito reduzido na comunidade científica. Este trabalho vem contribuir para a

comunidade científica inovando o estudo da durabilidade de vergalhões de GFRP envelhecidos em diferentes tipos de concreto.

### 2.3.4 Efeito de elevada temperatura

Semelhante aos materiais de construção tradicionais como: aço, cerâmica, concreto e madeira, as propriedades dos vergalhões de GFRP são reduzidas quando expostas a elevadas temperaturas. Nestas condições, os vergalhões de GFRP podem sofrer alterações nas suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, visto que a matriz polimérica pode sofrer degradação térmica reversível ou irreversível quando exposta a temperaturas elevadas, especialmente a partir da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) (KUTZ, 2013).

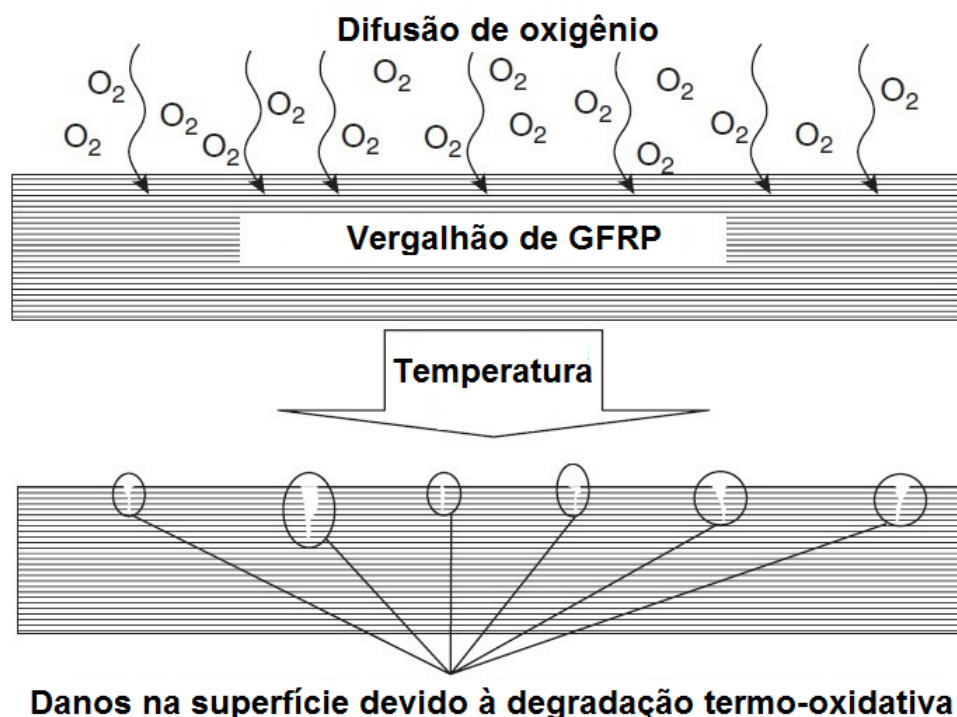
A estabilidade térmica provém do fato de as cadeias poliméricas serem formadas por átomos ligados covalentemente, com energia de dissociação na faixa entre 300 e 850  $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$  (DE PAOLI, 2008). Com a quebra das ligações químicas, haverá a produção de radicais livres que, na presença de oxigênio, poderão oxidar a matriz polimérica. Assim, a termoxidação da matriz polimérica é iniciada pela reação dos radicais livres ( $P^\bullet$ ) com o oxigênio, para formar radicais peróxidos ( $POO^\bullet$ ), conforme Equação 9 (MAXWEEL *et al.*, 2005).



Uma vez formados, os radicais peróxidos sofrem novas reações que quebram as cadeias poliméricas, resultando na degradação da matriz polimérica, com a formação de microtrincas na superfície, como apresentado na Figura 13. Essas microtrincas abrem caminhos para que o oxigênio continue penetrando no vergalhão de GFRP, resultando em oxidação nas camadas internas do vergalhão, que pode continuar até que o polímero seja completamente oxidado.

Com relação à temperatura, as fibras de vidro apresentam um comportamento relativamente estável, por apresentarem propriedades térmicas superiores à das matrizes poliméricas. Assim, continuam suportando carga na direção longitudinal até temperaturas próximas a 980°C (ROBERT e BENMOKRANE, 2010).

Figura 13. Representação esquemática da reação de termoxidação e consequentes danos à matriz polimérica, com a formação de microtrincas na superfície dos vergalhões de GFRP.



Fonte: Adaptado de MARTIN (2008).

Wang *et al.* (2007) realizaram um estudo sobre o efeito da exposição de vergalhões de GFRP a elevadas temperaturas sobre a resistência à tração. Os autores relataram uma redução na resistência à tração dos vergalhões de GFRP com diâmetro de 12,7 mm quando submetidos às temperaturas de 100°C, 300°C, 400°C e 500°C, iguais a cerca de 23%, 45%, 64% e 91%, respectivamente, em comparação aos vergalhões analisados em temperatura ambiente (23°C).

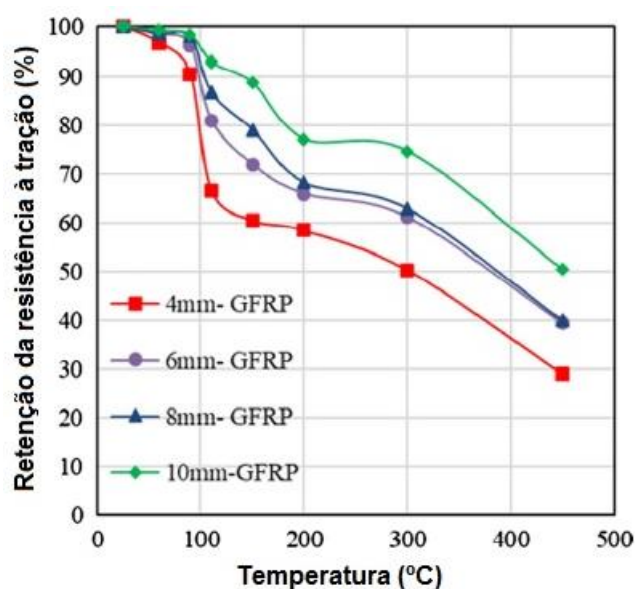
Robert e Benmokrane (2010) estudaram a variação das propriedades mecânicas dos vergalhões de GFRP submetidos a diferentes temperaturas (23°C a 315°C) e observaram uma redução significativa da resistência à tração a partir de temperaturas próximas às de transição vítrea ( $T_g$ ) e de decomposição ( $T_d$ ) da matriz polimérica. Os autores observaram uma perda de cerca de 47% na resistência à tração dos vergalhões submetidos à temperatura de 315°C.

Alsayed *et al.* (2012) investigaram o desempenho dos vergalhões de GFRP submetidos a 100°C, 200°C e 300°C, observando uma redução na resistência à tração de 9,4%, 19,8% e 21,8%, respectivamente. Ashrafi *et al.* (2017) realizaram uma pesquisa experimental na qual foi investigado o efeito da temperatura no desempenho de



vergalhões de GFRP revestidas com areia nos diâmetros de 4, 6, 8, 10 mm. As temperaturas escolhidas para simular as condições de incêndio foram 25°C, 60°C, 90°C, 110°C, 150°C, 200°C, 300°C e 450°C. A relação entre a retenção da resistência à tração pela elevação da temperatura pode ser verificada na Figura 14.

Figura 14. Retenção da resistência à tração em função da temperatura de exposição e do diâmetro do vergalhão de GFRP.



Fonte: Adaptado de ASHRAFI *et al.* (2017).

As curvas de retenção da resistência à tração apresentadas na Figura 14 podem ser separadas em quatro faixas de temperaturas. Na primeira, ocorreu a variação da temperatura ambiente até 90°C (temperaturas abaixo da  $T_g$ ) para os vergalhões de GFRP ( $T_g = 110^\circ\text{C}$ ). Nesta região, a mobilidade da cadeia molecular da matriz polimérica não foi alterada e, portanto, a resistência à tração final permaneceu quase estável. Isso demonstra que temperaturas abaixo da  $T_g$  não afetam significativamente a resistência à tração desses vergalhões.

A segunda região incluiu temperaturas entre 90°C e 150°C. Nesta região de temperatura, a resina polimérica diminui a sua rigidez ou amolece, com possibilidade de quebra das ligações moleculares e, conseqüentemente, redução da capacidade de transferência de tensões entre as fibras e a resina. Como resultado, houve uma redução considerável na resistência à tração. A terceira região inclui temperaturas entre 150°C e 300°C, abaixo da temperatura de decomposição da resina polimérica ( $T_d$ ).

Nesta região, houve moderada diminuição da resistência à tração final em comparação com a segunda região, uma vez que as fibras de vidro mantiveram o carregamento na direção longitudinal (o dano nas fibras não foi significativo), mas a interface fibra/matriz foi danificada significativamente. A última região compreende temperaturas superiores a 300°C, onde elas estavam próximas da temperatura de decomposição da resina polimérica. Nesta região, a capacidade de carga das fibras diminuiu severamente em comparação com a terceira região.

De acordo com Ashrafi *et al.* (2017), os vergalhões de GFRP com maior diâmetro apresentaram melhor desempenho à tração a elevadas temperaturas do que aquelas com menor diâmetro, devido ao menor descolamento na interface fibra/matriz do núcleo nos vergalhões de GFRP com maior diâmetro, como resultado de uma força de confinamento mais alta aplicada pela massa externa do vergalhão em seu núcleo.

Rosa *et al.* (2019) investigaram o comportamento mecânico de vergalhões de GFRP com diâmetro de 10 mm, submetidas a temperaturas entre 50°C a 300°C. Os vergalhões ensaiados a 150°C e 300°C apresentaram reduções dos valores de resistência à tração iguais a 40% e 43%, respectivamente, em relação àquelas ensaiadas à temperatura ambiente. Esta redução na resistência à tração dos vergalhões de GFRP quando submetidas a elevadas temperaturas está relacionada, principalmente, à degradação da matriz polimérica e na interface fibra-matriz, que com o aumento da temperatura, tem sua capacidade de transferência de tensões às fibras de vidro reduzida.

Najafabadi *et al.* (2019) relataram que os vergalhões de GFRP (10 mm de diâmetro) protegido por uma camada de revestimento de concreto de 20 mm experimentou uma redução na resistência à tração de cerca de 13,4%, 23,2% e 33,2%, após exposição a temperaturas de 150°C, 300°C e 400°C, respectivamente.

A Tabela 7 engloba, em ordem cronológica, diversos trabalhos envolvendo vergalhões de GFRP, destacando os efeitos da exposição à elevadas temperaturas nas propriedades físicas, químicas e mecânicas destes vergalhões.

Tabela 7. Resistência à tração dos vergalhões de GFRP expostos à elevadas temperaturas.

Referência	Fibra / Matriz	Diâmetro (mm)	Temp. (°C)	Perda de resistência à tração (%)
Wang <i>et al.</i> (2007)	Vidro E/Éster vinílica	9,5	20, 100, 200, 250, 350, 500	20°C: 0
				100°C: 5
				250°C: 29
				350°C: 58
				500°C: 84
Wang <i>et al.</i> (2007)	Vidro E/Éster vinílica	12,7	20, 100, 200, 250, 350, 500	20°C: 0
				100°C: 23
				200°C: 42
				300°C: 45
				400°C: 64
				500°C: 91
Robert e Benmokrane (2010)	Vidro E/Éster vinílica	12,7	25, 100, 150, 200, 250, 300, 325	25°C: 0
				100°C: 11
				150°C: 30
				200°C: 32
				250°C: 39
				325°C: 53
Alsayed <i>et al.</i> (2012)	Vidro E/Éster vinílica	12	23, 100, 200, 300	23°C: 0
				100°C: 9
				200°C: 20
				300°C: 22
Ashrafi <i>et al.</i> (2017)	Vidro / Epóxi	4, 6, 8, 10	25, 110, 150, 200, 300, 450	25°C: 0, 0, 0, 0
				110°C: 33, 19, 13, 7
				150°C: 39, 28, 21, 11
				200°C: 41, 34, 32, 23
				300°C: 50, 39, 37, 25
				450°C: 71, 61, 60, 50
Rosa <i>et al.</i> (2019)	Vidro ECR/Éster vinílica	10	50, 100, 150, 200, 250, 300	50°C: 11
				100°C: 35
				150°C: 40
				200°C: 42
				250°C: 41
				300°C: 43
Najafabadi <i>et al.</i> (2019)	Vidro E/Éster vinílica	10	150, 300, 450	150°C: 13
				300°C: 23
				450°C: 33

Fonte: O autor.

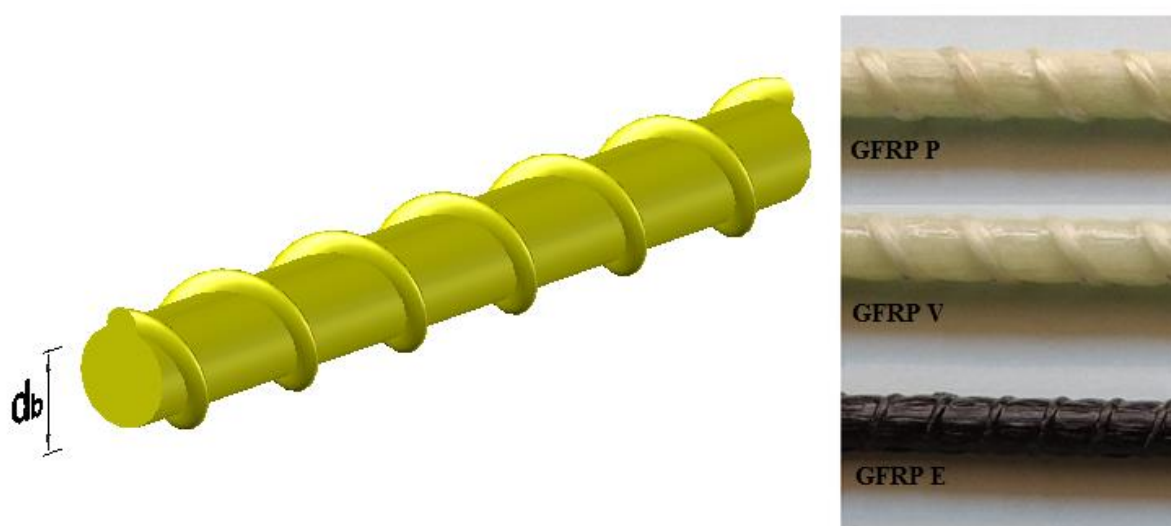
A Tabela 7 facilita uma análise comparativa entre os resultados das pesquisas, sendo possível observar que os vergalhões de GFRP são vulneráveis às temperaturas elevadas e perdem suas propriedades mecânicas nessas condições em um grau significativo. O número de estudos existentes sobre as propriedades mecânicas dos vergalhões de GFRP com cobrimento de concreto em elevadas temperaturas, ainda é muito reduzido na comunidade científica. Nesse sentido, este trabalho vem contribuir para a comunidade científica inovando o estudo da durabilidade de vergalhões de GFRP com cobrimento de concreto expostos a elevadas temperaturas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

No presente trabalho foram utilizados três tipos de vergalhões de GFRP, fabricados com as seguintes resinas poliméricas: poliéster isoftálica (GFRP-P), éster vinílica (GFRP-V) e epóxi (GFRP-E) (Figura 15). Os vergalhões foram produzidos por pultrusão com reforço constituído por filamentos contínuos unidirecionais (*rovings*) de fibra de vidro, e com nervuras helicoidais também de fibra de vidro, conforme especificação apresentada na Tabela 8.

Figura 15. Desenho esquemático e amostras de vergalhões de GFRP.



Fonte: O autor.

Tabela 8. Especificação dos vergalhões de GFRP analisados.

Nomenclatura	Tipo de resina	Tipo de fibra	Diâmetro nominal (mm)	País de fabricação
GFRP-P	Poliéster Isoftálica	Vidro E	6,3 (M6) e 13,0 (M13)	Brasil
GFRP-V	Éster vinílica			
GFRP-E	Epóxi	Vidro ECR	6,3 (M6) e 13,0 (M13)	Rússia

Fonte: O autor.

Foram utilizados vergalhões de GFRP com diâmetros nominais de 6,3 mm e 13,0 mm devido a sua utilização como armaduras transversais e longitudinais, respectivamente, em estruturas de concreto armado.

Para produção do concreto de referência (REF) foi utilizado o cimento Portland CP V ARI (alta resistência inicial), devido à ausência de adições pozolânicas, resultando em um concreto com solução de poro com elevada alcalinidade. Este concreto foi produzido com o intuito de ser utilizado como padrão de comparação de desempenho e análise da durabilidade dos vergalhões de GFRP.

Com o intuito de se modificar a alcalinidade do concreto de referência, foi utilizada a sílica ativa (SA), fornecida pela Companhia de Ferro-ligas da Bahia (Ferbasa), localizada no município de Pojuca (BA). Essa adição mineral foi utilizada com o intuito de reduzir o pH da solução dos poros do concreto, aumentando a durabilidade dos vergalhões de GFRP.

Para a produção dos concretos foi utilizada brita de origem basáltica e areia natural proveniente de jazida localizada no município de Camaçari, ambos comercialmente disponíveis na cidade de Salvador.

Para a elaboração de soluções alcalinas que simulassem a solução dos poros do concreto, foi utilizada água destilada e deionizada, hidróxido de cálcio, hidróxido de sódio e hidróxido de potássio P.A., fornecidos pela O<sub>2</sub> Científica.

## 3.2 MÉTODOS

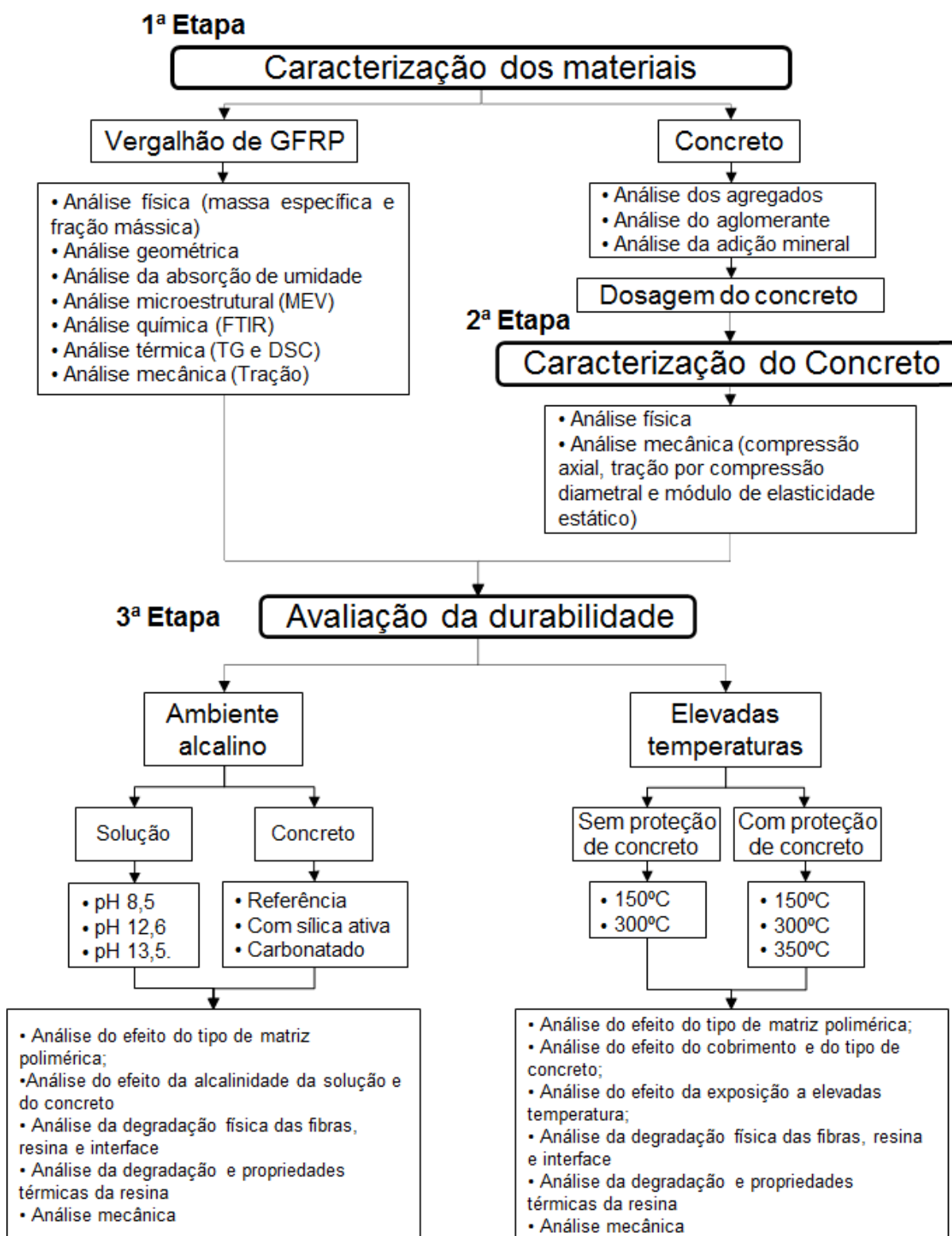
A metodologia empregada é resumida na Figura 16.

### 3.2.1 Caracterização dos materiais

A primeira etapa consistiu na caracterização dos materiais que foram utilizados durante a pesquisa, de acordo com as seguintes atividades:

- Caracterização física, química, geométrica, mecânica, microestrutural e térmica dos vergalhões de GFRP;
- Caracterização física e química dos materiais utilizados na fabricação do concreto de cimento *Portland*.

Figura 16. Fluxograma da metodologia utilizada na presente pesquisa.



Fonte: O autor.

### 3.2.1.1 Vergalhões de GFRP

#### a) Determinação da fração mássica dos constituintes

Para a determinação da fração mássica dos materiais constituintes dos vergalhões de GFRP, foi adotado o procedimento da Norma ASTM D3171 (ASTM, 2015). As amostras de vergalhões de GFRP, com aproximadamente 30 mm de comprimento, foram aquecidas em um forno tipo mufla, modelo Q318M24, marca Quimis a taxa de 10°C/min, até a temperatura de 650°C, permanecendo neste patamar por 6 horas. Após aquecimento a 650°C, foi possível determinar a fração mássica das fibras de vidro.

#### b) Massa específica

As medidas de massa específica dos vergalhões de GFRP foram determinadas de acordo com os procedimentos descritos na Norma ASTM D792 (ASTM, 2020). Neste experimento, três amostras de vergalhões de GFRP foram cortadas, com aproximadamente 200 mm de comprimento, perpendicularmente à direção das fibras de vidro, em seguida, estas amostras foram medidas com um paquímetro e pesadas em uma balança digital semianalítica, com precisão de 0,01 g, à temperatura ambiente. As amostras foram, então, imersas em água e a massa aparente de cada corpo de prova foi medida. A partir destes resultados, a massa específica média dos vergalhões de GFRP foi calculada.

#### c) Análise microestrutural

Com o intuito de avaliar a morfologia e a microestrutura dos vergalhões de GFRP antes e após a exposição ao ambiente alcalino e elevação da temperatura, foi utilizada a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

As micrografias foram utilizadas para identificar as alterações na matriz polimérica, fibras de vidro ou interface fibra-matriz, decorrentes do envelhecimento acelerado. Amostras de 10 mm de comprimento foram cortadas transversalmente ao seu eixo e, em seguida, foram polidas e metalizadas com fina camada de ouro pelo processo de deposição a vácuo.

As micrografias foram capturadas no microscópio eletrônico de varredura VEGA 3 LMU TESCAN, disponível no Laboratório de Caracterização de Materiais do Instituto



Federal da Bahia, contendo detectores de elétrons secundários (SE) e retroespalhados (BSE), tensão de 20 kV e filamento de tungstênio.

#### d) Composição química (FRX) da fibra de vidro

Para caracterizar quimicamente as fibras de vidro dos vergalhões de GFRP, foi necessário, inicialmente, calcinar as amostras em um forno tipo mufla a 650°C por 6 horas, de acordo com procedimento recomendado pela Norma ASTM D3171 (ASTM, 2015). Em seguida, as fibras foram moídas em almofariz de ágata e peneiradas em uma peneira com abertura de malha # 75  $\mu\text{m}$ .

Assim, a composição química das fibras de vidro foi determinada antes e após a exposição ao ambiente alcalino, por meio de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), utilizando o espectrômetro S2 Ranger Bruker, no Laboratório de Caracterização de Materiais do Instituto Federal da Bahia (LCM/IFBA). As dimensões das amostras foram aproximadamente 40 mm de diâmetro e 4 mm de altura.

#### e) Identificação dos grupos funcionais (Espectroscopia de Infravermelho)

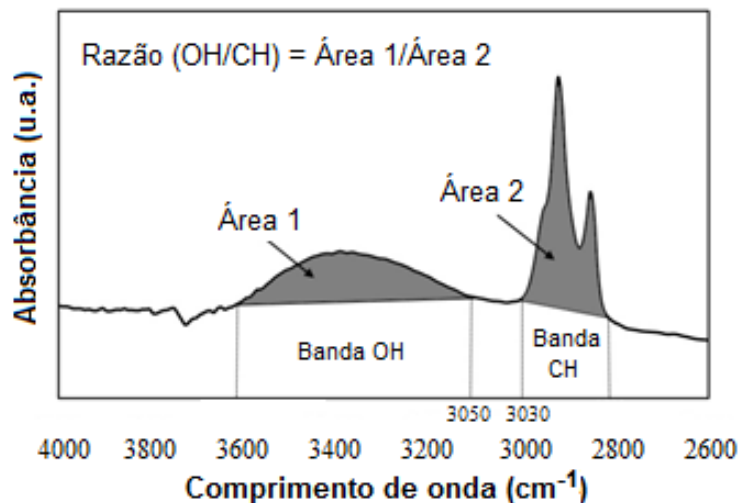
A espectroscopia de infravermelho (IV) é uma técnica analítica que utiliza a região do infravermelho do espectro eletromagnético, podendo ser utilizada para a identificação de compostos ou para a investigação da composição química das amostras, em fases amorfas ou cristalinas. A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) permitiu identificar a variação/degradação química nas matrizes poliméricas.

Desta forma, os espectros de FTIR foram registrados utilizando um espectrômetro modelo IR Prestige – 21 da marca Shimadzu® disponível no Laboratório de Caracterização Analítica da Universidade Federal da Bahia (UFBA/PPEQ). Para a análise nos vergalhões de GFRP, foi utilizado um dispositivo de reflectância total atenuada. Trinta e duas varreduras foram rotineiramente adquiridas com uma resolução de 16  $\text{cm}^{-1}$  na faixa de 4000 a 600  $\text{cm}^{-1}$ .

Os espectros de absorção foram obtidos antes e depois da exposição ao ambiente alcalino, com o objetivo de determinar a ocorrência da reação de hidrólise no polímero constituinte do vergalhão de GFRP. Duas regiões do espectro infravermelho foram estudadas: a banda *CH* (2800-3030  $\text{cm}^{-1}$ ), associada ao grupo

carbono-hidrogênio, e a banda *OH* (3050-3600  $\text{cm}^{-1}$ ), que corresponde ao modo de alongamento dos grupos hidroxila. Quatro espectros de cada vergalhão de GFRP foram obtidos para a superfície. A razão *OH/CH* foi calculada conforme proposto por Benmokrane *et al.* (2017), na Figura 17.

Figura 17. Determinação da razão (*OH/CH*).



Fonte: Adaptado de BENMOKRANE *et al.* (2017).

#### f) Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TG) permite a determinação analítica de variações de massa da amostra durante seu aquecimento no interior de um forno sob aquecimento contínuo e uniforme. Desta forma, foi seguido o procedimento da Norma ASTM E1868 (ASTM, 2015) para examinar a mudança de massa em função da temperatura e avaliar a estabilidade térmica das amostras de vergalhões de GFRP e pasta de cimento, utilizando um analisador termogravimétrico SDT Q600, da TA *Instruments*, disponível no Laboratório de Materiais de construção da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS).

As amostras de vergalhões de GFRP foram analisadas em um ciclo de aquecimento com temperatura variando entre 35°C e 700°C, enquanto, nas amostras de pasta de cimento o ciclo de aquecimento foi de 35°C a 1000°C, a taxa de aquecimento foi de 10°C/min em atmosfera de nitrogênio (taxa de purga: 10 ml/min).

#### g) Determinação da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ )

A análise por calorimetria diferencial de varredura (DSC) permite a determinação analítica da temperatura de transição vítrea das resinas poliméricas durante seu aquecimento contínuo e uniforme (BENMOKRANE *et al.*, 2017). Por meio desta técnica, é possível obter a diferença de energia fornecida à amostra em relação a um material de referência, em função da temperatura à qual estes são submetidos durante o ensaio.

A partir desta técnica, foram determinados termogramas dos vergalhões de GFRP, utilizando um calorímetro diferencial de varredura da marca Shimadzu®, Modelo DSC-60, do Laboratório de Caracterização de Materiais (LCM) do Instituto Federal da Bahia (IFBA). A temperatura variou entre de 25°C a 250°C com taxa de aquecimento de 5°C/min, em atmosfera controlada de nitrogênio com fluxo de 50 mL/min.

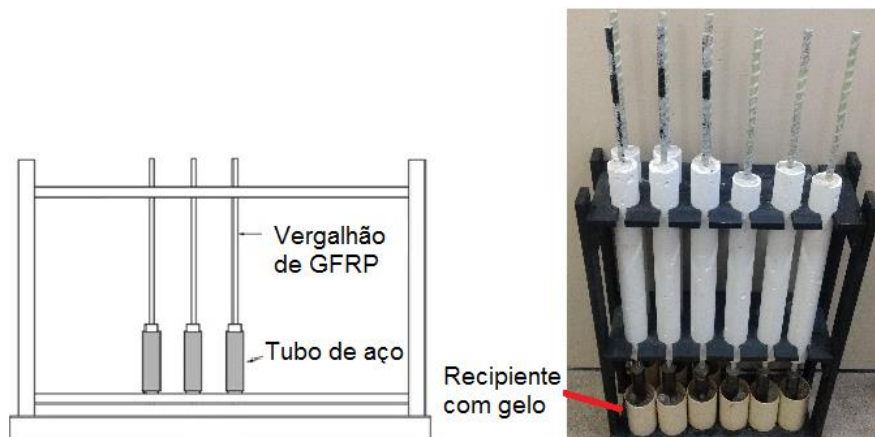
#### h) Área da seção transversal e Diâmetro

As medidas da área da seção transversal e do diâmetro dos vergalhões de GFRP foram determinadas de acordo com os procedimentos descritos na Norma ASTM D7205 (ASTM, 2016). Neste experimento, três amostras de vergalhões de GFRP foram cortadas, com aproximadamente 200 mm de comprimento, perpendicularmente à direção das fibras de vidro, em seguida, estas amostras foram medidas com um paquímetro. As amostras foram, então, imersas em água, em uma proveta graduada e a variação do volume de cada corpo de prova foi medida. A partir destes resultados, a área da seção transversal e o diâmetro médio dos vergalhões de GFRP foram calculados.

#### i) Resistência à tração

Três corpos de prova de cada tipo de vergalhão de GFRP com 1,0 m de comprimento foram preparados e submetidos ao ensaio de tração. Foi necessário utilizar um sistema de ancoragem nas extremidades dos vergalhões de GFRP, seguindo os procedimentos da Norma ASTM D7205 (ASTM, 2016), que recomenda que as extremidades dos vergalhões de GFRP sejam protegidas, evitando a concentração de tensões nesta região (Figura 18).

Figura 18. Gabarito para fixação do sistema de ancoragem nas extremidades do vergalhão de GFRP.



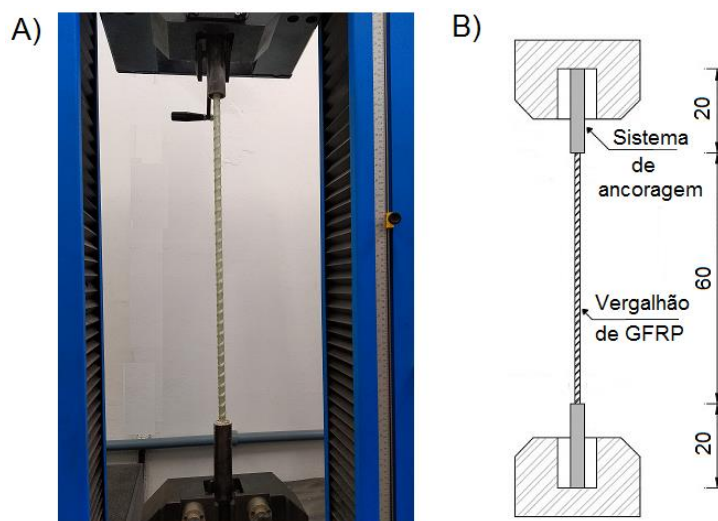
Fonte: ASTM D7205 (2016).

Este sistema de ancoragem foi formado por argamassa expansiva (*Split Star*) e tubo de aço circular com diâmetro de 33 mm e comprimento de 200 mm (espessura da parede do tubo igual a 2 mm). Para manter o alinhamento entre o vergalhão de GFRP e o tubo metálico, foi necessário o uso de buchas plásticas de PVC no interior do tubo e uma moldura de madeira. Além disso, foi utilizado gelo para controle da expansão da argamassa.

Inicialmente, o vergalhão de GFRP foi centralizado no interior do tubo metálico e, em seguida, o espaço entre o vergalhão e o tubo foi preenchido com argamassa expansiva. No processo de cura da argamassa, ocorreu uma expansão do seu volume, gerando tensões de confinamento entre o vergalhão e o tubo metálico. Estas tensões permitiram a existência de atrito nas interfaces do tubo metálico/argamassa e da argamassa/vergalhão de GFRP, garantindo a transferência dos esforços aplicados durante o ensaio de tração e evitar danos nesta região do vergalhão (WANG *et al.*, 2007).

Após a preparação dos corpos de prova, foi realizado o ensaio de tração na máquina universal de ensaios (INSTRON 23-200), com célula de carga de 200 kN, e taxa de deslocamento de 2,0 mm/min. A partir dos resultados, foi determinado o limite de resistência à tração (LRT). Na Figura 19 é apresentado um esquema do posicionamento do corpo de prova na máquina de ensaios universal.

Figura 19. (A) Máquina universal INSTRON 23 – 200; (B) Posicionamento do corpo de prova na máquina universal (medidas em centímetros).



Fonte: O autor.

Os dados de ensaio foram registrados pelo *software BlueHill Universal*, vinculado ao equipamento utilizado. Um extensômetro (*clip gage*), modelo GL 100 (abertura igual a 50 mm) foi instalado na região central do corpo de prova para monitorar a deformação dos corpos de prova até 0,6% durante a realização do ensaio de tração, e assim, determinar o seu módulo de elasticidade. A resistência à tração axial ( $\sigma_T$ ) é calculada pela Equação 10.

$$\sigma_T = \frac{4 P}{\pi d_b^2} \quad \text{Equação 10}$$

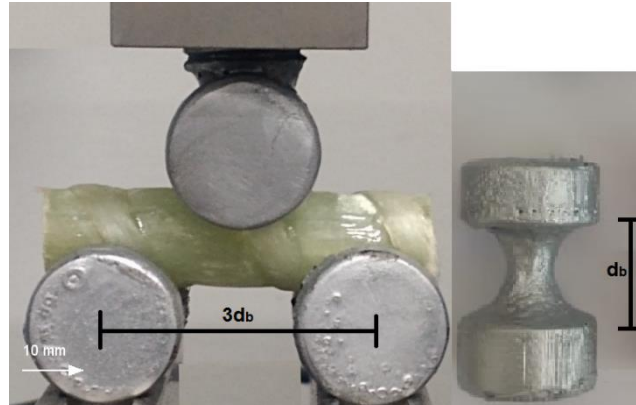
Em que ( $P$ ) é a carga máxima suportada pelo vergalhão de GFRP e ( $d_b$ ) é o seu diâmetro.

#### j) Resistência ao cisalhamento interlaminar (*Short Beam*)

Três corpos de prova de cada tipo de vergalhão de GFRP (P, V e E) com comprimento igual a quatro vezes o seu diâmetro foram preparados e submetidos ao ensaio de resistência ao cisalhamento interlaminar. Este ensaio foi realizado em uma máquina de ensaios universal INSTRON 2310, com célula de carga de 10 kN e taxa de deslocamento de 1,2 mm/min, na qual as amostras foram bi-apoiadas e submetidas a uma carga na região central, seguindo os procedimentos da Norma ASTM D4475

(ASTM, 2016), conforme mostrado na Figura 20. Os dados de ensaio foram registrados pelo software BlueHill versão 3, vinculado ao equipamento utilizado.

Figura 20. Posicionamento do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento interlaminar.



Fonte: O autor.

A distância entre os apoios foi de três vezes o diâmetro dos vergalhões de GFRP. A resistência ao cisalhamento interlaminar ( $S$ ) é calculada por meio da Equação 11, em que  $P$  é a carga máxima.

$$S = 0,849 \cdot \frac{P}{d_b^2} \quad \text{Equação 11}$$

### 3.2.1.2 Matérias-primas utilizadas na produção do concreto

#### a) Distribuição granulométrica

As distribuições granulométricas da areia e da brita foram avaliadas de acordo com as recomendações da NBR 7211 (ABNT, 2009), e seguindo os procedimentos prescritos pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). A partir da verificação da distribuição do tamanho de partículas, foram também determinados o módulo de finura e a dimensão máxima característica dos agregados.

Para o cimento CPV ARI e a sílica ativa, a classificação granulométrica foi determinada utilizando um granulômetro a laser, Cilas 1180, (foi utilizado água para dispersar as amostras), disponível no Laboratório de Durabilidade da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS).

#### b) Massa específica

A massa específica representa a relação entre a massa do material seco e seu volume, incluindo os poros impermeáveis, sendo fundamental no procedimento de dosagem do concreto, para cálculos de consumo de materiais. Para a caracterização do agregado miúdo foram utilizados os procedimentos da NBR NM 52 (ABNT, 2009) e, para o agregado graúdo, foram utilizados os procedimentos da NBR NM 53 (ABNT, 2009).

As massas específicas do cimento CP V ARI e da sílica ativa foram determinadas por picnometria a gás hélio, utilizando-se um picnômetro Micromeritics Accupyc II 1340.

#### c) Área superficial

As áreas superficiais específicas do cimento CP V ARI e da sílica ativa foram determinadas por meio do método BET (BRUNAUER; EMMETT; TELLER), utilizando um analisador superficial, modelo Gemini VII 2390, marca Micromeritics.

#### d) Massa unitária

O ensaio da massa unitária foi realizado com base na NBR NM 45:2006 (ABNT, 2006) e seu procedimento consiste em preencher um recipiente de volume predeterminado e mensurar a massa do material inserido.

Este procedimento tem por finalidade converter o traço do concreto em massa para volume, pois a massa unitária indica o volume que um determinado material ocupa quando inserido solto ou compactado. Deste modo, a massa unitária compactada é necessária no procedimento de dosagem do concreto.

#### e) Perda ao fogo

A determinação da perda ao fogo do cimento CP V ARI e da sílica ativa, foi realizada segundo a especificação da Norma NBR NM 18 (ABNT, 2012), submetendo 1 g de material à calcinação até 1000°C em forno mufla microprocessado, marca Quimis, modelo Q318M24, após secagem em estufa por 1 h. Posteriormente, o material foi pesado para determinação do material restante. O resultado obtido corresponde à

quantidade de materiais inorgânicos, visto que a massa perdida representa a quantidade de orgânicos, umidade e água combinada da amostra.

f) Composição química (FRX)

A composição química do cimento CP V ARI e da sílica ativa foi determinada por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX). O equipamento utilizado foi o FRX S2 Ranger da marca BRUKER, modelo S2 Ranger, no Laboratório de Caracterização de Materiais do Instituto Federal da Bahia (LCM/IFBA). As dimensões das amostras foram de aproximadamente 40 mm de diâmetro e 4 mm de altura.

g) Composição mineralógica (DRX)

Para a determinação da composição mineralógica do cimento CP V ARI, da sílica ativa e das pastas cimentícias, utilizou-se a técnica de difração de raios X (DRX), utilizando um difratômetro D2 *Phaser* Bruker, com tubo de alvo de cobre (radiação  $K\alpha$  com comprimento de onda de 1,5706 Å) de 30 mV e 10 mA, sem sistema de filtragem com monocromador secundário. Os espectros de difração foram obtidos na faixa de  $2\theta$  de 5° a 70°, varredura com incrementos de 0,1°/s. As fases cristalinas presentes nas amostras foram identificadas com o auxílio do *software DIFFRAC plus - EVA*, com base de dados centrada no sistema COD (*Crystallography Open Database*) e quantificadas com o *software TOPAS Acadêmico* versão 4.2, que se baseia no método de *Rietveld* e sistema CIF (*Crystallography Information File*).

### 3.2.1.3 Caracterização do concreto

Os concretos foram caracterizados aos 28 dias, quanto à resistência à compressão axial (NBR 5739:2018), módulo de elasticidade estático (NBR 8522:2008), tração por compressão diametral (NBR 7222:2011), densidade aparente (NBR 9779:2012), porosidade aparente (NBR 9778:2005) e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (NBR 8802:2019).

a) Dosagem do concreto e Moldagem dos corpos de prova

O traço de concreto de referência (REF) foi definido com base no método proposto pela *American Concrete Institute* (ACI). Foi definida proporção mássica de 1:



2,50: 2,4: 0,65 (cimento + sílica ativa: areia: brita: água), com teor de sílica ativa variando entre 0% (REF) e 10% (SA-10), em substituição à massa de cimento, buscando-se um concreto classe C30 de resistência e com abatimento de tronco de cone de  $170 \pm 20$  mm.

A consistência do concreto no estado fresco foi determinada a partir do ensaio de abatimento do tronco de cone, *slump-test*, conforme NBR 16889 (ABNT, 2020). Em seguida, os CP's cilíndricos, de dimensão (10 x 20) cm, foram moldados de acordo com procedimento recomendado pela Norma NBR 5738 (ABNT, 2015). Após 24 h, estes CP's foram imersos em tanque de cura úmida com solução de água saturada de hidróxido de cálcio.

#### b) Resistência à compressão axial

A determinação da resistência à compressão axial do concreto foi realizada em uma prensa servo-hidráulica Contenco, modelo HD – 120T, com capacidade de 120 tf (1200 kN), com incremento de 0,45 MPa/s, em três corpos de prova, de dimensão (10 x 20) cm, de cada traço para cada mistura, seguindo os procedimentos da NBR 5739 (ABNT, 2018).

Antes da execução do ensaio, foram realizados o corte e retificação dos corpos de prova, a fim de se garantir uma superfície plana, de modo a não comprometer os resultados do ensaio.

#### c) Módulo de elasticidade estático

A determinação do módulo de elasticidade estático do concreto foi realizada em uma prensa servo-hidráulica Contenco, modelo HD – 120T, com capacidade de 120 tf (1200 kN) com compressômetro de bases independentes e sistema de aquisição de dados por LVDT's.

Este ensaio preconizado pela NBR 8522 (ABNT, 2008), consistiu em submeter corpos de prova cilíndricos de concreto a ciclos de carregamento e descarregamento, iniciando em 0,5 MPa e até 30% de sua resistência à ruptura na compressão ( $f_c$ ), de modo que, ao atingir estas tensões, o carregamento é mantido constante por cerca de 1 minuto. Ao terminar o terceiro ciclo, o corpo de prova é solicitado até a sua ruptura, determinando, assim, sua resistência à compressão, que não deve diferir em 20%

para mais ou para menos da resistência à compressão  $f_c$ . O módulo de elasticidade foi calculado pela Equação 12.

$$E_{cs} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \cdot 10^{-3} \quad \text{Equação 12}$$

Em que  $\sigma_b$  é a tensão considerada como 30% da resistência à compressão, em MPa;  $\sigma_a$  é a tensão básica (0,5 MPa);  $\varepsilon_b$  é a deformação específica média, ( $\varepsilon = \Delta L/L$ ), dos corpos de prova sob a tensão ensaiada;  $\varepsilon_a$  é a deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão básica (0,5 MPa).

#### d) Resistência à tração por compressão diametral

Para determinação da resistência à tração por compressão diametral foi utilizada uma prensa servo-hidráulica Contenco, modelo HD – 120T, com capacidade de 120 tf, com incremento de 0,45 MPa/s, seguindo os procedimentos da NBR 7222 (ABNT, 2011). A partir do valor da carga máxima ( $P$ ), a resistência à tração por compressão diametral ( $R_T$ ) foi calculada por meio da Equação 13.

$$R_T = \frac{2P}{\pi ld} \quad \text{Equação 13}$$

Em que  $l$  é o comprimento do corpo de prova e  $d$  é o diâmetro do corpo de prova de concreto.

#### e) Absorção de Água por Capilaridade

A absorção de água por ascensão capilar do concreto foi determinada seguindo os procedimentos recomendados pelas Normas NBR 9779 (ABNT, 2012). Este parâmetro é um importante indicador do grau de dificuldade de penetração de fluidos no interior do concreto.

Inicialmente, foram utilizados três corpos de prova de concreto após 28 dias de idade. Estes corpos de prova foram secos em estufa por um período de 24 h e, em seguida, resfriados à temperatura ambiente. Determinou-se a massa dos corpos de prova secos e, então, estes foram posicionados sobre suportes, com lâmina d'água constante e igual a  $5 \pm 1$  mm acima de sua face inferior, evitando a molhagem de outras superfícies. Durante o ensaio, a massa dos corpos de prova foi monitorada ao longo do tempo.

O coeficiente de absorção ou sorptividade ( $S$ ) é obtido pelo coeficiente angular da reta do gráfico que relaciona o teor de água absorvida ( $A$ ) em função da raiz quadrada do tempo e representa a massa de água absorvida por metro quadrado, em um determinado tempo decorrido ( $t$ ), conforme Equação 14.

$$A = St^{0,5} \quad \text{Equação 14}$$

#### f) Densidade e Porosidade Aparentes

O ensaio de densidade e porosidade aparentes se baseiam no princípio de Arquimedes. A técnica consiste em comparar as massas dos corpos de prova antes e depois da imersão em água. As amostras foram pesadas ainda secas ( $M_s$ ) e, então, foram imersas em água por 72 horas.

Após este período, os corpos de prova foram retirados da imersão para determinação da massa imersa ( $M_i$ ) e da massa úmida ( $M_u$ ). Com estes valores, foram calculadas a porosidade aparente ( $P_a$ ) e a densidade aparente ( $D_a$ ), por meio das Equações 15 e 16, respectivamente, em que  $\rho$  é a densidade do líquido utilizado (no caso, a água,  $\rho$  é igual a 1,0 g/cm<sup>3</sup>).

$$\%P_a = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \times 100 \quad \text{Equação 15}$$

$$D_a = \frac{M_s}{M_u - M_i} \quad \text{Equação 16}$$

#### g) Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

A avaliação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foi realizada a fim de verificar a homogeneidade da matriz cimentícia, possibilitando a detecção de fissuras e prováveis falhas de concretagem. Este ensaio torna-se um parâmetro importante para indicar a qualidade e avaliar a microestrutura dos concretos produzidos, como diferenças de compacidade e grau de porosidade, baseado na facilidade com que as ondas se propagam por seu interior. A velocidade de propagação do pulso de onda ultrassônica ( $V$ ) pode ser calculada por meio da Equação 17.

$$V = \frac{L}{t} \quad \text{Equação 17}$$

Em que ( $L$ ) é o comprimento do corpo de prova e ( $t$ ) é o tempo transcorrido entre a emissão e a recepção do pulso ultrassônico.

A Tabela 9 apresenta os critérios de avaliação do concreto, a partir dos valores de velocidade longitudinal de onda ultrassônica estabelecidos pela Norma inglesa BS EN 12.504-4 (BS, 2004).

Tabela 9. Critérios de avaliação do concreto com base na velocidade de propagação de onda ultrassônica.

<b>Velocidade longitudinal da onda (km/s)</b>	<b>Qualidade do concreto</b>
$V < 2,0$	Muito ruim
$2,0 \leq V < 3,0$	Ruim
$3,0 \leq V < 3,5$	Média
$3,5 \leq V < 4,0$	Boa
$4,0 \leq V < 4,5$	Muito boa
$V \geq 4,5$	Excelente

Fonte: Adaptado da BS EN 12504-4 (2004).

O ensaio de ultrassom foi realizado de acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2019). Os corpos de prova cilíndricos (10 cm x 20 cm) foram submetidos à cura submersa durante 28 dias, até o momento do ensaio.

Foi utilizado o equipamento Pundit Lab, da marca Proceq, que possui frequência de largura de banda entre 20 e 500 kHz, tendo sido o ensaio realizado com transdutores de 54 kHz, cuja emissão e recepção das ondas ultrassônicas foram realizadas, respectivamente, pelo transdutor emissor e o receptor, os quais foram posicionados nas superfícies opostas dos corpos de prova.

### **3.2.2 Avaliação da durabilidade dos vergalhões de GFRP**

#### **3.2.2.1 Exposição ao ambiente alcalino**

##### **a) Solução alcalina**

Um total de 324 corpos de prova de vergalhões de GFRP foram preparados e testados, sendo cortados com 25,4 mm de comprimento (aproximadamente quatro vezes o diâmetro do vergalhão de GFRP) a partir do mesmo lote de produção. Em

seguida suas extremidades foram seladas por adesivo epóxi para evitar a difusão da água ao longo da direção da fibra.

Para avaliar a durabilidade dos vergalhões de GFRP em ambiente alcalino, as amostras de vergalhão GFRP foram submetidas ao envelhecimento acelerado com imersão em soluções alcalinas nas temperaturas de 23°C, 40°C e 60°C nos períodos de 500 h, 1000 h e 3000 h.

Foram utilizados três tipos de solução alcalina: solução com pH = 8,5 (S85), solução com pH = 12,6 (S126) e solução com pH = 13,5 (S135), com o objetivo de verificar a influência dos diferentes tipos de solução na durabilidade dos vergalhões de GFRP. Essas soluções foram preparadas de acordo com procedimento da ASTM D7705 (ASTM, 2019), também empregado por Chen *et al.* (2007) e Pan e Yan (2021), conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10. Composição e pH das soluções.

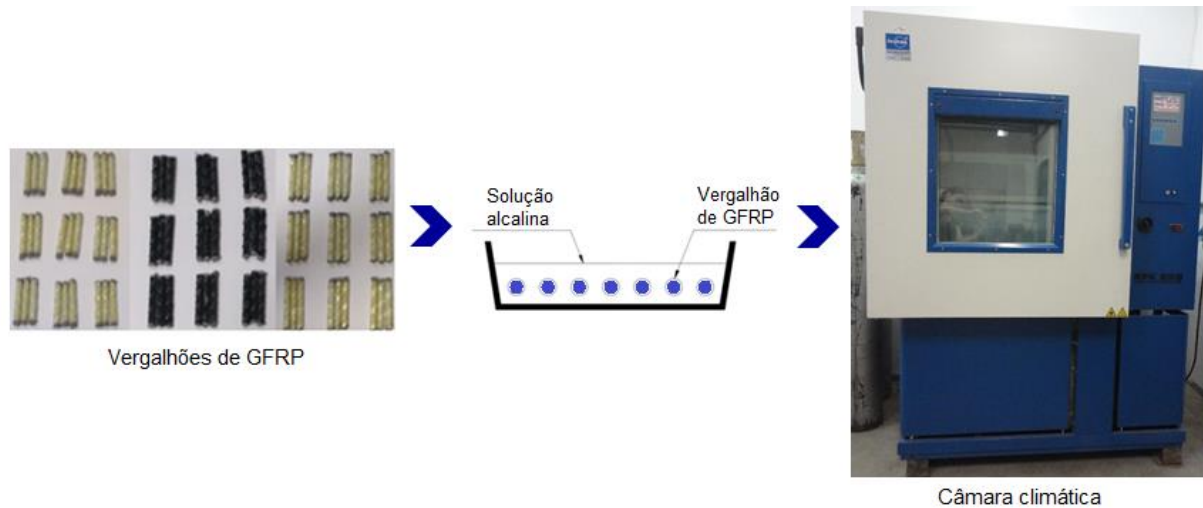
Quantidades (g/l)				pH
Ca(OH) <sub>2</sub>	NaOH	KOH	CaCO <sub>3</sub>	
---	---	---	1,4	8,5
118,5	0,9	4,2	---	12,6
2,0	19,6	2,4	---	13,5

Fonte: O autor.

As amostras foram mantidas em um recipiente fechado para minimizar a evaporação da solução ou a carbonatação do hidróxido de cálcio. Um dos recipientes foi mantido em uma sala climatizada a 23°C, enquanto os outros recipientes foram mantidos em uma câmara climática (FEUTRON 200) previamente aquecida nas temperaturas de 40°C e 60°C, conforme Figura 21.

A absorção de água das amostras de vergalhões de GFRP foi verificada periodicamente, ao longo do ensaio. As amostras foram removidas da solução para verificação de suas massas, conforme procedimento recomendado pela ASTM D7705 (ASTM, 2019).

Figura 21. Preparação dos vergalhões de GFRP para o envelhecimento acelerado.



Fonte: O autor.

Foram utilizadas três amostras de cada vergalhão de GFRP, que tiveram suas massas iniciais (secas,  $w_0$ ) e parciais (imersas,  $w_i$ ) determinadas por meio de uma balança digital com precisão de 0,01 g. A absorção de água  $M(\%)$  foi calculada usando a Equação 18.

$$M(\%) = \frac{w_i - w_0}{w_0} \times 100 \quad \text{Equação 18}$$

Foi também possível determinar o coeficiente de difusão de solução ( $D$ ) das amostras de vergalhões de GFRP usando a Equação 6 (MANALO *et al.*, 2020).

#### b) Concreto

Um total de 324 corpos de prova de vergalhões de GFRP foram preparados e testados, sendo cortados com 25,4 mm de comprimento (aproximadamente quatro vezes o diâmetro do vergalhão de GFRP) a partir do mesmo lote de produção. Em seguida suas extremidades foram seladas por adesivo epóxi para evitar a difusão da água ao longo da direção da fibra.

Os vergalhões de GFRP foram embutidos ao concreto, a fim de realizar o seu envelhecimento. Foram utilizados três tipos de concreto: sem adição mineral (REF), com adição mineral (SA-10) e o concreto sem adição mineral com exposição a carbonatação (CAR), com o objetivo de verificar a influência de cada uma destas condições.

Inicialmente, os vergalhões de GFRP foram centralizados em um molde de PVC com 100 mm de comprimento e 56,3 mm de diâmetro (Figura 23), o qual foi preenchido com concreto para fornecer um cobrimento de 25 mm ao vergalhão. Após 24 h, os corpos de prova de concreto armado (vergalhão + concreto) foram imersos em água e mantidos nas temperaturas de 23°C, 40°C e 60°C pelos períodos de exposição adotados (500 h, 1000 h, 3000 h).

Figura 22. Formas cilíndricas (tubo PVC) utilizados para moldagem do concreto.



Fonte: O autor.

Para manter a temperatura do ambiente de exposição uniforme, as amostras foram mantidas em uma sala com temperatura controlada em 23°C, enquanto as outras amostras foram mantidas em uma câmara climática (FEUTRON, 200) previamente aquecida nas temperaturas de teste, sendo utilizadas três amostras de vergalhões de GFRP para cada temperatura, conforme Figura 23.

Após o término de cada exposição os corpos de prova de concreto armado foram removidos da imersão em água. Finalmente, o concreto foi rompido com um martelo, para a retirada dos vergalhões de GFRP.

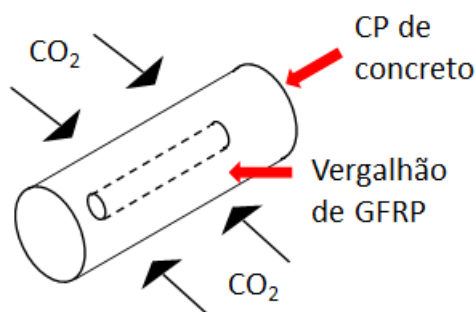
Figura 23. Preparação dos corpos de prova para o envelhecimento acelerado.



Fonte: O autor.

No caso específico do concreto submetido a carbonatação (CAR), após o período da cura úmida do concreto, parte dos corpos de prova confeccionados com concreto de referência (REF) foram submetidos à carbonatação, de acordo com procedimentos recomendados pela Norma ISO 1920 (ISO, 2015). Após o término da cura úmida estes corpos de prova foram mantidos durante 14 dias em uma sala climatizada com umidade relativa do ar e temperatura ambiente controlada ( $75,0\% \pm 5,0\%$  e  $23,0^{\circ}\text{C} \pm 2,0^{\circ}\text{C}$ , respectivamente). Em seguida, os corpos de prova tiveram suas faces planas seladas com parafina para restringir a região a ser carbonatada (região lateral), conforme Figura 24. Após preparação, os corpos de prova foram colocados na câmara de carbonatação Quimis Q316C1, com concentração de  $\text{CO}_2$  igual a  $3,0\% \pm 0,5\%$ , temperatura de  $27,0^{\circ}\text{C} \pm 2,0^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $65,0\% \pm 5,0\%$ .

Figura 24. Sentido e direção do fluxo de  $\text{CO}_2$ .



Fonte: O autor.

Paralelamente, corpos de prova de concreto sem vergalhão de GFRP foram utilizados para monitorar a carbonatação. Nas idades de 56, 63 e 70 dias foi medida a evolução da frente de carbonatação, com aspersão de solução aquoalcóolica contendo 1% de indicador de pH fenolftaleína. Os corpos de prova foram fraturados por compressão diametral e a solução foi aspergida na superfície de fratura das amostras, fotografada para posterior comparação da área carbonatada, com auxílio de softwares de imagem. Após a exposição por 70 dias, os corpos de prova (concreto + vergalhão) foram retirados da câmara para iniciar o ciclo de envelhecimento, imersos em água nas temperaturas de  $23^{\circ}\text{C}$ ,  $40^{\circ}\text{C}$  e  $60^{\circ}\text{C}$ .



### 3.2.2.2 Exposição a elevadas temperaturas

#### a) Condicionamento dos corpos de prova

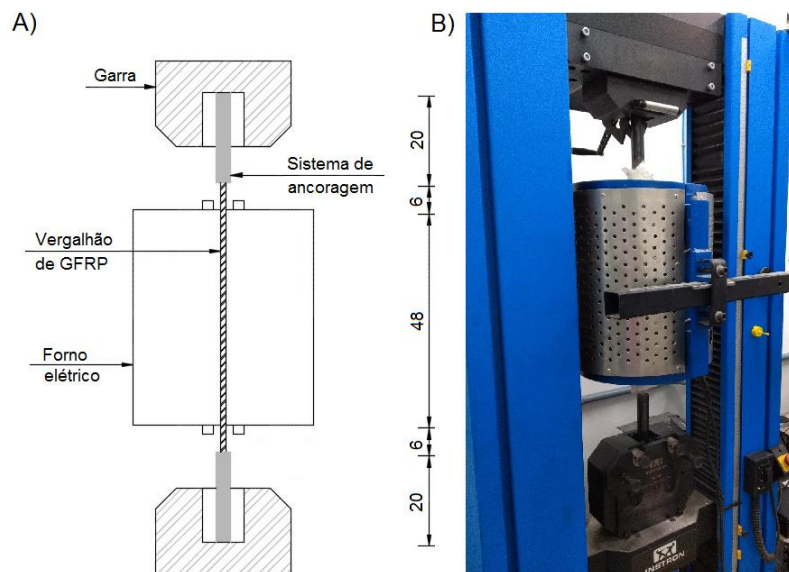
Para avaliar a durabilidade dos vergalhões de GFRP em elevadas temperaturas, os corpos de prova foram divididos em dois grupos: A) sem revestimento de concreto (GFRP-N) e B) com revestimento de concreto (GFRP-C). Os corpos de prova foram ensaiados em uma sala com temperatura de 23°C e em diferentes temperaturas (150°C, 300°C e 350°C), superiores às temperaturas de transição vítrea ( $T_g$ ) e próximas à temperatura de decomposição da matriz polimérica ( $T_d$ ). Os corpos de prova foram aquecidos a uma taxa de 10°C/min, até a temperatura desejada, permanecendo neste patamar por 30 min.

#### b) Vergalhões de GFRP sem revestimento de concreto

Os corpos de prova (GFRP-N) foram preparados para a realização do ensaio de tração conforme procedimento da Norma ASTM D7205 (ASTM, 2016). Foram utilizados três corpos de prova de cada tipo de vergalhão de GFRP, totalizando 27 amostras. Após a preparação dos corpos de prova, foi realizado o ensaio de tração em uma máquina universal em ensaios INSTRON 23-200, com célula de carga de 200 kN, equipada com um forno elétrico vertical. Após posicionamento na máquina de ensaio (Figura 25A) as extremidades dos corpos de prova foram envoltas em lã cerâmica refratária, para evitar perda de calor e, o forno vertical foi posicionado na região central do corpo de prova (Figura 25B).

O forno foi aquecido até a temperatura desejada, permanecendo neste patamar durante 30 min (CORREIA *et al.*, 2013). Em seguida, o forno foi retirado para iniciar o carregamento do corpo de prova até a sua ruptura, com uma taxa de deslocamento de 2,0 mm/min. As garras da máquina universal de ensaios, às quais o vergalhão de GFRP foi fixado, foram mantidas à temperatura ambiente com o intuito de evitar mecanismos de ruptura prematura. Os dados de ensaio foram registrados pelo software BlueHill Universal, vinculado ao equipamento utilizado. A carga aplicada foi registrada durante o ensaio, o alongamento e o módulo de elasticidade do vergalhão não foram medidos porque a elevação da temperatura poderia danificar o extensômetro.

Figura 25. Corpo de prova vergalhão de GFRP-N submetidos a elevadas temperaturas (dimensões em centímetros).



Fonte: O autor.

### c) Vergalhões de GFRP com cobrimento de concreto

Os corpos de prova GFRP-C foram preparados e submetidos ao ensaio de tração, conforme procedimento da Norma ASTM D7205 (ASTM, 2016), sendo três corpos de prova para cada tipo de vergalhão de GFRP, totalizando 72 corpos de prova. Inicialmente, os vergalhões de GFRP foram centralizados em um tubo de PVC com 48 cm de comprimento e diâmetro de 53 mm, com preenchimento do tubo com concreto (Figura 26).

Figura 26. Corpos de prova GFRP-C: (A) Dimensões (comprimento em centímetros), (B) Formas cilíndricas (tubo PVC) para moldagem do concreto e (C) Corpos de prova após a moldagem.

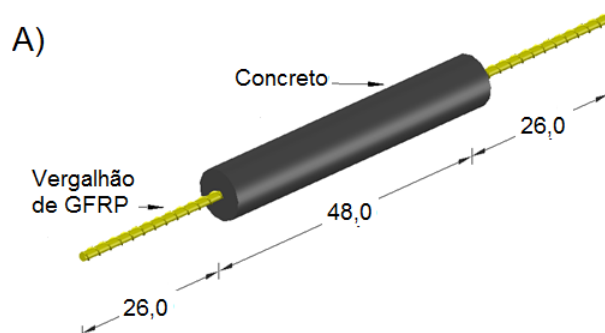
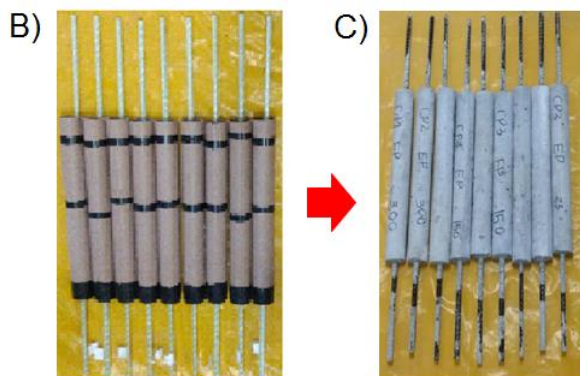


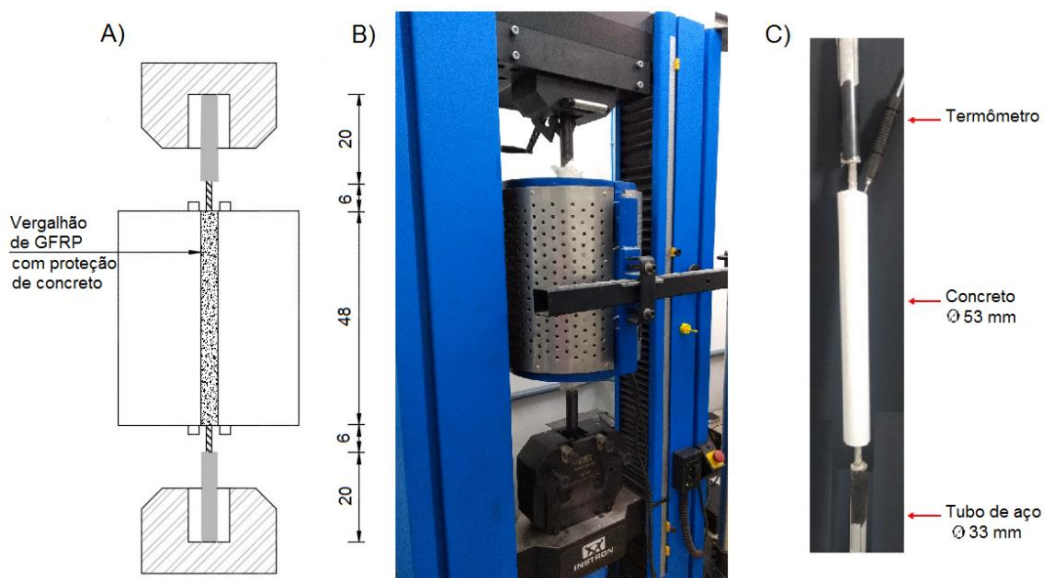
Figura 26 (continuação). Corpos de prova GFRP-C: (A) Dimensões (comprimento em centímetros), (B) Formas cilíndricas (tubo PVC) para moldagem do concreto e (C) Corpos de prova após a moldagem.



Fonte: O autor.

Após 28 dias de cura do concreto, o ensaio de tração foi realizado de forma similar aos vergalhões sem cobertura de concreto (Figura 27). Antes do ensaio, o forno foi aquecido até a temperatura desejada, permanecendo deste patamar durante 30 min (CORREIA *et al.*, 2013). Para monitorar a temperatura no corpo de prova, foi utilizado um termopar tipo K.

Figura 27. Montagem do ensaio de tração: (A) Corpo de prova GFRP-C (Medidas em centímetros), (B) Forno elétrico instalado com lã mineral nas extremidades dos corpos de prova, (C) Corpo de prova com termopar.



Fonte: O autor.

Após o aquecimento dos corpos de prova GFRP-C nas temperaturas de 150°C, 300°C e 350°C, conforme descrito na seção anterior, estes foram submetidos a um carregamento de tração até 50% da carga de ruptura verificada à temperatura ambiente. Em seguida, foi feito o registro fotográfico, para avaliação da distância entre fissuras, com o auxílio do software Image J. Após o descarregamento, os tirantes foram então carregados até a ruptura.

#### d) Avaliação da aderência do vergalhão de GFRP ao concreto

O vergalhão com cobertura de concreto de referência foi ensaiado em temperatura ambiente para determinação da carga de ruptura (NBR 7477:1982). Após o aquecimento dos corpos de prova GFRP-C nas temperaturas de 150°C, 300°C e 350°C, conforme descrito no item anterior.

A tensão de aderência ( $\tau_m$ ) entre os vergalhões de GFRP e o concreto foi calculada usando o valor do espaçamento médio entre fissuras e a resistência à compressão diametral do concreto nas temperaturas de 150°C, 300°C e 350°C. Para determinar a resistência à compressão diametral do concreto, os corpos de prova cilíndricos de concreto (10 x 20 cm) foram aquecidos a uma taxa de 10°C/min e mantidos 30 minutos na temperatura de estudo em um forno (Electro Therm Linn, KK-260). Em seguida, os corpos de prova foram testados conforme Norma NBR 7222 (ABNT, 2011). Assim, foi possível calcular a tensão de aderência ( $\tau_m$ ), utilizando a Equação 19.

$$\tau_m = \frac{0,375 f_{ct} d_b}{\Delta l \rho} \quad \text{Equação 19}$$

Em que  $f_{ct}$  é a resistência à tração por compressão diametral do concreto (aquecido nas temperaturas 150°C, 300°C e 350°C),  $d_b$  é o diâmetro do vergalhão de GFRP,  $\Delta l$  é a distância média entre fissuras e  $\rho$  é a razão da área da seção transversal do vergalhão de GFRP e do cilindro de concreto.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 4.1.1 Vergalhões de GFRP

As propriedades físicas e mecânicas médias dos vergalhões de GFRP com diâmetro 6,3 mm (M6) e 12,7 mm (M13) são apresentadas na Tabela 11. As médias das frações mássicas de fibra de vidro e área da seção transversal foram 81,4 % e 31,3 mm<sup>2</sup>; 80,7% e 129,1 mm<sup>2</sup>, para os vergalhões M6 e M13, respectivamente, superiores aos valores mínimos estabelecidos pela Norma ASTM 7957 (ASTM, 2017).

Conforme esperado, houve uma redução na resistência à tração de 4,4% e na resistência ao cisalhamento interlaminar de 4,6% dos vergalhões de GFRP com o aumento do diâmetro de 6,0 mm para 13,0 mm. Isto pode ser explicado devido ao movimento diferencial das fibras da superfície e as fibras do núcleo do vergalhão de GFRP, o que resulta em uma distribuição não uniforme de tensões normais através da sua seção transversal. A diferença entre essas tensões é maior em vergalhões de grande diâmetro, podendo causar redução resistência à tração e ao cisalhamento interlaminar em comparação com os vergalhões de menor diâmetro, sendo este efeito denominado “*Shear leg*” (ACHILLIDES e PILAKOUTAS, 2004). A tendência de diminuição nas propriedades mecânicas dos vergalhões de GFRP com o aumento do diâmetro corrobora os resultados obtidos por vários autores (WISNOM e JONES, 1996; KOLLER *et al.*, 2007; BENMOKRANE *et al.*, 2017).

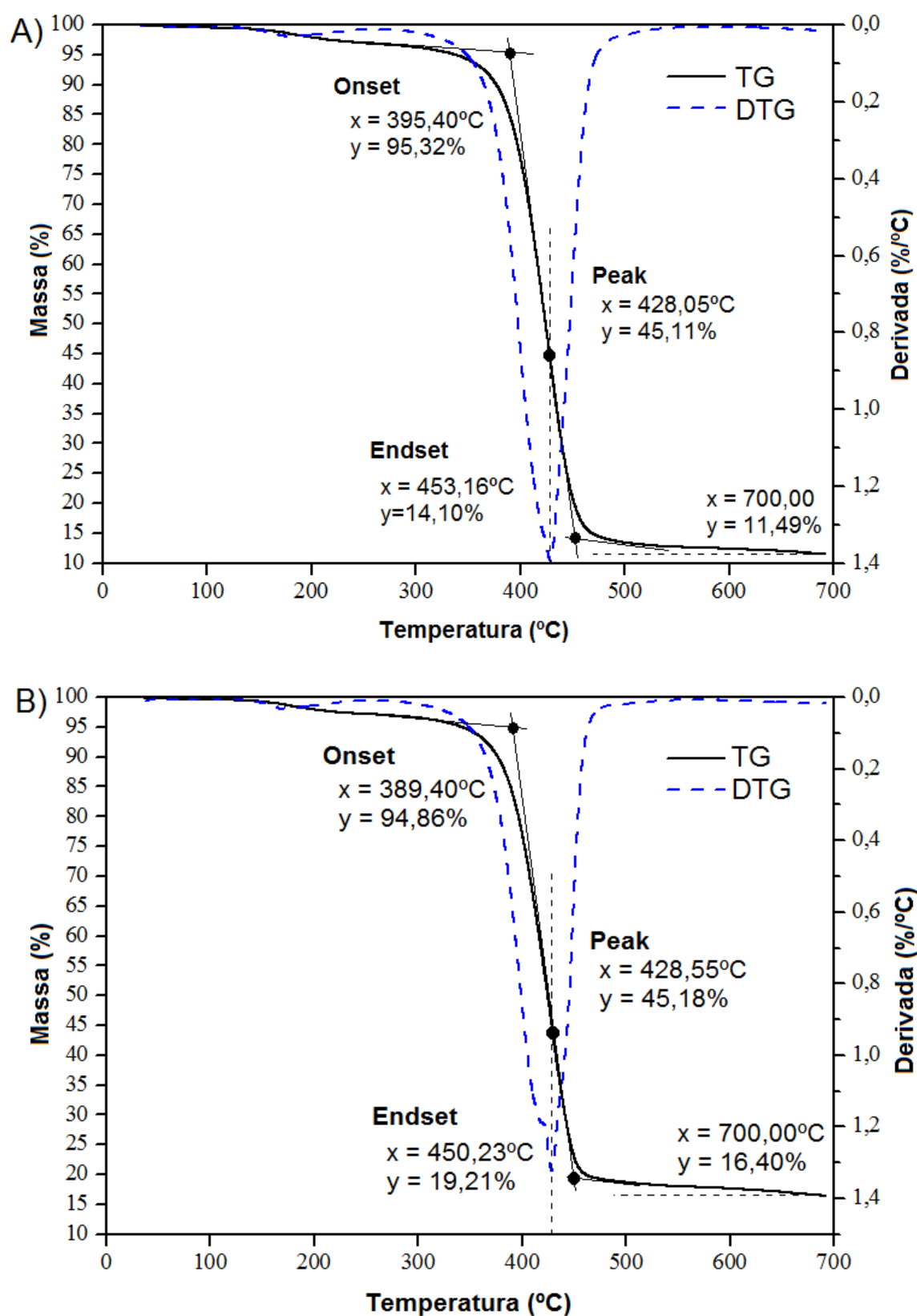
No que diz respeito a análise térmica de amostras dos vergalhões de GFRP, na Figura 28 são mostradas as curvas termogravimétricas (TG/DTG) dos vergalhões de GFRP com matriz poliéster (P), éster vinílica (V) e epóxi (E).

Tabela 11. Caracterização geométrica, física e mecânica média dos vergalhões de GFRP M6 e M13.

Propriedade	Tipos de vergalhões					
	M6			M13		
	GFRP-P	GFRP-V	GFRP-E	GFRP-P	GFRP-V	GFRP-E
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,1 ± 0,1	2,0 ± 0,1	1,9 ± 0,1	2,1 ± 0,1	2,0 ± 0,1	1,9 ± 0,1
Fração mássica de fibra (%)	79,4 ± 0,6	82,2 ± 1,0	80,6 ± 1,2	82,2 ± 0,1	80,8 ± 0,1	81,2 ± 0,1
Área da seção transversal (mm <sup>2</sup> )	31,3 ± 0,2	31,0 ± 0,1	31,6 ± 0,4	134,2 ± 0,2	128,2 ± 0,3	125,0 ± 0,1
Diâmetro efetivo (mm)	6,3 ± 0,2	6,3 ± 0,3	6,3 ± 0,1	13,1 ± 0,2	12,8 ± 0,3	12,0 ± 0,1
Altura da nervura – r <sub>b</sub> (mm)	0,3 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,6 ± 0,1	1,0 ± 0,1	1,2 ± 0,2	0,8 ± 0,1
Espaçamento da nervura – r <sub>s</sub> (mm)	16,0 ± 0,8	14,8 ± 0,7	12,4 ± 0,3	18,6 ± 0,7	18,8 ± 0,7	11,7 ± 0,4
Resistência ao cisalhamento interlaminar (MPa)	48,2 ± 1,0	48,2 ± 2,5	50,6 ± 2,2	47,1 ± 0,9	47,5 ± 2,8	45,5 ± 0,7
Resistência à tração (MPa)	868,7 ± 5,2	907,4 ± 7,4	981,7 ± 8,6	821,8 ± 7,2	844,8 ± 1,2	971,3 ± 6,1
Módulo de elasticidade (GPa)	51,9 ± 0,4	51,7 ± 0,7	51,8 ± 0,6	51,3 ± 0,5	51,8 ± 0,5	51,1 ± 0,4

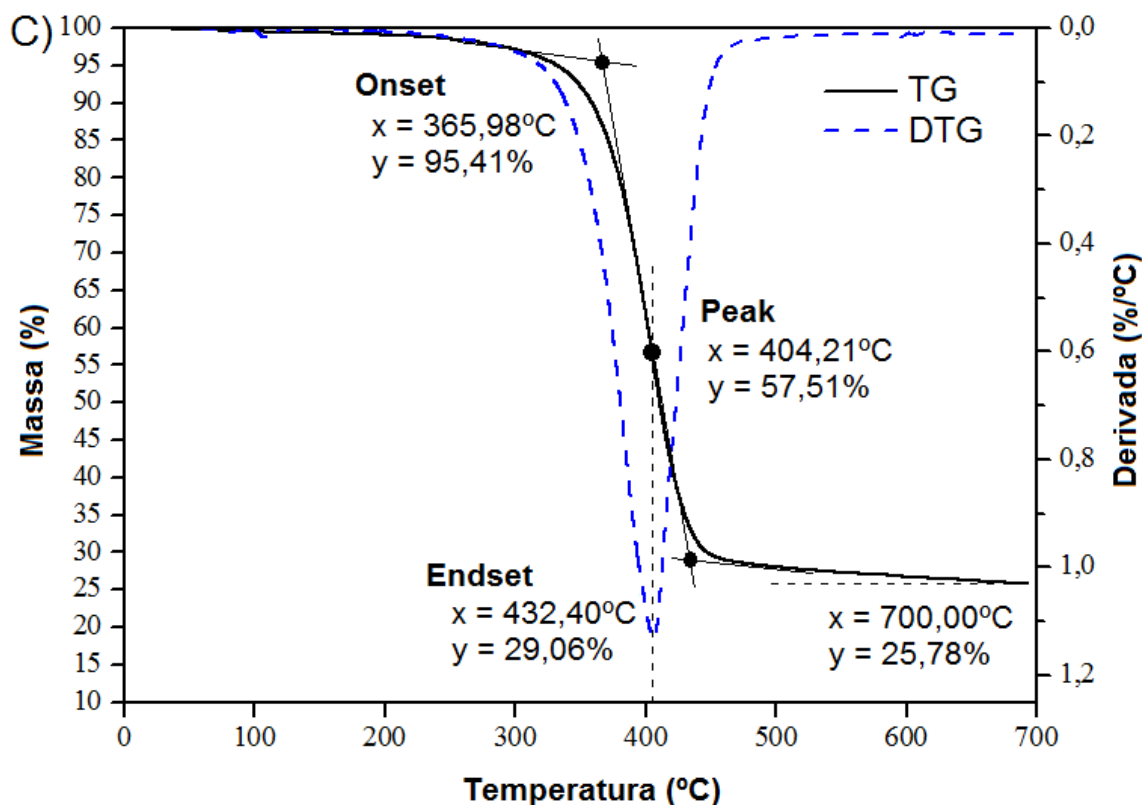
Fonte: O autor.

Figura 28. Curvas de TG e DTG das amostras de vergalhões de GFRP com: (A) matriz poliéster, (B) matriz éster vinílica e (C) matriz epóxi.



Fonte: O autor.

Figura 28 (continuação). Curvas de TG e DTG das amostras de vergalhões de GFRP com: (A) matriz poliéster, (B) matriz éster vinílica e (C) matriz epóxi.



Fonte: O autor.

O primeiro evento de perda de massa foi observado em cerca de 100°C, sendo atribuído à perda de água quimicamente adsorvida (-OH intermolecular) correspondente a 0,82%, 0,78% e 0,69% nas amostras de vergalhões de GFRP com matriz poliéster, éster vinílica e epóxi, respectivamente. A 300°C, a perda de massa foi de 3,76% (matriz poliéster), 3,46% (matriz éster vinílica) e 2,87 (matriz epóxi), estando associada a quebra de cadeias moleculares na resina polimérica (BORSOI *et al.*, 2016; ZHU *et al.*, 2014).

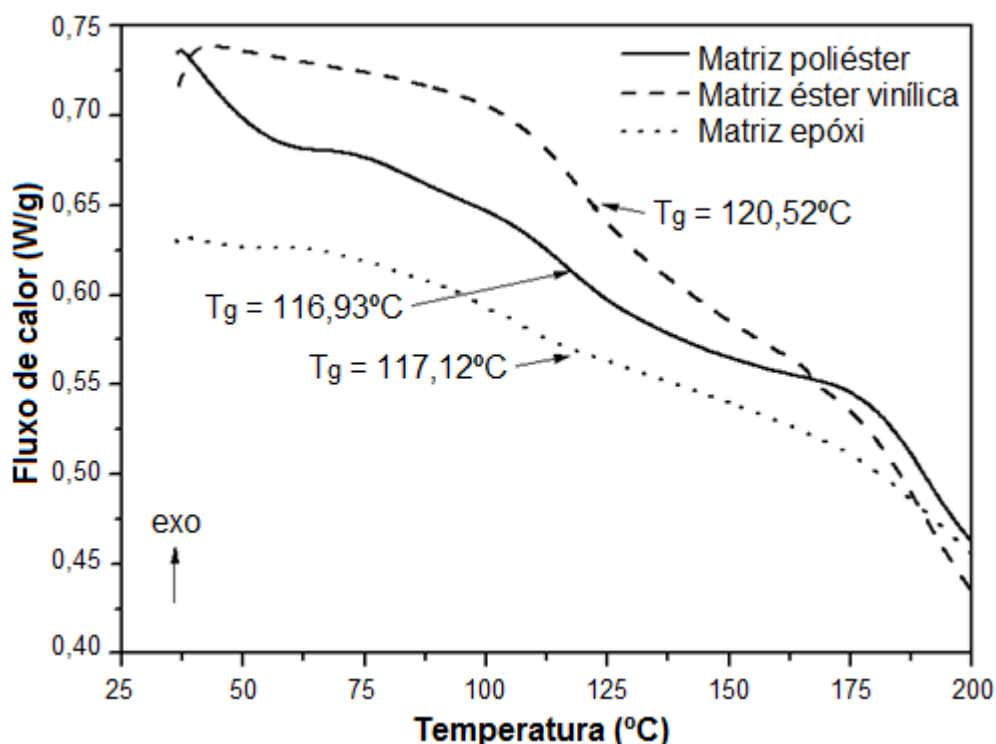
As curvas TG mostraram uma inclinação acentuada, nas temperaturas ( $T_{\text{Onset}}$ ) de 389,4°C (matriz poliéster), 395,4°C (matriz éster vinílica) e 366,0°C (matriz epóxi), evidenciado na redução da derivada, atingindo um vale bem definido na curva DTG. No final deste evento térmico ( $T_{\text{Endset}}$ ), observaram-se perdas de massa total iguais a 81,22% (matriz poliéster), 75,65% (matriz éster vinílica) e 66,35% (matriz epóxi), associadas à degradação térmica das cadeias poliméricas (ZHU *et al.*, 2014).



A 700°C é possível observar uma massa residual de 11,49% (matriz poliéster), 16,40% (matriz éster vinílica) e 25,78% (matriz epóxi), que pode estar associada à presença de componentes inorgânicos de maior temperatura de decomposição. Assim, a amostra de matriz epóxi apresentou menor perda de massa, seguida das amostras matriz éster vinílica e poliéster, respectivamente.

A Figura 29 apresenta os resultados obtidos pela análise DSC em amostras dos vergalhões de GFRP estudados. Durante o aquecimento, observa-se que as matrizes poliméricas apresentaram transição vítrea ( $T_g$ ), nas temperaturas de 116,9°C, 120,5°C e 117,1°C para as amostras de vergalhões de GFRP com matriz poliéster, éster vinílica e epóxi, respectivamente. Estes valores estão de acordo com o esperado, conforme Tabela 1, sendo também superior ao valor mínimo de 100°C estabelecido pela Norma ASTM 7957 (ASTM, 2017).

Figura 29. Curvas DSC das amostras de vergalhões de GFRP com matriz poliéster, éster vinílica e epóxi.



Fonte: O autor.

A temperatura de transição vítrea pode ser atribuída a uma relaxação estrutural, uma vez que, após essa temperatura, o polímero tem a sua capacidade de transferir esforços para as fibras de vidro prejudicada, tendo um efeito negativo na resistência

à tração dos vergalhões de GFRP. A partir das análises de TG e DSC, foram escolhidas as temperaturas de exposição dos vergalhões de GFRP a 150°C (valor superior e próximo às  $T_g$ ) e 300°C (próximo ao início da decomposição da matriz polimérica dos vergalhões de GFRP).

#### 4.1.2 Agregados e aglomerantes

As propriedades físicas e a distribuição granulométrica dos materiais utilizados para a confecção do concreto são apresentadas na Tabela 12 e na Figura 30. É possível observar que o cimento se apresentou como mais fino entre os materiais, seguido pela sílica ativa, areia e brita, respectivamente. A areia foi classificada, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), como muito fina (zona utilizável inferior), característica das areias da região de Salvador (Bahia, Brasil). A brita foi classificada como 4,75/12,5 e dimensão máxima característica de 9,5 mm.

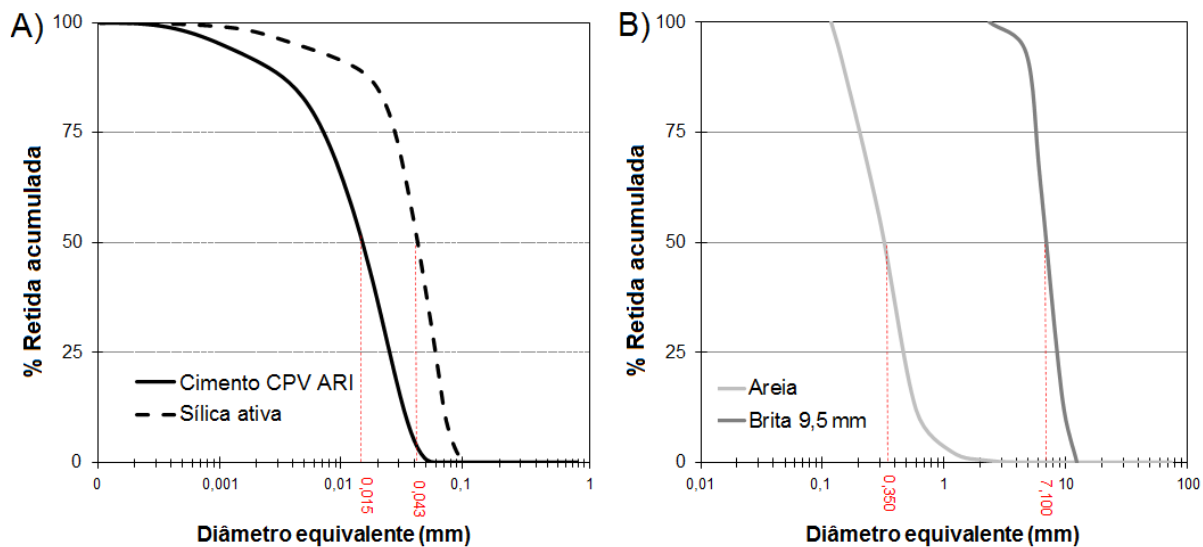
Tabela 12. Caracterização física dos materiais utilizados para a confecção de concreto.

Característica	Cimento	Sílica ativa	Areia	Brita
Diâmetro equivalente de partículas – $D_{50}$ (mm)	0,015	0,043	0,350	7,100
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	3130	2320	2650	2770
Área superficial específica (m <sup>2</sup> /g)	1,4	15,2	---	---
Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	---	---	1490,0	1390,0
Massa unitária compactada (kg/m <sup>3</sup> )	---	---	---	1490,0
Módulo de finura	---	---	1,60	6,00

Fonte: O autor.

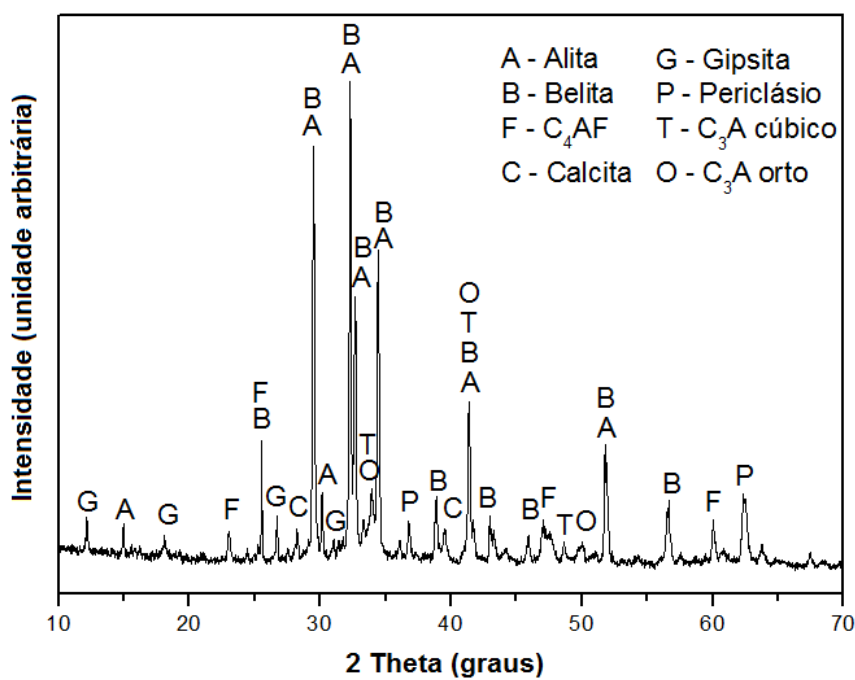
O difratograma do cimento CP V ARI, com identificação das fases cristalinas presentes, é apresentado na Figura 31. As fases cristalinas identificadas foram:  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  (cúbico e ortorrômbico),  $C_4AF$ , calcita ( $CaCO_3$ ), gipsita ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) e periclásio ( $MgO$ ), sendo a alita a fase majoritária, como esperado para este tipo de cimento. O difratograma da sílica ativa apresentado na Figura 32 mostrou um halo amorfo amplo, localizado entre 15° e 30° ( $2\theta$ ), associado ao grau de amorfismo do material. A cristobalita foi a única fase cristalina identificada neste material.

Figura 30. Distribuição granulométrica dos materiais utilizados para produção do concreto: (A) cimento CPV ARI e sílica ativa e (B) areia e brita.



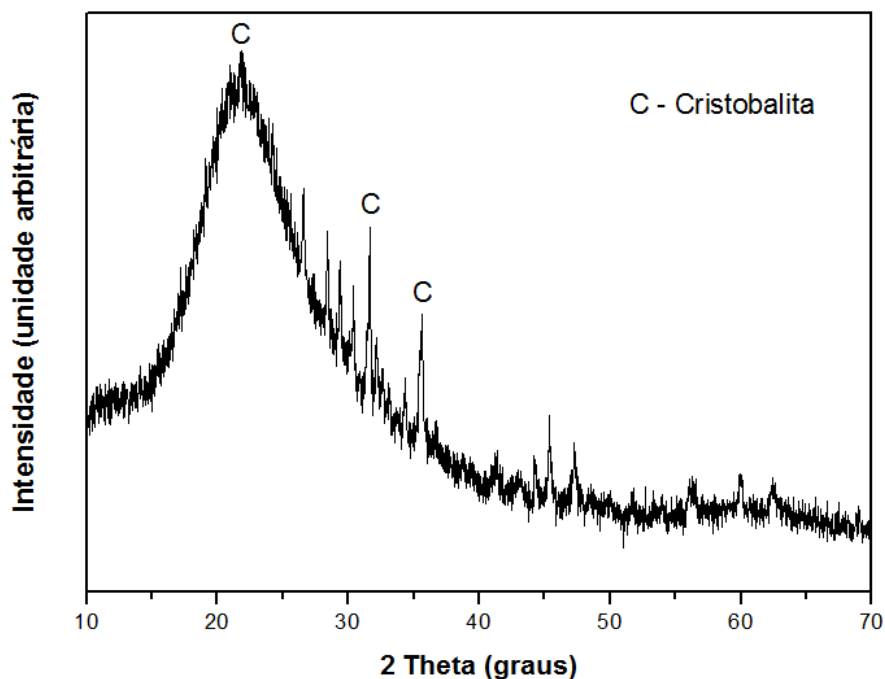
Fonte: O autor.

Figura 31. Difratoograma de raios X das amostras de cimento CP V ARI.



Fonte: O autor.

Figura 32. Difratoograma de raios X da amostra de sílica ativa.



Fonte: O autor.

A partir da análise da Tabela 13, foi possível observar que a composição química do cimento CP V ARI está de acordo com o esperado para seus principais componentes, como óxido de cálcio (CaO), sílica (SiO<sub>2</sub>), óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de magnésio (MgO), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e álcalis (Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O). No entanto, o teor de SO<sub>3</sub> encontra-se acima do valor máximo (4,50%) estabelecido pela Norma NBR 16697 (ABNT, 2018), entretanto, neste trabalho não será avaliada a durabilidade dos concretos no que se refere ao ataque por sulfatos, logo, este teor acima do permitido não provocará efeitos significativos.

Tabela 13. Composição química do cimento CP V e da sílica ativa (% em massa), determinada por FRX, na forma de óxidos.

Material	Óxidos (%)									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Outros	P.F.*
Cimento CP V	16,2	3,8	3,8	64,3	4,9	1,1	4,8	0,6	0,4	4,8
Sílica ativa	85,5	1,5	5,1	0,3	1,4	1,9	0,5	2,1	1,6	4,4

\* Perda ao Fogo

Fonte: O autor.

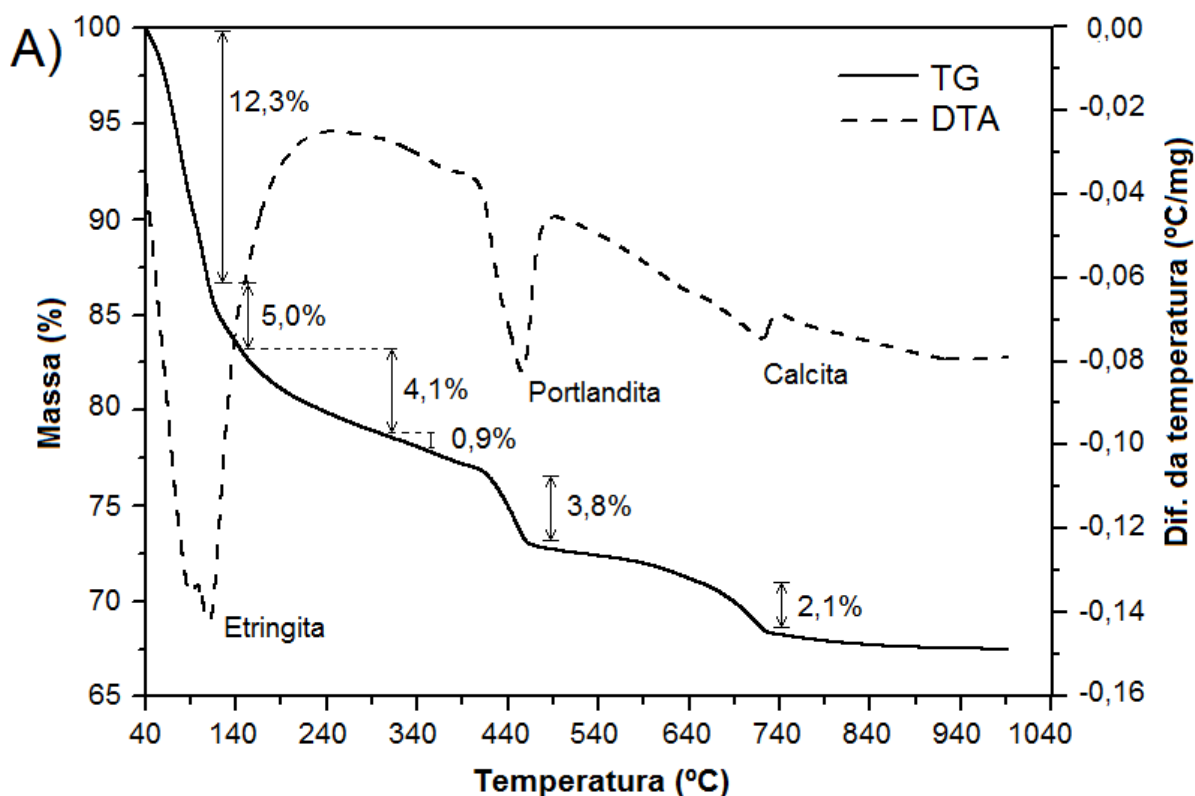
## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

### 4.2.1 Análise térmica da matriz cimentícia

Para avaliar o efeito da exposição da matriz cimentícia de referência (REF) e contendo sílica ativa (SA-10) a temperaturas elevadas foram realizadas análises termogravimétricas (TG) e térmicas diferenciais (DTA), aos 28 dias, conforme mostrado na Figura 33.

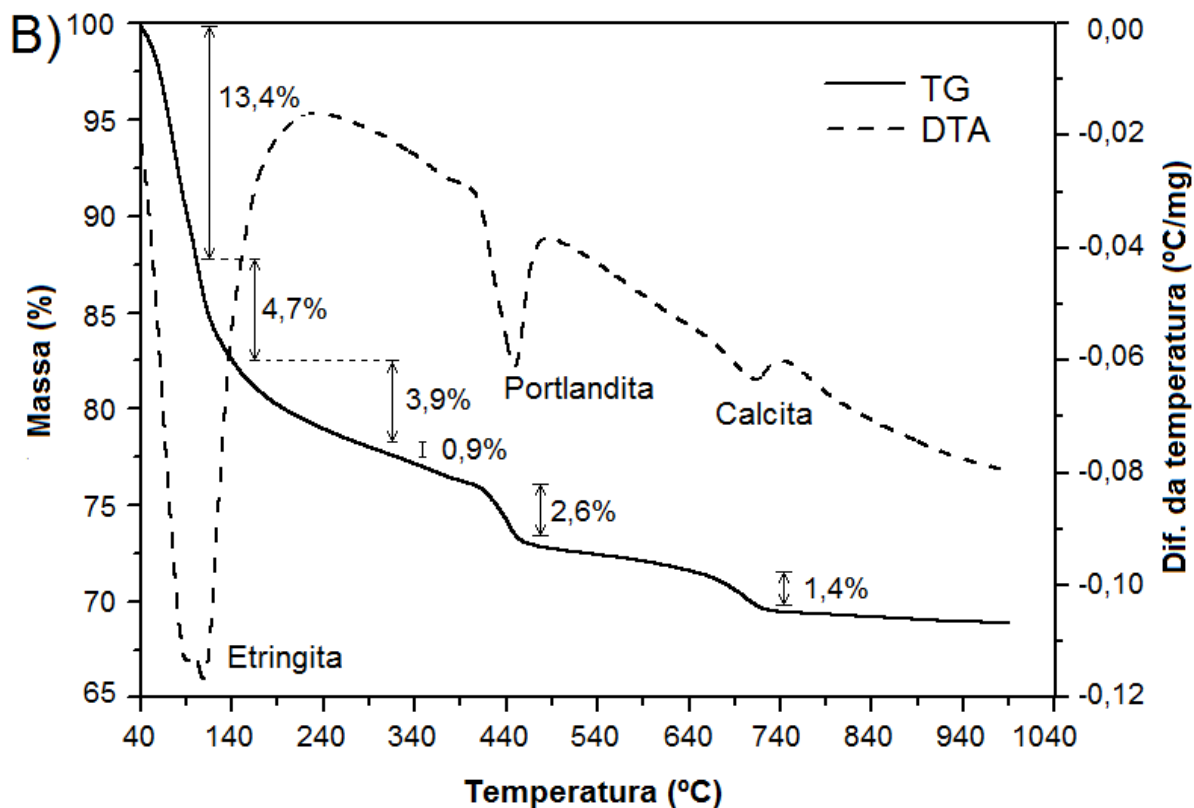
O aquecimento das pastas REF e SA-10 resultou em alterações físicas com comportamentos térmicos semelhantes. O primeiro evento de perda de massa foi identificado na faixa entre 40°C e 100°C, representando uma perda de 12,3% e 13,4%, respectivamente, atribuída aos efeitos da decomposição da etringita (LOTHENBACH *et al.*, 2016), que ocorre em torno de 70–90°C (HOPPE FILHO *et al.*, 2017; MEMON *et al.*, 2019).

Figura 33. Curvas TG e DTA das pastas de cimento: (A) REF e (B) SA-10, aos 28 dias.



Fonte: O autor.

Figura 33 (continuação). Curvas TG e DTA das pastas de cimento: (A) REF e (B) SA-10, aos 28 dias.



Fonte: O autor.

O segundo evento térmico ocorre a partir de 100°C, com a intensificação da desidratação das pastas de cimento, devido a água capilar (água livre), correspondente a 5,0% e 4,7% até 150°C, em seguida ocorre a evaporação das águas lamelares e adsorvidas e água quimicamente associada aos cristais de C-S-H silicato de cálcio hidratado, correspondente a 5,0% e 4,8% até 380°C. (HOPPE FILHO *et al.*, 2017; FERNANDES *et al.*, 2017).

Em seguida, o hidróxido de cálcio (portlandita) se decompõe em cal e água na faixa de temperatura entre 380°C a 460°C. A água de composição do hidróxido de cálcio representa 3,8% e 2,6%, respectivamente. Estes valores, quando multiplicado por 4,11 (relação da massa molecular do hidróxido de cálcio e da massa molecular da água), indicam o teor remanescente de cal na amostra, que corresponde a 15,6 e 10,7, respectivamente, o que significa que houve consumo de portlandita na amostra SA-10. Finalmente, a calcita se decompõe, representando uma perda de massa de 2,1% e 1,4%, para as pastas REF e SA-10, respectivamente.

A substituição de 10% da massa de cimento por sílica ativa provocou uma reação pozolânica na pasta de cimento SA-10, que reduziu a quantidade de água nos compostos etringita, silicato de cálcio hidratado, portlandita e calcita, reduzindo assim a perda de massa por desidratação. Assim, a degradação da pasta de cimento ocorreu progressivamente com a exposição ao calor, o que pode comprometer suas propriedades mecânicas. A partir desses resultados, observa-se que até a temperatura de 150°C não houve alterações significativas na matriz cimentícia.

#### 4.2.2 Propriedades físicas e mecânicas do concreto

A Tabela 14 apresenta os valores médios e desvio padrão das propriedades físicas e mecânicas dos concretos confeccionados sem sílica ativa (REF) e com adição de sílica ativa (SA-10).

Tabela 14. Propriedades físico-mecânicas dos concretos confeccionados sem sílica ativa (REF) e com adição de sílica ativa (SA-10).

Propriedade	Tipos de concreto	
	REF	SA-10
Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2556,0 ± 24,0	2617,0 ± 14,0
Porosidade aparente (%)	18,2 ± 1,4	16,3 ± 1,6
Resistência à compressão axial (MPa)	32,7 ± 0,7	38,0 ± 1,3
Resistência à compressão diametral (MPa)	3,6 ± 0,1	3,6 ± 0,4
Módulo de elasticidade (GPa)	36,3 ± 1,0	35,1 ± 1,3
Velocidade média de propagação de onda (km/s)	4,7 ± 0,3	4,6 ± 0,1
Coefficiente de absorção capilar (kg/m <sup>2</sup> min <sup>0,5</sup> )	0,10 ± 0,01	0,24 ± 0,04

Fonte: O autor.

Como pode ser visto na Tabela 14, a adição de sílica ativa influenciou as características físicas e mecânicas do concreto, de modo que o concreto com sílica ativa (SA-10), de mesma classe de resistência do concreto de referência (REF), apresentou porosidade aparente cerca de 10% inferior, apesar de não alterar significativamente a densidade. Este resultado é de fundamental importância, uma vez que o principal mecanismo de controle da durabilidade dos concretos é a sua porosidade.

Observa-se que a sorptividade do concreto SA-10 foi cerca de 2,5 vezes superior à observada no concreto de referência (REF), indicando que sua porosidade é

composta não apenas de macroporos mas, também, por uma parcela de poros capilares (raio dos poros entre  $10^{-3}$  e  $10^{-7}$  m) interconectados, que causam maior taxa de absorção (RIBEIRO, 2018).

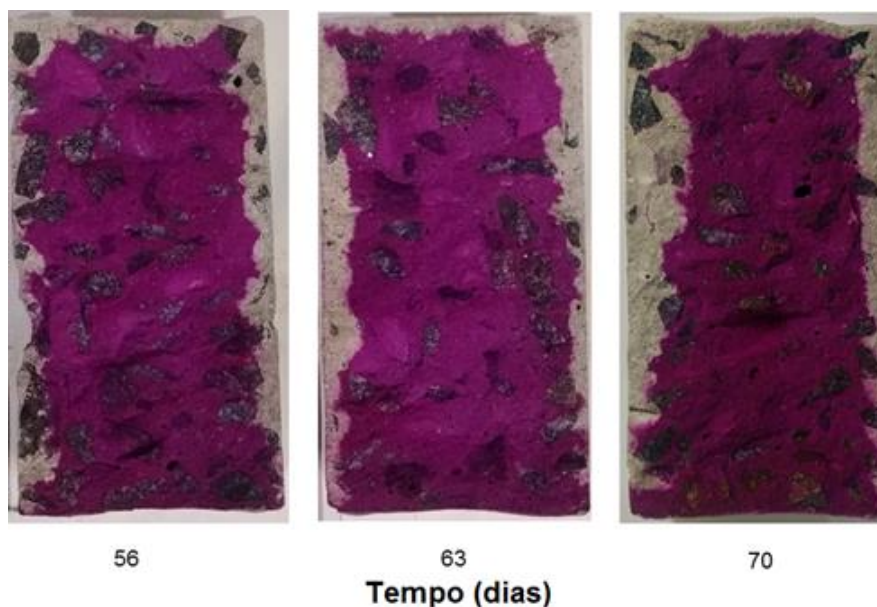
Conforme apresentado na metodologia (item 3.2.2.1), a resistência à compressão axial projetada para os concretos REF e SA-10 foi alcançada. Além disso, não foram observadas diferenças significativas na resistência à compressão diametral e no módulo de elasticidade dos concretos avaliados.

Com base nos resultados da velocidade de propagação de onda ultrassônica, os concretos REF e SA-10 foram classificados como de “qualidade excelente”, conforme Norma BS EN 12504 (BS, 2004), apresentando-se homogêneo, com pouca variação na qualidade.

#### 4.2.3 Carbonatação do concreto

Na Figura 34 é possível observar os corpos de prova produzidos com concreto de referência (REF), após 56, 63 e 70 dias de exposição à câmara de carbonatação e aspersão da solução de fenolftaleína, a partir das quais se mediram as profundidades de carbonatação, com auxílio do programa computacional AutoCAD® (SANTOS *et al.*, 2020).

Figura 34. Profundidades de carbonatação observadas em concretos de referência (REF) após 56, 63 e 70 dias de carbonatação acelerada.



Fonte: O autor.



As profundidades de carbonatação observadas foram iguais a  $6,5 \pm 1,0$  mm,  $8,8 \pm 0,7$  mm e  $10,7 \pm 1,4$  mm após 56, 63 e 70 dias de carbonatação acelerada, respectivamente. Observa-se que há uma tendência ao aumento da profundidade de carbonatação com o tempo de envelhecimento, conforme esperado. Estes corpos de prova foram produzidos sem os vergalhões de GFRP e foram uma referência para investigar os efeitos da carbonatação nos corpos de prova armados com vergalhão de GFRP.

### 4.3 AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DOS VERGALHÕES DE GFRP

#### 4.3.1 Envelhecimento em solução alcalina

##### 4.3.1.1 Vergalhões de GFRP – M6

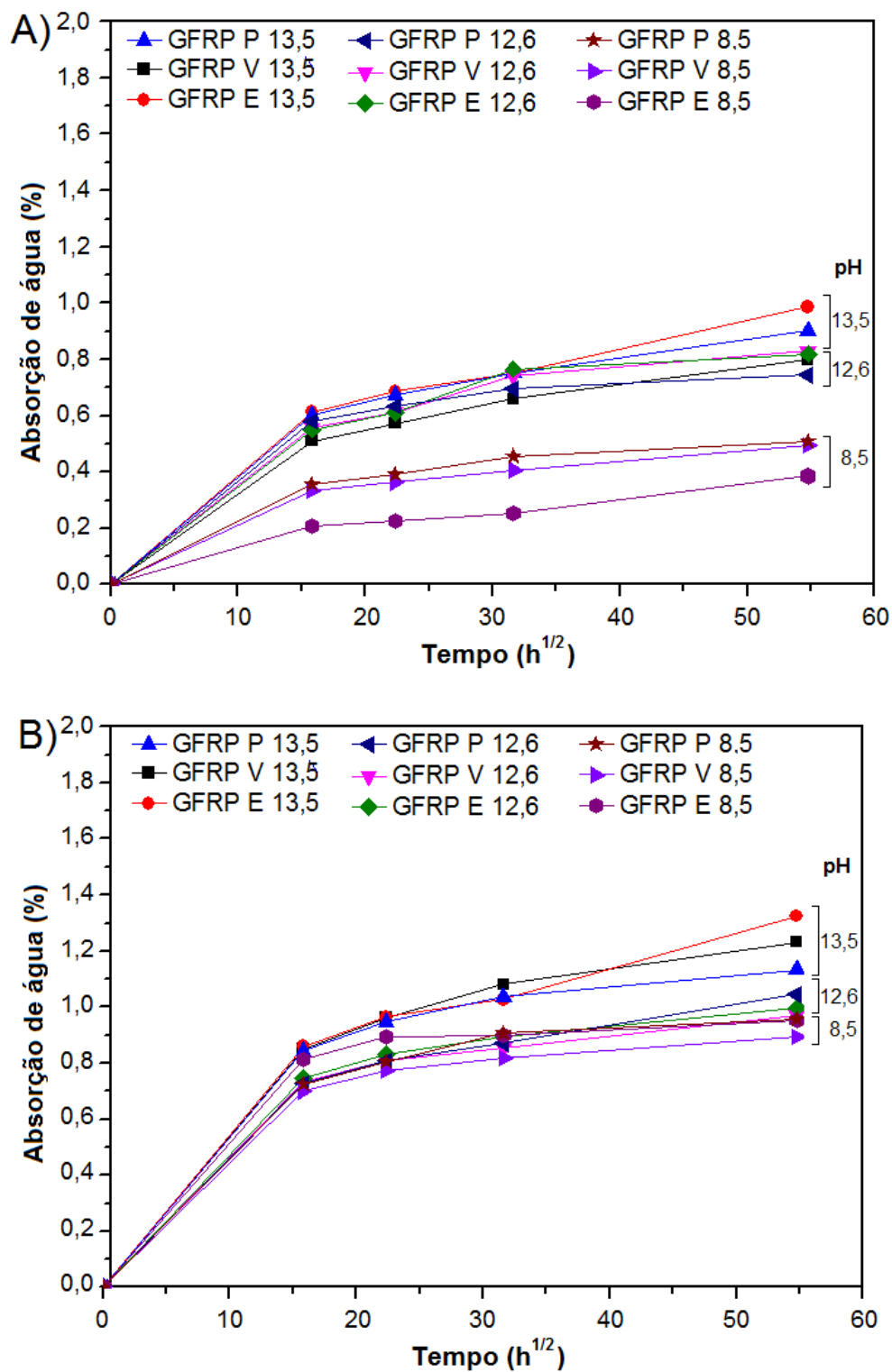
###### a) Absorção de água

A Figura 35 mostra as curvas de absorção de água de três tipos diferentes de vergalhões de GFRP (P, V e E), com diâmetro de 6,3 mm (M6), imersos em solução alcalina por 3000 horas, a 23°C, 40°C e 60°C. Nota-se que o comportamento de absorção de todas as amostras é semelhante. Inicialmente, a taxa de absorção é elevada, reduzindo com o tempo, à medida que o gradiente de concentração de água entre a superfície e a parte interna da amostra diminuiu, com comportamento semelhante às curvas Fickianas.

As curvas de absorção dos vergalhões de GFRP atingem um patamar que corresponde à saturação da absorção de água, sendo que este patamar variou em função do tipo de vergalhão de GFRP (poliéster, éster vinílica ou epóxi). Esta dependência pode ser explicada devido à estrutura química da resina polimérica. Além disso, verifica-se que a absorção de água foi influenciada pela alcalinidade da solução na qual os vergalhões imersos, sendo maior à medida que se aumentou o pH (8,5; 12,6 e 13,5).

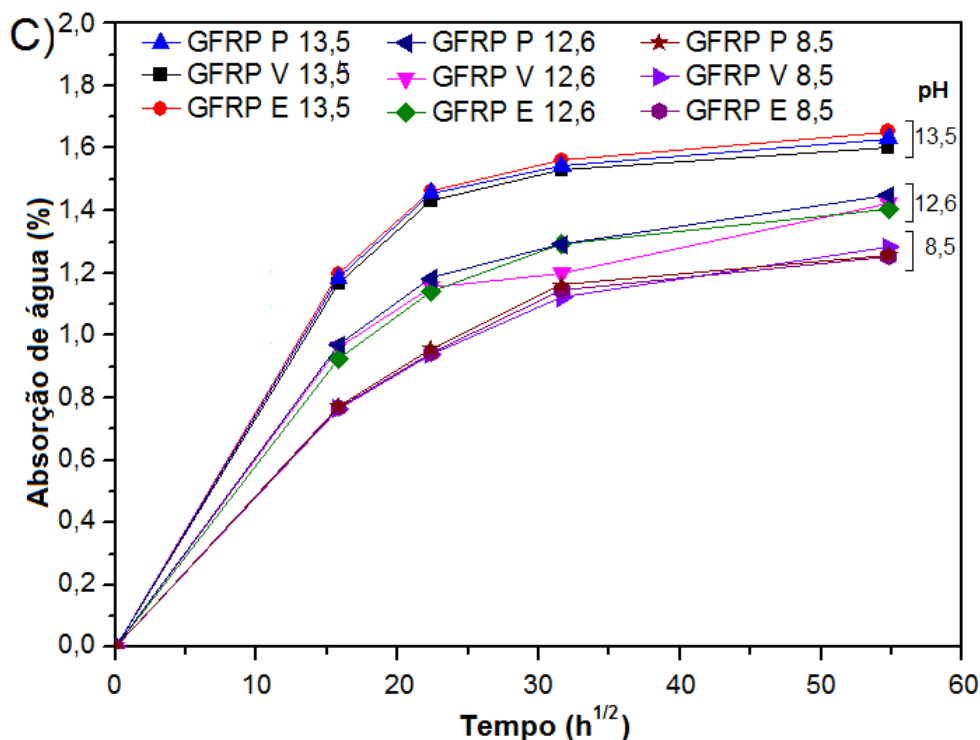
A difusibilidade do GFRP depende do conteúdo de resina e de fibra de vidro. Um conteúdo elevado de fibra de vidro deve levar a uma baixa difusibilidade, uma vez que a permeabilidade da fibra é considerada insignificante. Uma vez que os três vergalhões possuem quase o mesmo teor de fibras de vidro, o tipo de resina deve ser o fator responsável pela diferença observada na difusão.

Figura 35. Absorção de água média em função do tempo de imersão dos vergalhões de GFRP em solução alcalina nas temperaturas: (A) 23°C, (B) 40°C e (C) 60°C.



Fonte: O autor.

Figura 35 (continuação). Absorção de água em função do tempo de imersão dos vergalhões de GFRP em solução alcalina nas temperaturas: (A) 23°C, (B) 40°C e (C) 60°C.



Fonte: O autor.

As resinas éster vinílica e epóxi contêm menos grupos polares que a resina poliéster (SPRINGER, 1984) e, portanto, deve apresentar baixa difusibilidade e absorção. Além disso, o poliéster possui duplas ligações reativas distribuídas pelas cadeias, enquanto a resina éster vinílica possui tais ligações nas extremidades das cadeias. Assim, a densidade da reticulação pode ser mais bem controlada na resina éster vinílica (BENMOKRANE *et al.*, 2002). Como resultado de boas ligações intermoleculares, a resina éster vinílica deve ser mais estável e capaz de resistir à penetração de água, que é a razão para a menor absorção de água do vergalhão de GFRP-V. Micelli *et al.* (2004) observaram comportamento semelhante para vergalhões de GFRP com resinas epóxi e éster vinílica reforçadas com fibras de carbono, com aumento da absorção de fluidos após imersão a 60°C. Segundo os autores, isso destaca o importante papel da temperatura na absorção dos vergalhões de GFRP.

Os valores obtidos experimentalmente dos coeficientes de difusão da solução ( $D$ ), calculados pela Equação 6, são apresentados na Tabela 15. É possível verificar que este coeficiente aumenta com o aumento de temperatura de condicionamento e com o aumento do pH da solução. Os coeficientes de difusividade dos vergalhões de

GFRP-P a 40°C e 60°C são 9% e 67% maiores que aqueles observados nos vergalhões imersos a 23°C, enquanto os coeficientes de difusividade dos vergalhões de GFRP-V imersos em solução a 40°C e 60°C são 21% e 67% aos dos vergalhões imersos a 23°C. O coeficiente de difusividade dos vergalhões de GFRP-E imersos em solução a 40°C e 60°C são 7% e 54% superiores àqueles imersos a 23°C.

Tabela 15. Coeficientes de difusão médios ( $D \times 10^{-7} \text{ mm}^2/\text{s}$ ) dos vergalhões de GFRP com matrizes poliéster, éster vinílica e epóxi, imersos em solução alcalina a 23°C, 40°C e 60°C, com diferentes pHs 8,5, 12,6 e 13,5.

Temp. (°C)	Coeficiente de difusão ( $10^{-7} \text{ mm}^2/\text{s}$ )								
	GFRP-P			GFRP-V			GFRP-E		
	8,5	12,6	13,5	8,5	12,6	13,5	8,5	12,6	13,5
23,0	2,7	3,0	4,6	2,5	2,8	4,5	2,9	3,0	4,8
40,0	4,0	4,3	5,0	4,0	4,2	5,4	4,2	4,7	5,1
60,0	6,4	6,9	7,7	6,0	6,5	7,6	6,1	6,9	7,3

Fonte: O autor.

Confirma-se que os valores de coeficientes de difusão médio para os vergalhões de GFRP com matriz éster vinílica são inferiores aos observados em vergalhões de GFRP com resina poliéster e epóxi, independente da temperatura da solução de envelhecimento. Kamal *et al.* (2011) avaliaram compósitos com os mesmos tipos de resinas e observaram que compósitos com resina éster vinílica absorvem menos água do que aqueles com matrizes poliéster isoftálica.

#### b) Resistência ao cisalhamento interlaminar

A Tabela 16 apresenta os resultados experimentais médios obtidos nos ensaios de cisalhamento interlaminar (S) dos vergalhões de GFRP com matrizes poliéster, epóxi e éster vinílica envelhecidos e não envelhecidos em solução alcalina nas temperaturas de 23°C, 40°C e 60°C, pelos períodos de 500 h, 1000 h e 3000 h, respectivamente.

Tabela 16. Resistência ao cisalhamento interlaminar média dos vergalhões de GFRP com matrizes poliéster (P), éster vinílica (V) e epóxi (E), imersas em solução alcalina a 23°C, 40°C e 60°C durante 500 h, 1000 h e 3000 h.

Temp. (°C)	pH	Resistência ao cisalhamento interlaminar (MPa)								
		GFRP-P			GFRP-V			GFRP-E		
		500 h	1000 h	3000 h	500 h	1000 h	3000 h	500 h	1000 h	3000 h
<b>Controle</b>		48,2 ± 1,0			48,2 ± 2,5			50,6 ± 2,2		
<b>23,0</b>	8,5	46,5 ± 0,5	45,7 ± 1,7	45,1 ± 3,2	45,2 ± 0,9	45,0 ± 3,8	43,6 ± 3,4	46,5 ± 1,3	45,2 ± 0,3	44,4 ± 4,1
	12,6	46,2 ± 0,1	44,8 ± 1,9	43,6 ± 2,7	46,1 ± 1,9	45,2 ± 0,8	44,5 ± 0,2	46,2 ± 0,2	45,5 ± 3,4	45,6 ± 1,6
	13,5	45,2 ± 0,8	44,9 ± 0,4	43,0 ± 1,5	45,6 ± 2,6	44,9 ± 1,6	43,3 ± 0,1	45,0 ± 1,7	44,4 ± 1,9	42,1 ± 1,2
<b>40,0</b>	8,5	46,4 ± 0,2	46,2 ± 0,1	45,3 ± 2,4	46,1 ± 1,4	46,0 ± 0,6	45,0 ± 0,5	46,0 ± 0,1	45,8 ± 0,6	45,4 ± 0,5
	12,6	45,1 ± 0,7	44,3 ± 0,4	43,4 ± 0,3	45,9 ± 2,6	45,1 ± 2,0	43,9 ± 0,2	44,6 ± 2,0	43,9 ± 0,5	43,0 ± 0,1
	13,5	43,7 ± 3,1	43,0 ± 0,5	42,2 ± 0,2	44,2 ± 0,3	43,5 ± 0,1	42,8 ± 0,4	43,7 ± 0,5	41,9 ± 0,9	41,0 ± 0,1
<b>60,0</b>	8,5	45,0 ± 0,2	44,3 ± 0,5	38,2 ± 1,3	44,1 ± 2,3	42,1 ± 1,3	40,4 ± 2,3	46,0 ± 2,4	44,8 ± 0,3	42,5 ± 1,9
	12,6	45,1 ± 2,7	44,1 ± 3,4	42,5 ± 2,7	43,8 ± 4,7	43,2 ± 1,8	42,0 ± 2,4	45,3 ± 3,0	45,0 ± 2,9	40,1 ± 2,1
	13,5	37,8 ± 1,3	37,4 ± 3,1	35,6 ± 1,5	44,9 ± 1,2	42,1 ± 1,8	36,8 ± 0,9	19,2 ± 1,3	17,3 ± 1,6	14,3 ± 0,2

Fonte: O autor.

Como esperado, houve uma redução na resistência ao cisalhamento interlaminar dos vergalhões de GFRP envelhecidos. Esses resultados são comparados na Figura 36, que mostra a retenção da resistência ao cisalhamento interlaminar em função do tempo de condicionamento em soluções com pH iguais a 8,5, 12,6 e 13,5, em diferentes temperaturas (23°C, 40°C e 60°C).

Verifica-se que o tipo de resina usada na produção dos vergalhões tem influência na perda de resistência dos vergalhões de GFRP. Quando estes vergalhões de GFRP envelheceram em solução com pH de 8,5, 12,6 e 13,5 a 23°C por 3000 h, sua resistência ao cisalhamento foi reduzida em 7,6%, 8,2% e 10,8%, respectivamente, como mostrado na Figura 36A. Esta redução deveu-se à absorção de água e, consequentemente, à promoção da reação de hidrólise entre a resina polimérica e os íons alcalinos e moléculas de água.

A resistência ao cisalhamento dos vergalhões de GFRP envelhecidos a 40°C por 3000 h foi ligeiramente afetada em solução com pH 8,5, mas significativamente reduzida após imersão em solução com pH mais elevados (12,6 e 13,5). Após o envelhecimento, a resistência ao cisalhamento dos vergalhões de GFRP foi reduzida em 9,5% e 12,5%, quando imersas em solução com pH de 12,6 e 13,5, respectivamente, conforme mostrado na Figura 36B. A maior redução da resistência ao cisalhamento a 40°C, especialmente para os vergalhões imersos em soluções com maiores valores de pH, deveu-se à elevada temperatura, favorecendo a reação da resina polimérica com os íons alcalinos e moléculas de água (PAN e YAN, 2021).

A Figura 36C mostra que, em vergalhões de GFRP condicionados a 60°C, a maior concentração de hidroxilas ( $OH^-$ ) na solução alcalina resultou em degradação mais severa, com maior redução da resistência ao cisalhamento interlaminar. O envelhecimento por 3000 h em soluções de pH iguais a 8,5, 12,6 e 13,0 resultou em reduções de 11,5%, 13,5% e 26,4%, respectivamente, na resistência ao cisalhamento interlaminar dos vergalhões de GFRP. Este padrão indica que a degradação da resistência ao cisalhamento interlaminar a 60°C foi mais severa do que a 40°C. Em resumo, as ações combinadas de temperaturas mais altas e valores mais elevados de pH (maior teor de hidroxila) causaram deterioração severa do vergalhão de GFRP, com formação de fissuras induzidas por hidrólise e descolamento na interface fibra/matriz, levando a reduções significativas de resistência ao cisalhamento interlaminar.

Figura 36. Resistência ao cisalhamento interlaminar média em função do tempo de condicionamento dos vergalhões de GFRP-P, GFRP-V e GFRP-E em solução alcalina para as temperaturas: (A) 23°C, (B) 40°C e (C) 60°C.

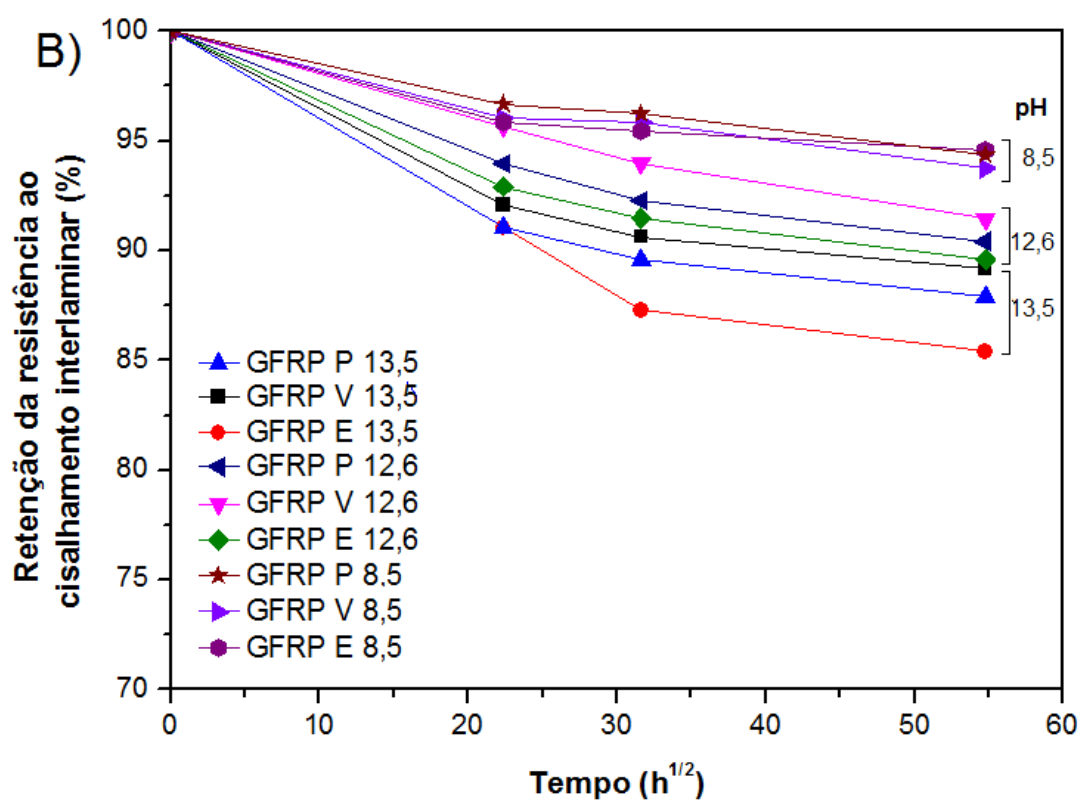
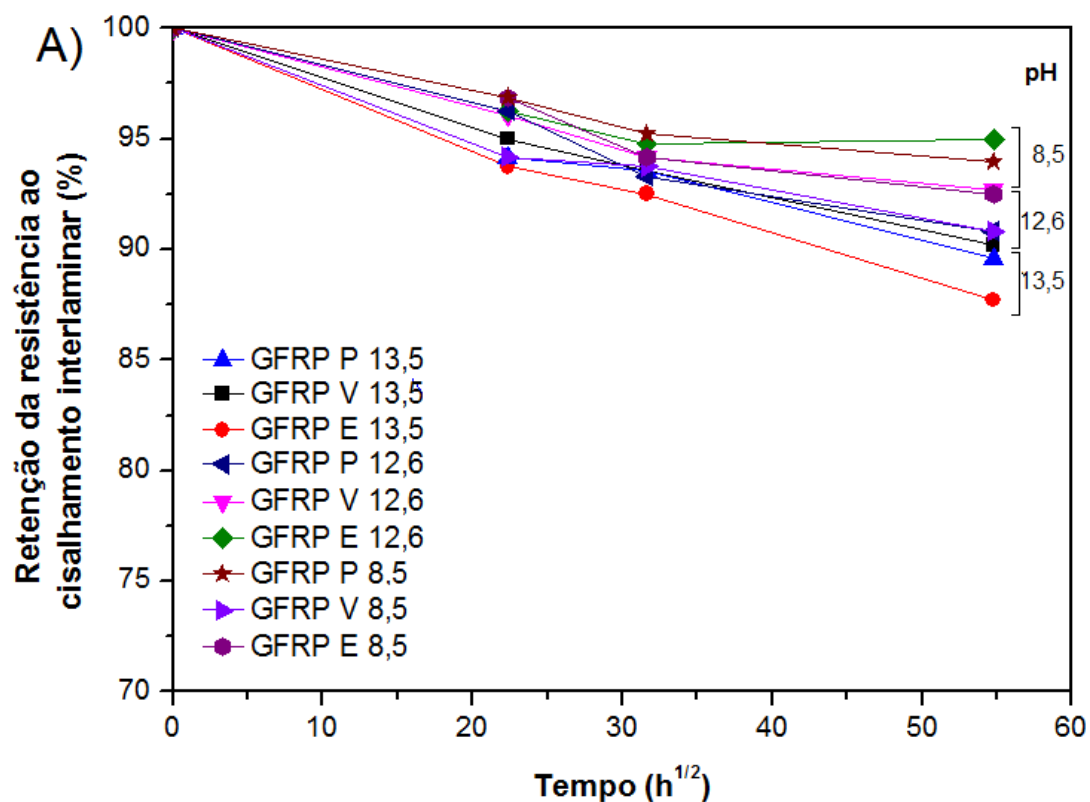
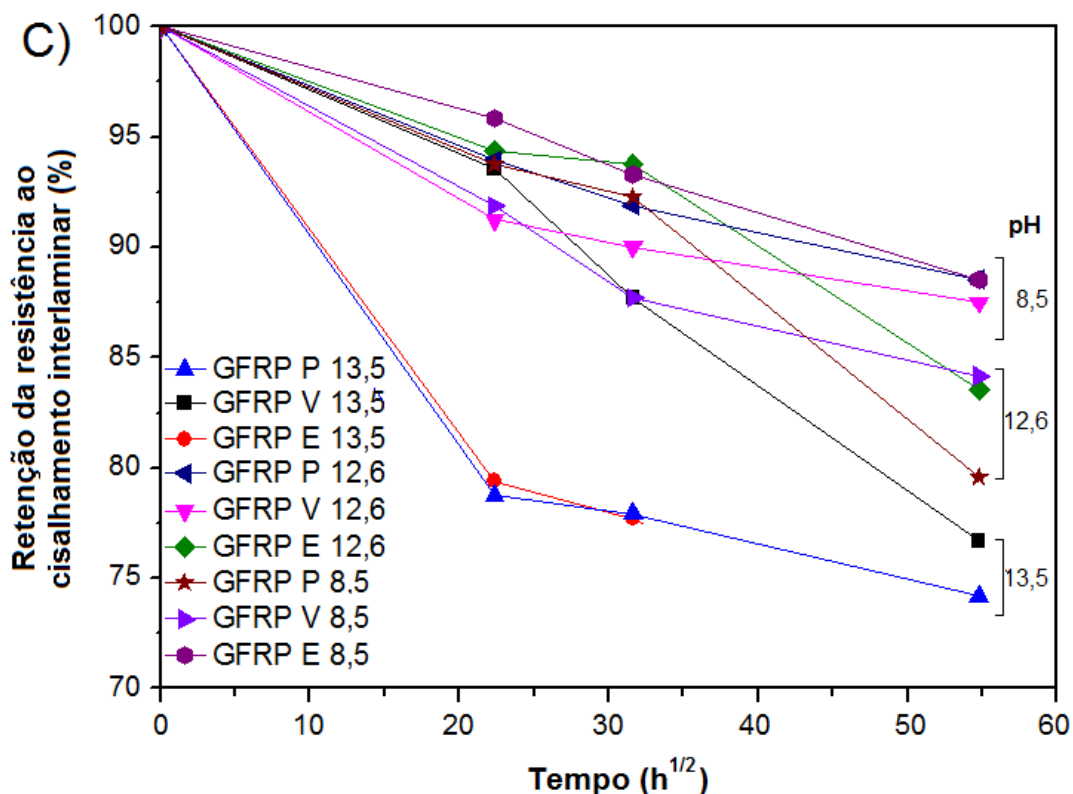


Figura 36 (continuação). Resistência ao cisalhamento interlaminar média em função do tempo de condicionamento dos vergalhões de GFRP-P, GFRP-V e GFRP-E em solução alcalina para as temperaturas: (A) 23°C, (B) 40°C e (C) 60°C.

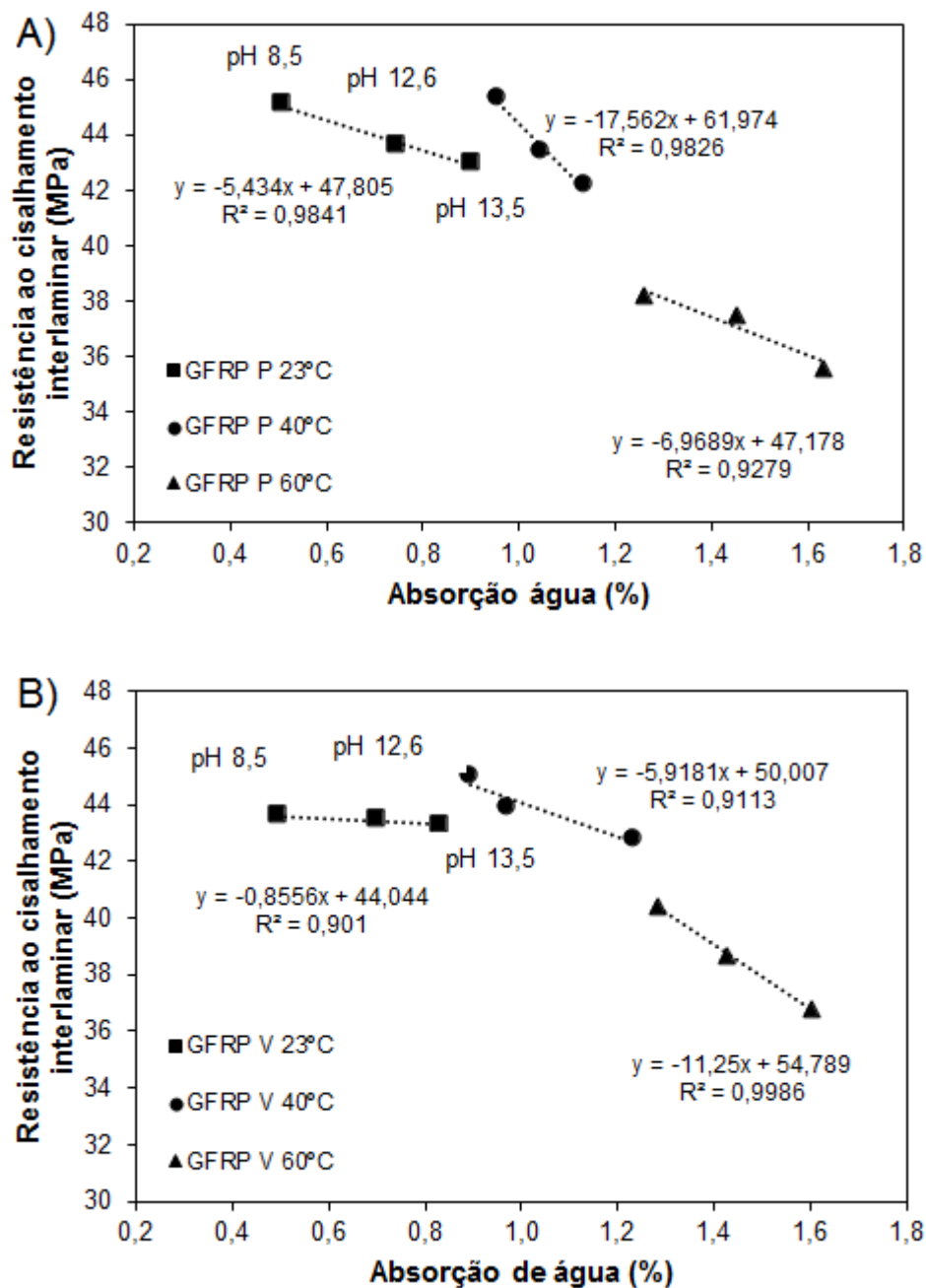


Fonte: O autor.

Analisando comparativamente a absorção de água e a resistência ao cisalhamento dos vergalhões de GFRP envelhecidos em soluções com pH iguais a 8,5, 12,6 e 13,5, a 23°C, 40°C e 60°C, verifica-se que a resistência ao cisalhamento diminui linearmente com o aumento da absorção de água e com o aumento do pH da solução alcalina, como mostrado na Figura 37. A partir da regressão linear dos dados de resistência ao cisalhamento interlaminar, foi possível obter equações de correlação destas variáveis, indicando que estas equações poderão ser utilizadas para a previsão da evolução da resistência ao cisalhamento interlaminar dos vergalhões de GFRP contra a absorção de água. Os efeitos negativos nas propriedades mecânicas dos vergalhões de GFRP devido à ação combinada do ambiente alcalino e elevação da temperatura corrobora com os resultados obtidos por vários autores (MOON *et al.*, 2017; ASHRAFI *et al.*, 2018; LU *et al.*, 2021; YU *et al.*, 2021; PAN e YAN, 2021).

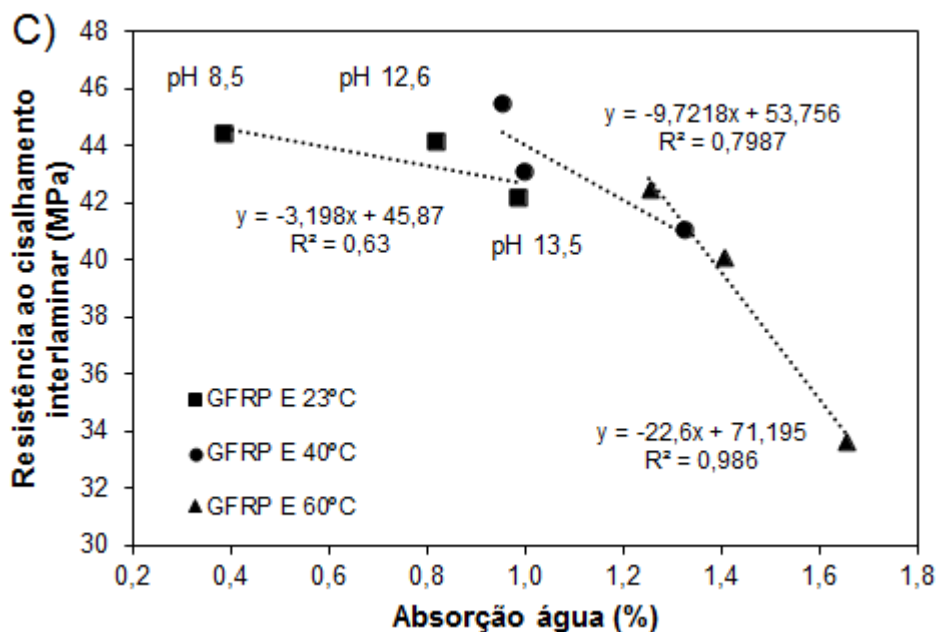


Figura 37. Resistência ao cisalhamento interlaminar média em função da absorção de água dos vergalhões de (A) GFRP-P, (B) GFRP-V e (C) GFRP-E envelhecidos nas soluções alcalinas por 3000 h com pH iguais a 8,5, 12,6 e 13,5 e a diferentes temperaturas (23°C, 40°C e 60°C).



Fonte: O autor.

Figura 37 (continuação). Resistência ao cisalhamento interlaminar média em função da absorção de água dos vergalhões de (A) GFRP-P, (B) GFRP-V e (C) GFRP-E envelhecidos nas soluções alcalinas com pH iguais a 8,5, 12,6 e 13,5 e a diferentes temperaturas (23°C, 40°C e 60°C).



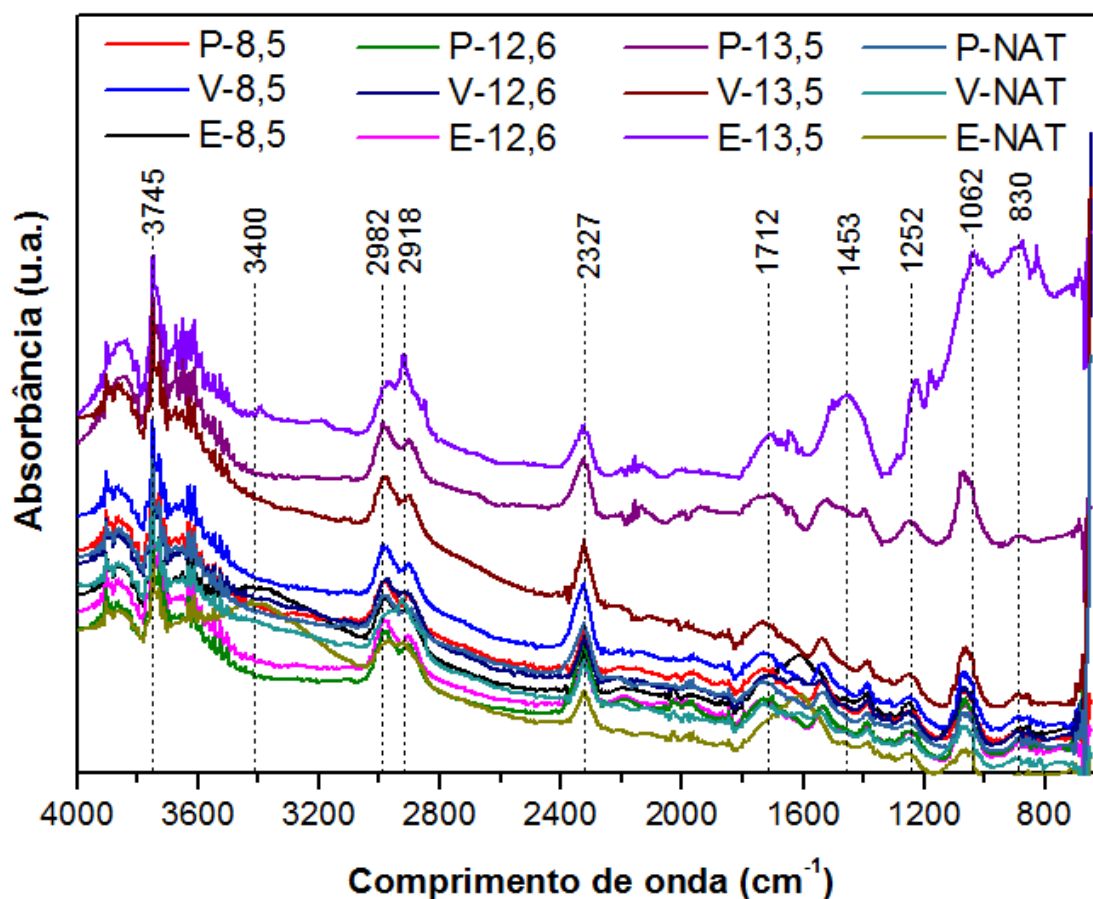
Fonte: O autor.

### c) Análise FTIR

Na Figura 38 são apresentados os espectros de FTIR para as amostras de vergalhões de GFRP com resina poliéster (P), éster vinílico (V) e epóxi (E) antes (NAT) e após as condições de exposição em solução alcalina (com pH 8,5; 12,6 e 13,5) por 3000 h, na temperatura de 60°C.

Após exposição em soluções alcalinas com pH iguais a 8,5, 12,6 e 13,5 verifica-se um aumento na intensidade dos picos dos principais grupos funcionais presentes nas resinas dos vergalhões de GFRP comparativamente aos vergalhões não envelhecidos (NAT). Os principais picos foram identificados nas seguintes bandas: 3500–3400  $\text{cm}^{-1}$  (estiramento O – H), 3100–3000  $\text{cm}^{-1}$  (estiramento do anel benzênico = C – H e grupo vinílico), 3000–2800  $\text{cm}^{-1}$  (estiramento C – H alifático de grupos CH, CH<sub>2</sub> e CH<sub>3</sub>), 1750–1720  $\text{cm}^{-1}$  (estiramento C = O), 1507  $\text{cm}^{-1}$  para o anel de benzeno aromático CH, 1232  $\text{cm}^{-1}$  para o éster C – O, próximo a 1180  $\text{cm}^{-1}$  (estiramento C – CO – C), próximo a 830  $\text{cm}^{-1}$  (deformação do anel do grupo epóxi).

Figura 38. Espectros de FTIR dos vergalhões de GFRP com matrizes: poliéster (P), éster vinílico (V) e epóxi (E), imersos em soluções alcalinas com pH 8,5; 12,6 e 13,5 na temperatura de 60°C durante 3000 h.



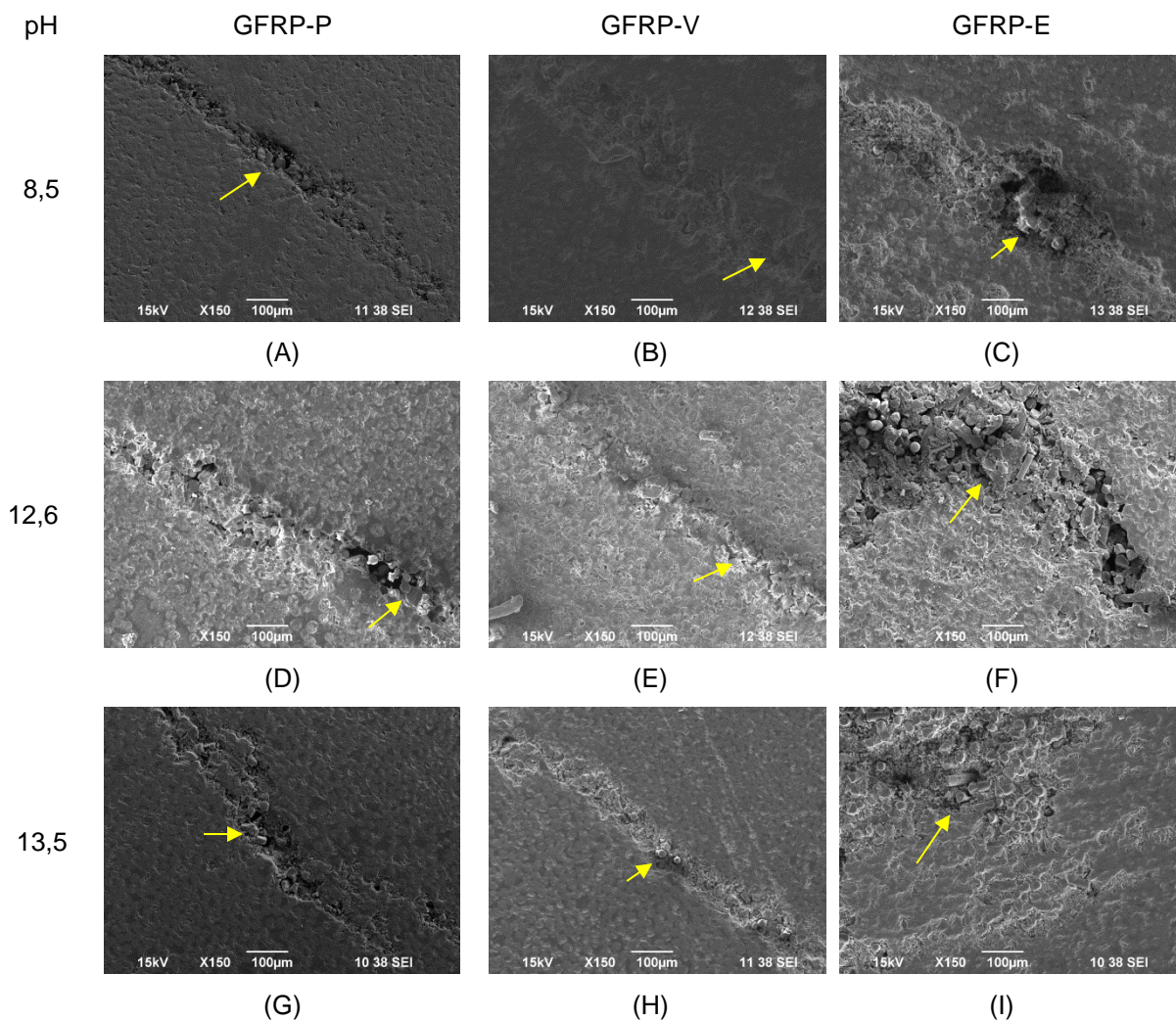
Fonte: O autor.

A partir dos espectros obtidos, observa-se que há uma mudança na banda de  $3745\text{ cm}^{-1}$ , indicando um aumento do teor de hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ), o que pode evidenciar um maior número de reações por hidrólise, principalmente nas amostras envelhecidas em solução alcalina com pH igual a 13,5. Na amostra de GFRP com resina éster-vinílica não se verifica uma diferença significativa no formato das bandas na região  $1440\text{-}1350\text{ cm}^{-1}$ , antes e após a exposição, o que pode indicar pequenas modificações na estrutura química das amostras envelhecidas em relação às não expostas. Verifica-se que, na resina epóxi, houve diferenças na banda que ocorre em  $1062\text{ cm}^{-1}$ , banda de deformação da ligação (C-O) (ZHU *et al.*, 2011; SAWPAN *et al.*, 2014; VEMUGANTI *et al.*, 2020).

## d) Análise microestrutural

A Figura 39 mostra as micrografias eletrônicas dos vergalhões de GFRP envelhecidos em solução alcalina por 3000 h na temperatura de 60°C, após o ensaio de cisalhamento interlaminar. Danos próximos à região de fratura dos vergalhões são observados e descritos a seguir.

Figura 39. Micrografias das superfícies de fratura em vergalhões de GFRP submetidos ao ensaio de cisalhamento interlaminar após 3000 h de imersão em solução alcalina a 60°C.



Fonte: O autor.

Nas amostras de vergalhões de GFRP envelhecidas em solução com pH iguais a 8,5 e 12,6 (Figura 39 A-F), a ruptura entre a matriz e a fibra de vidro foi o principal tipo de dano observado. Resíduos de matriz foram encontrados na superfície de fibras rompidas, indicando boa ligação entre a fibra de vidro e a matriz polimérica. Nas

amostras envelhecidas em solução alcalina com pH igual a 13,5 (Figura 39 G, H e I), foram observados danos nas fibras de vidro e descolamento na interface fibra/matriz polimérica.

Os resultados apresentados na Figura 39 estão em consonância com os resultados de absorção de água e resistência ao cisalhamento interlaminar, isto é, as amostras envelhecidas em solução alcalina com pH igual a 13,5 sofreram maior degradação. Estes resultados são semelhantes aos apresentados por diversos autores em publicações recentes (MOON *et al.*, 2017; YU *et al.*, 2021; PAN e YAN, 2021).

#### 4.3.1.2 Vergalhões de GFRP – M13

Foi realizada a avaliação da durabilidade dos vergalhões de GFRP com diâmetro de 12,7 mm e com matrizes poliéster (P) e éster vinílica (V) após 1000 h de imersão em solução alcalina nas temperaturas de 23°C e 60°C. Após este envelhecimento acelerado, foi realizada a análise morfológica e microestrutural dos vergalhões, além da mensuração da absorção de solução alcalina, degradação química das fibras de vidro e da matriz polimérica.

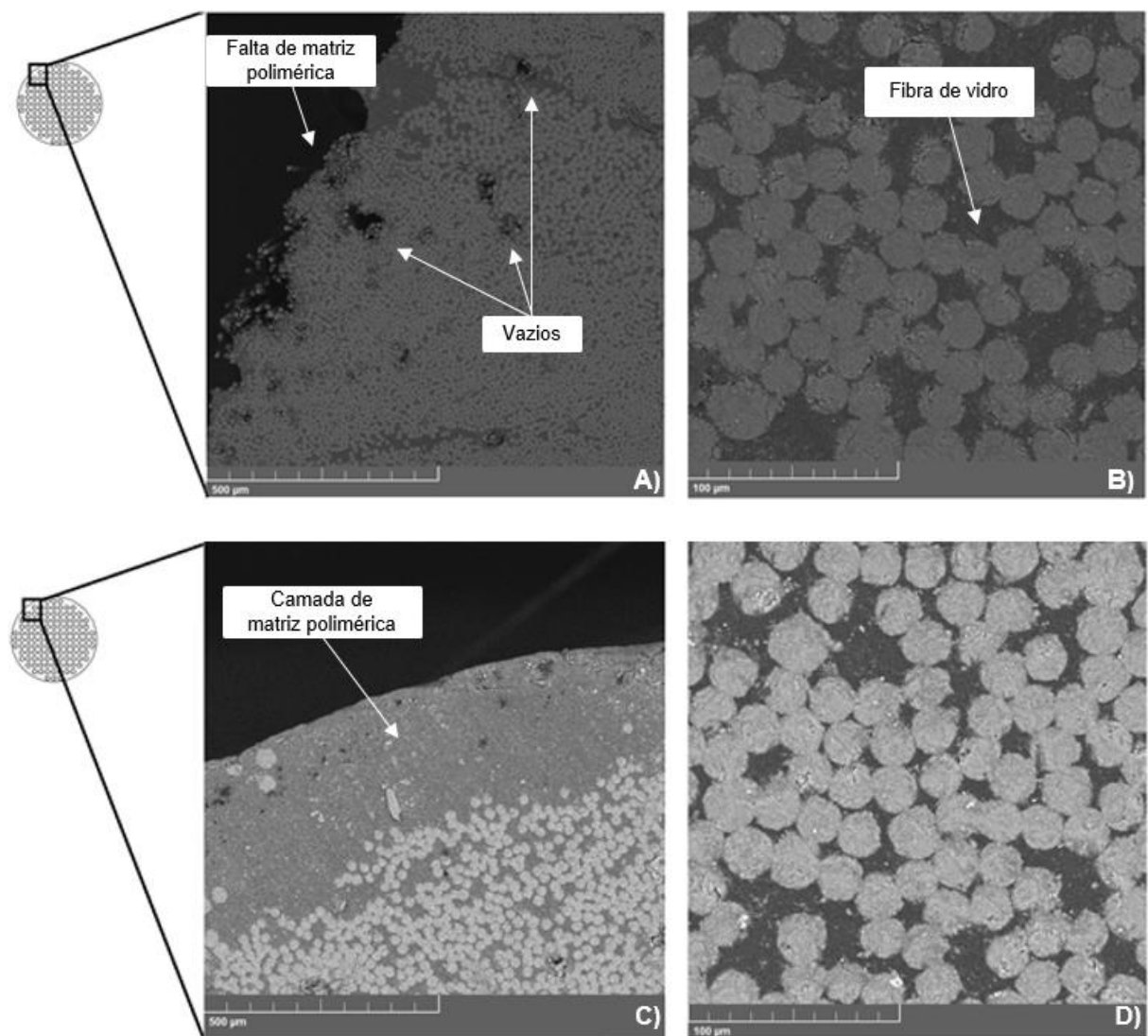
##### a) Degradação química do vergalhão de GFRP

As micrografias da seção transversal dos vergalhões de GFRP (Figuras 40, 41 e 42) foram usadas para avaliar as possíveis modificações da morfologia após o envelhecimento. Na Figura 40 é possível observar que antes do envelhecimento não havia uma uniformidade na espessura da camada de resina ao redor das fibras de vidro.

Para o vergalhão de GFRP com matriz éster vinílica foi observada uma variação na espessura da cobertura de resina variou entre 75 e 87 µm, enquanto para o vergalhão de GFRP com matriz poliéster, essa variação ficou na faixa entre 9 e 79 µm. A redução da espessura representa perda de proteção da fibra de vidro e pode estar associada a falhas na produção do vergalhão de GFRP ou à retração da resina durante o ciclo de cura na reação de polimerização (PANSART, 2013). Além da variação da camada de resina ao redor das fibras de vidro, foi possível observar a presença de pequenos defeitos (Figuras 40A e 40B) nos vergalhões de GFRP com matriz poliéster. De fato, a determinação da quantidade de vazios do vergalhão, de acordo com a Norma ASTM D2734 (ASTM, 2016), indicou um teor de vazios de 4,3% para os

vergalhões de GFRP com matriz de poliéster. Vazios desconectados também foram observados por Gooranorimi *et al.* (2017) em toda a seção transversal de vergalhões de GFRP. A micrografia do vergalhão de GFRP não envelhecido com a matriz de éster vinílico não indicou nenhum defeito perceptível (Figuras 40C e 40D).

Figura 40. Micrografias da seção transversal dos vergalhões de GFRP com matriz (A, B) poliéster; e (C, D) éster vinílico, antes da imersão em solução alcalina, obtidas por MEV.



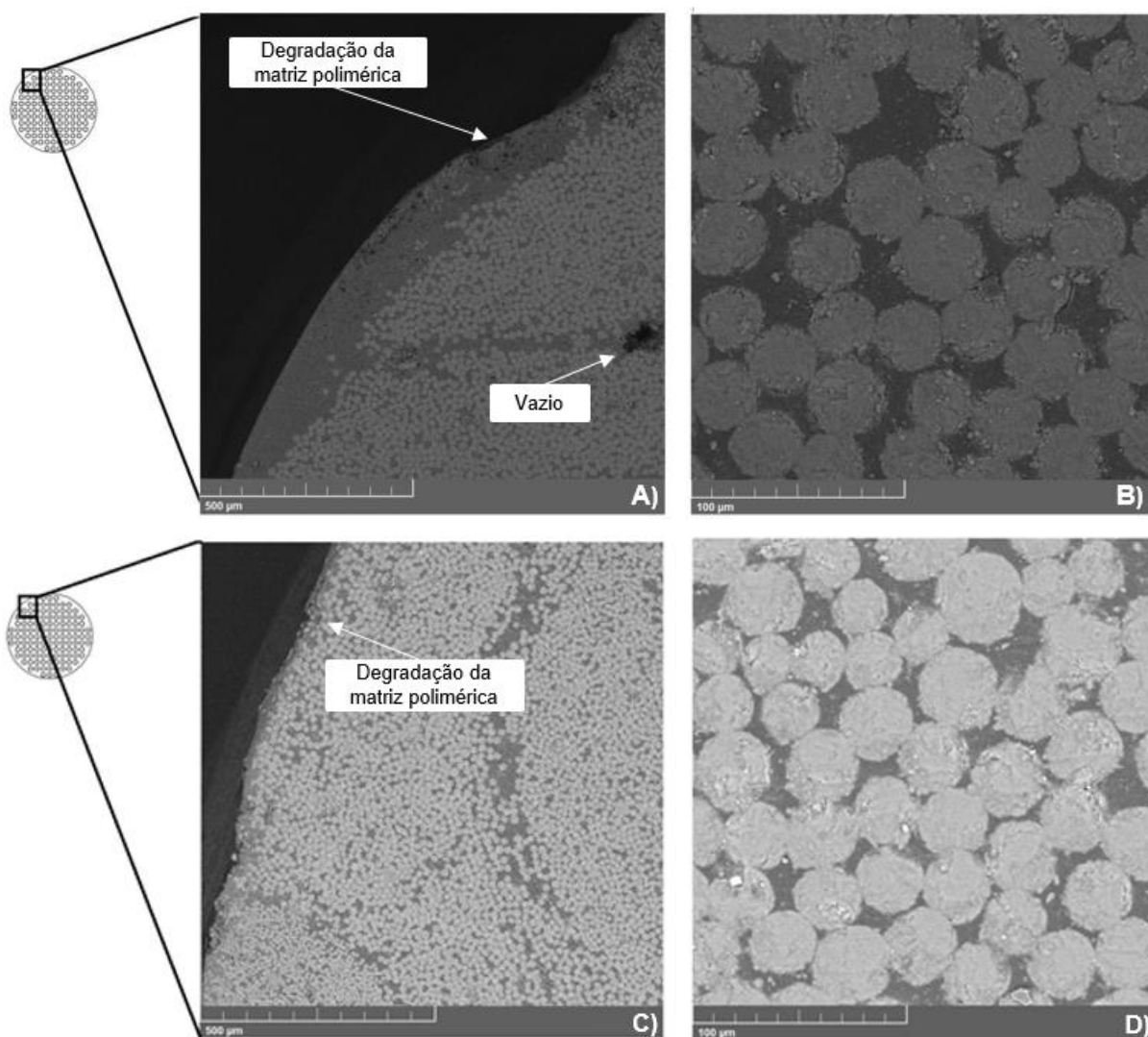
Fonte: O autor.

O efeito do envelhecimento hidrotérmico na microestrutura dos vergalhões de GFRP é mostrado nas Figuras 41 e 42 para exposição a 23°C e 60°C, respectivamente. Para o envelhecimento a 23°C, verificou-se a presença de mais vazios e microfissuras na resina de poliéster enquanto a matriz éster vinílico não apresentou

degradação perceptível. O envelhecimento dos vergalhões de GFRP em solução a 60°C, por outro lado, resultou em maior deterioração em ambas as resinas, com formação de vazios na camada superficial e da resina localizada no interior do vergalhão. Consequentemente, um descolamento é verificado entre a fibra e a matriz.

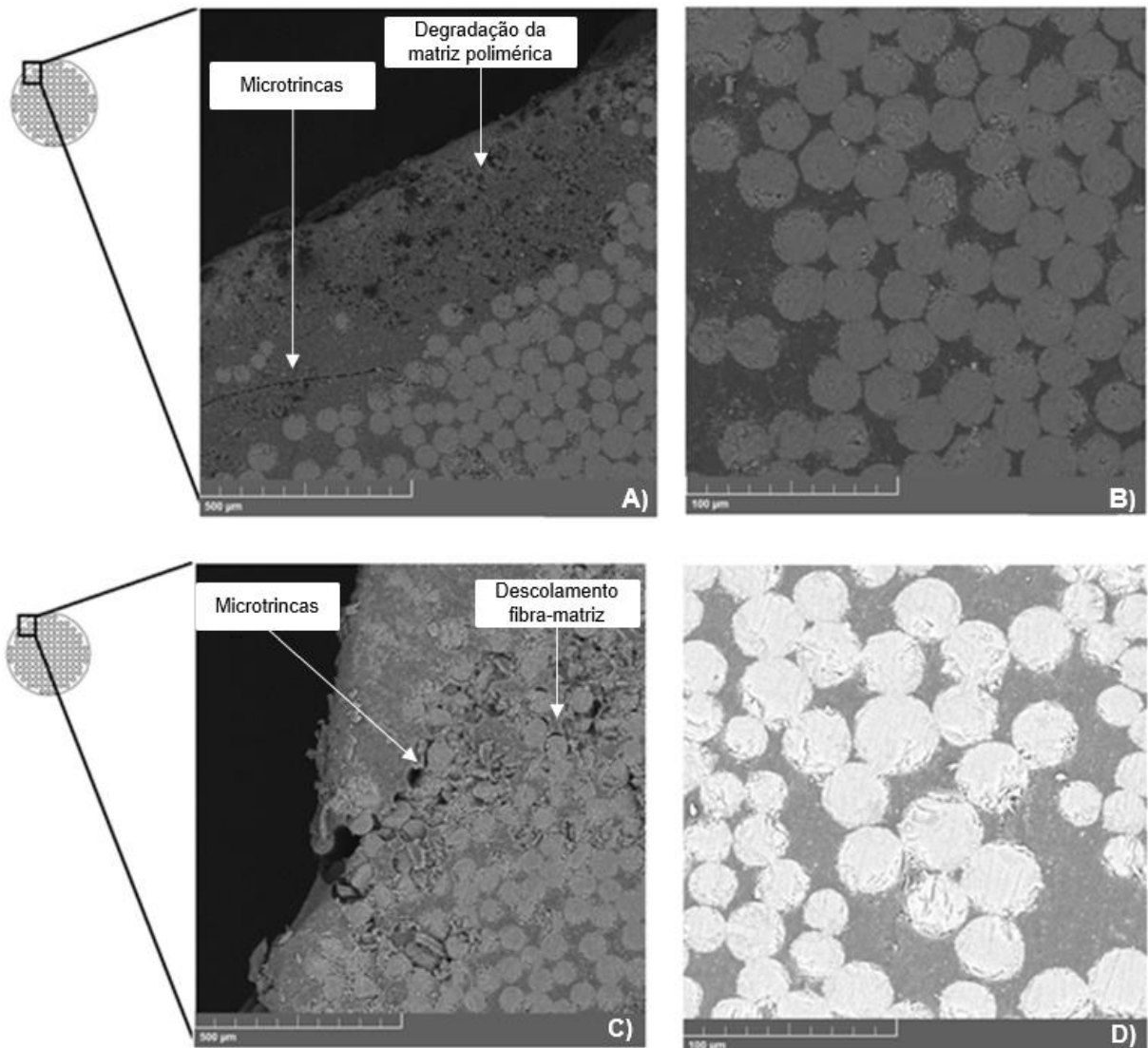
A deterioração das resinas é causada pelo ataque alcalino: os íons hidroxila livres ( $OH^-$ ) reagem quimicamente com o grupo éster (a ligação mais fraca nas matrizes éster vinílica e poliéster), causando hidrólise na matriz polimérica com a formação de álcool e sal de ácido carboxílico, de acordo com a Equação 7 (ZHU *et al.*, 2011; CHEN *et al.*, 2007).

Figura 41. Micrografias da seção transversal dos vergalhões de GFRP com matriz (A, B) poliéster e (C, D) éster vinílica, imersas em solução alcalina a 23°C durante 1000 horas, obtidas por MEV.



Fonte: O autor.

Figura 42. Micrografias da seção transversal dos vergalhões de GFRP com matriz (A, B) poliéster e (C, D) éster vinílico, imersas em solução alcalina a 60°C durante 1000 h, por MEV.

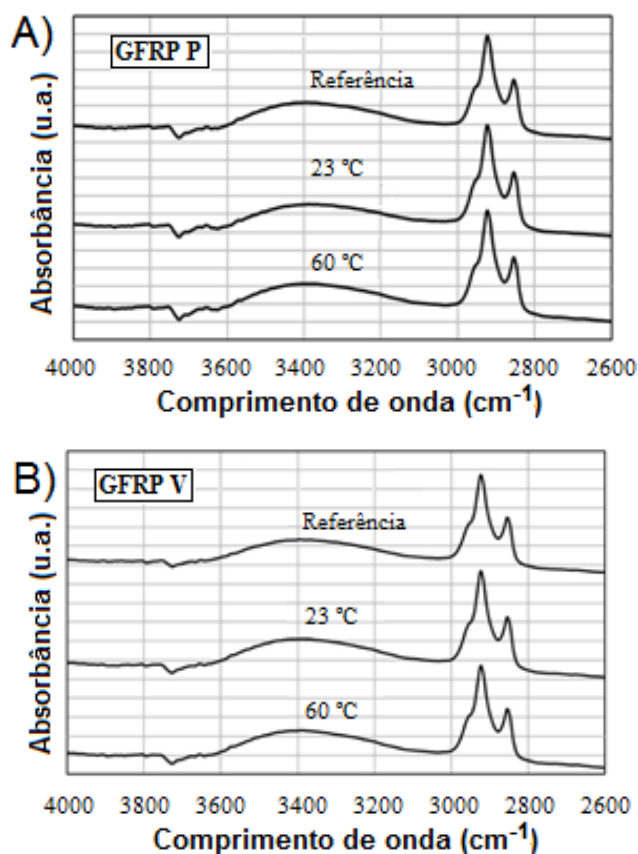


Fonte: O autor.

A intensidade da reação de hidrólise é dependente da temperatura, tempo, alcalinidade e tipo de matriz polimérica. Os espectros de FTIR de vergalhões de GFRP, apresentados na Figura 43, foram usados para identificar quaisquer modificações químicas após o envelhecimento. Duas regiões do espectro infravermelho foram estudadas: a banda *CH* ( $2800-3030\text{ cm}^{-1}$ ), associada ao grupo carbono-hidrogênio, e a banda *OH* ( $3050-3600\text{ cm}^{-1}$ ), que corresponde ao modo de alongamento dos grupos hidroxila.



Figura 43. Espectros de FTIR dos vergalhões de GFRP com matriz: (A) Poliéster (P), (B) Éster vinílico (V).



Fonte: O autor.

A hidrólise leva a uma variação na banda do infravermelho  $OH$ , mas não afeta o conteúdo de  $CH$ . Portanto, a razão  $OH/CH$  pode ser usada para indicar a quantidade relativa de hidroxila na amostra. A Tabela 17 apresenta os resultados para a razão  $OH/CH$ . Os vergalhões de GFRP com resina de poliéster apresentaram redução de até 18% na relação  $OH/CH$ , o que indica a ocorrência de degradação química do polímero quando exposto à solução alcalina. Para os vergalhões com GFRP com resina éster vinílico, a variação máxima na relação  $OH/CH$  foi de 5%, confirmando uma maior resistência química desta resina, também observada por outros autores (PADMAVA-THI e KARBHARI, 2006), o que pode ser explicado pela existência de menos grupos éster do que na resina poliéster, e a existência de grupos metil terminais, que protegem os grupos éster (CHEN *et al.*, 2007; APICELA *et al.*, 1983; CHIN *et al.*, 2001).

Tabela 17. Razão entre as áreas dos picos ( $OH/CH$ ).

Amostra	Envelhecimento		
	Não envelhecida	23 °C	60 °C
GFRP-P	1,05	0,86	0,91
GFRP-V	1,00	1,04	1,05

Fonte: O autor.

O efeito do envelhecimento hidrotérmico nas temperaturas de transição vítrea ( $T_g$ ) das resinas é evidenciado na Tabela 18 e indica uma redução na  $T_g$  em função do aumento da temperatura da solução.

Tabela 18. Temperatura de transição vítrea dos vergalhões de GFRP antes e após o envelhecimento.

Amostra	Envelhecimento		
	Não envelhecida	23 °C	60 °C
GFRP-P	108,2	100,1	96,3
GFRP-V	103,7	97,2	95,4

Fonte: O autor.

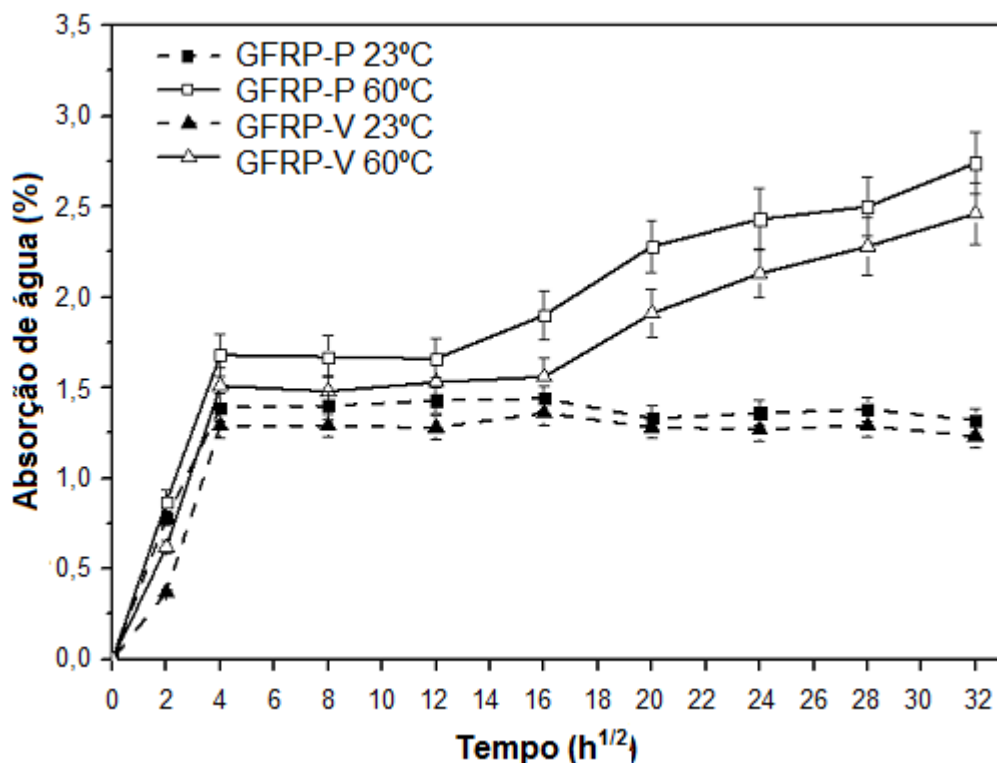
A resina de poliéster apresentou redução de 8,1 °C e 11,9 °C da  $T_g$  para uma temperatura de solução de 23 °C e 60 °C, respectivamente. Já a resina éster vinílica apresentou reduções de 6,5 °C e 8,3 °C respectivamente. Essa redução da  $T_g$  devido ao ataque alcalino e aumento da temperatura, também foi observada por outros pesquisadores (BENMOKRANE *et al.*, 2017; MONTAIGU *et al.*, 2013) e tem sido usada como um indicador de deterioração da resina polimérica exposta a ambientes agressivos ao longo do tempo (SAWPAN, 2019), uma vez que está associada a alterações químicas irreversíveis.

#### b) Cinética de difusão nos vergalhões de GFRP

A Figura 44 mostra as curvas de absorção de água para vergalhões de GFRP com matrizes poliéster e éster vinílica, após imersão em soluções alcalinas a 23 °C e 60 °C. Observou-se um período inicial de difusão linear nas primeiras 16 horas, independentemente do tipo de resina ou da temperatura da solução. As curvas apresentaram o formato de uma curva de difusão típica de Fick, com uma concentração de

saturação ( $M_m$ ). Após esse tempo, as curvas de difusão exibiram comportamentos distintos.

Figura 44. Absorção de água média dos vergalhões de GFRP com matrizes poliéster (P) e éster vinílico (V), imersas em solução alcalina a 23°C e 60°C.



Fonte: O autor.

O vergalhão de GFRP com resina poliéster, imerso na solução a 23°C, apresentou ganho gradativa de peso com o tempo. Esse comportamento pode ser atribuído à hidrólise de grupos ésteres e à consequente lixiviação de componentes de baixa massa molecular e solúveis em água da resina para a solução alcalina (CHIN *et al.*, 1999). Este processo de lixiviação, também verificado por Arias *et al.* (2018), pode ser confirmado pelos vazios observados na resina (ver Figura 42) após o processo de envelhecimento. Este fenômeno não foi observado no vergalhão de GFRP com resina éster vinílico.

Quando imersos em solução a 60°C, os vergalhões de GFRP não se comportaram conforme as previsões clássicas e continuam a ganhar peso após um período de estabilização, conforme já relatado por Upadhyay e Misra (1990). As curvas de absorção, então, exibem um comportamento de sorção de dois estágios não Fickianos, em

que a absorção inicial é rápida e uma função linear da raiz quadrada do tempo. Micelli *et al.* (2004) observaram comportamento semelhante para vergalhões de GFRP com resinas epóxi e éster vinílica reforçadas com fibras de carbono, com aumento da absorção de fluidos após imersão a 60°C. Segundo os autores, isso destaca o importante papel da temperatura na cinética de absorção das resinas poliméricas.

Won *et al.* (2012) consideraram que esse aumento na absorção de água se deve à penetração da água nas fissuras desenvolvidas na resina degradada. As micrografias apresentadas na Figura 42 indicam que a exposição das resinas à temperatura de 60°C causou danos e fissuras que permitem a migração de fluidos para o interior do vergalhão, aumentando sua capacidade de absorção de água. Assim, após um período de estabilização inicial da absorção de água dos vergalhões de GFRP, esta aumenta novamente para ambas as resinas, mas em períodos diferentes. Os vergalhões de GFRP com resina poliéster e éster vinílica expostos à solução alcalina a 60°C mostraram uma taxa diferente de aumento linear na absorção de água após 144 h e 256 h. O comportamento não Fickiano de absorção de água também pode estar associado ao transporte capilar gradual de moléculas de água para as interfaces fibra-matriz durante o período de condicionamento (PADMAVATHI e KARBHARI, 2006; SAWPAN *et al.*, 2014). Isso indica que o fluido penetrou no compósito, causando danos potenciais às fibras, por conter íons quimicamente agressivos a estas, em fenômeno também observado por Micelli *et al.* (2004).

Os valores obtidos experimentalmente para a concentração de saturação ( $M_m$ ) e os coeficientes de difusão da solução ( $D$ ), calculados com auxílio Equação 6, são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19. Concentrações de saturação médias ( $M_m$ ) e os coeficientes de difusão ( $D$ ) dos vergalhões de GFRP com matrizes poliéster e éster vinílica, imersas em solução alcalina a 23°C e 60°C.

Parâmetro	GFRP-P		GFRP-V	
	T = 23°C	T = 60°C	T = 23°C	T = 60°C
$M_m$ (%)	1,5 ± 0,1	1,7 ± 0,1	1,3 ± 0,1	1,4 ± 0,3
$D$ (10 <sup>-4</sup> mm <sup>2</sup> /min.)	5,9 ± 0,4	5,9 ± 0,2	1,8 ± 0,1	4,4 ± 0,2

Fonte: O autor.

Observa-se que os valores da concentração de saturação e os coeficientes de difusão para os vergalhões de GFRP com matriz éster vinílica são inferiores aos dos vergalhões de GFRP com resina poliéster, independente da temperatura da solução de envelhecimento. Kamal *et al.* (2011) avaliaram compósitos com os mesmos tipos de resinas e observaram que aqueles com resina éster vinílica absorvem menos água que aqueles com matriz poliéster isoftálica.

O aumento da temperatura da solução alcalina aumentou a concentração de saturação em até 5,9% e o aumento nos coeficientes de difusão em até 13,3%. Isso ocorreu, pois, uma temperatura mais elevada resulta em maior movimento cinético das moléculas de água e polímero, facilitando a penetração de água na resina, conforme já verificado por outros autores (LI *et al.*, 2018; CHIN *et al.*, 1997). Além disso, a baixa absorção de água e valores de coeficiente de difusão na resina de éster vinílica foram associados a propriedades menos hidrofílicas desta, devido à menor fração de grupos éster polar (MANALO *et al.*, 2020). O aumento na absorção de água pelos vergalhões GFRP também foi facilitado pela progressão da reação de hidrólise (ver resultados de FTIR).

A infiltração de água na matriz polimérica causa separação de cadeias moleculares e induz a tensões internas, fenômeno conhecido como plastificação (MONTAIGU *et al.*, 2013; WEITSMAN, 2012), que pode gerar microfissuras dentro do vergalhão de GFRP (WON *et al.*, 2012). A comparação entre os valores de  $T_g$ , listados na Tabela 18, e os resultados de absorção de água, listados na Tabela 19, corroboram com esses resultados. A resina de poliéster, que apresentou a maior redução na  $T_g$ , apresentou maior absorção de água e aumento do coeficiente de difusão em função do aumento da temperatura.

### c) Degradação química das fibras de vidro

A composição química das fibras de vidro, antes e após envelhecimento acelerado, é apresentada na Tabela 20. De acordo com a composição química é possível classificá-las como fibra de vidro do tipo E, que apresenta baixa resistência química (COUSIN *et al.*, 2019) e alta sensibilidade ao ambiente alcalino (MICELLI e AIELLO, 2019). Portanto, seu uso não é recomendado para reforço de materiais cimentícios, que apresentam alta alcalinidade.

Nos vergalhões de GFRP, as fibras de vidro são protegidas do meio externo pela camada de resina, mas, com sua degradação, há a possibilidade de a solução alcalina atingir as fibras, causando sua deterioração. De fato, a Tabela 20 mostra que houve uma mudança na composição química da fibra de vidro após o envelhecimento hidrotérmico. Ressalta-se a mudança no teor de sódio, que variou 11% com o aumento da temperatura. Íons alcalinos, como o sódio ( $Na^+$ ), reagem quimicamente na superfície da fibra de vidro, causando mudanças significativas no conteúdo de  $Na_2O$ . Essas reações são potencializadas pela quebra da estrutura  $Si - O - Si$  das fibras de vidro (HELENBRANT *et al.*, 2017; MICELLI *et al.*, 2017), causada por íons hidroxila, de acordo com as reações apresentadas nas Equações 20 a 22. Como resultado da quebra da estrutura  $Si - O - Si$  das fibras de vidro, ocorreu redução de aproximadamente 3% de  $SiO_2$ . Além disso, a cinética dessas reações foi alterada com o aumento da temperatura de 23°C para 60°C, resultando em maior teor de  $Na_2O$ .



Tabela 20. Composição química das fibras de vidro (% em massa) das amostras dos vergalhões de GFRP, com matriz poliéster (P) e éster vinílico (V), determinada por FRX, na forma de óxidos.

Amostras	Temp. (°C)	Óxidos (%)									
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Outros	P.F.*
GFRP-P	Con-trole	53,76 ± 0,43	12,92 ± 0,18	28,17 ± 0,63	4,17 ± 0,06	0,10 ± 0,01	---	0,39 ± 0,04	0,32 ± 0,03	0,17 ± 0,02	0,11 ± 0,01
	23,0	52,61 ± 0,22	12,73 ± 0,14	28,47 ± 0,82	4,27 ± 0,15	0,10 ± 0,01	0,95 ± 0,11	0,40 ± 0,05	0,33 ± 0,04	0,15 ± 0,01	0,12 ± 0,01
	60,0	52,19 ± 0,42	13,09 ± 0,59	28,35 ± 0,42	4,23 ± 0,06	0,11 ± 0,01	1,10 ± 0,10	0,44 ± 0,05	0,33 ± 0,09	0,16 ± 0,01	0,12 ± 0,03
GFRP-V	Con-trole	52,93 ± 0,37	12,76 ± 0,12	28,95 ± 0,40	4,25 ± 0,07	0,12 ± 0,01	---	0,45 ± 0,04	0,36 ± 0,02	0,20 ± 0,01	0,14 ± 0,03
	23,0	52,86 ± 0,07	12,89 ± 0,12	28,16 ± 0,53	4,33 ± 0,15	0,10 ± 0,02	1,05 ± 0,12	0,39 ± 0,02	0,35 ± 0,02	0,16 ± 0,02	0,12 ± 0,02
	60,0	52,09 ± 0,33	12,68 ± 0,10	28,85 ± 0,92	4,23 ± 0,25	0,11 ± 0,01	1,13 ± 0,15	0,39 ± 0,05	0,33 ± 0,01	0,18 ± 0,05	0,10 ± 0,04

\* Perda ao Fogo

Fonte: O autor.

#### d) Degradação mecânica do vergalhão de GFRP

A Tabela 21 apresenta os resultados experimentais médios obtidos nos ensaios de tração e módulo de elasticidade dos vergalhões de GFRP não envelhecidos (Controle) e testados após envelhecimento acelerado em solução alcalina a 23°C e 60°C.

A resistência à tração dos vergalhões de GFRP não envelhecidos foram compreendidos na faixa entre 862,0 e 881,0 MPa. Esses valores são superiores aos encontrados por Robert e Benmokrane (2013) para vergalhões de GFRP com resina éster vinílica (786,0 MPa), e aos valores típicos de resistência à tração indicados pela Norma ACI 440-1R (2015) para vergalhões de GFRP (690,0 MPa).

Tabela 21. Resistência à tração e módulo de elasticidade dos vergalhões de GFRP, com matriz poliéster (GFRP-P) e éster vinílica (GFRP-V), submetidas ao ataque químico.

<b>Amostra</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>
GFRP-P	Controle	881,7± 19,8	51,3 ± 0,5
	23,0	831,5± 19,1	50,8 ± 0,6
	60,0	825,0± 18,5	50,7 ± 1,0
GFRP-V	Controle	862,8± 15,4	51,8 ± 0,5
	23,0	829,9± 23,7	51,1 ± 0,4
	60,0	815,5± 34,8	50,6 ± 1,4

Fonte: O autor.

Conforme esperado, houve uma redução na resistência à tração e no módulo de elasticidade dos vergalhões de GFRP envelhecidos. A redução da resistência à tração foi de 5,7% e 3,8% para os vergalhões de GFRP com matriz de poliéster e éster vinílica, respectivamente, após serem expostos à solução alcalina a uma temperatura de 23°C.

A exposição dos vergalhões de GFRP à solução a uma temperatura de 60°C gerou um ataque alcalino mais intenso e as reduções de resistência foram de 6,4% e 5,5% para os vergalhões de GFRP com matriz de poliéster e éster vinílica, respectivamente. A tendência de diminuição nas propriedades mecânicas dos vergalhões de GFRP após o ataque alcalino corrobora os resultados obtidos por vários autores (JIA *et al.*, 2020; FERGANI *et al.*, 2018; SAWPAN, 2016). Apesar da redução da resistência à tração, a variação nos valores do módulo de elasticidade dos vergalhões de GFRP



não foi significativa, com redução máxima de 2,3% para os vergalhões com matriz éster vinílica, após serem expostos a um ambiente alcalino a 60°C.

A redução da resistência à tração observada nos vergalhões submetidos ao envelhecimento hidrotérmico é compatível com os danos observados na microestrutura da resina, que também aumentaram a absorção de água pelo vergalhão. Os vergalhões de GFRP com matriz poliéster, que apresentaram maior dano microestrutural, também apresentaram maior perda de resistência à tração. O melhor desempenho dos vergalhões de GFRP com matriz éster vinílica, após imersão em solução alcalina, está associado à maior estabilidade química desta resina, que apresentou menor hidrólise e, conseqüentemente, menor absorção de água, o que resultou em menores danos.

Danos à fibra de vidro também contribuíram para a redução do desempenho mecânico dos vergalhões de GFRP. A fibra é o principal elemento responsável pela resistência mecânica do vergalhão de GFRP por apresentar maior volume que a matriz e por ter uma resistência à tração superior à da resina polimérica (PORTNOV *et al.*, 2013; COUSIN *et al.*, 2019). Assim, a análise da redução da resistência à tração observada nos vergalhões de GFRP, quando submetidos ao ambiente alcalino, indica que as fibras de vidro são danificadas pela solução.

Os danos identificados na fibra de vidro com a modificação de sua composição química também contribuíram para a redução do desempenho mecânico. Como a fibra é o componente do vergalhão de GFRP presente em maior quantidade e com maior resistência à tração, pequenos danos podem resultar em mudanças importantes no comportamento mecânico e precisam ser quantificados.

#### f) Avaliação dos danos mecânicos dos vergalhões de GFRP

A resistência à tração dos vergalhões de GFRP depende da integridade da matriz, da quantidade e integridade das fibras de vidro e da interação fibra-matriz (WANG *et al.*, 2017). Porém, de forma simplificada, a resistência à tração do compósito pode ser determinada pela contribuição de cada fase, matriz e fibra individualmente, podendo ser expressa pela regra das misturas, conforme a Equação 23.

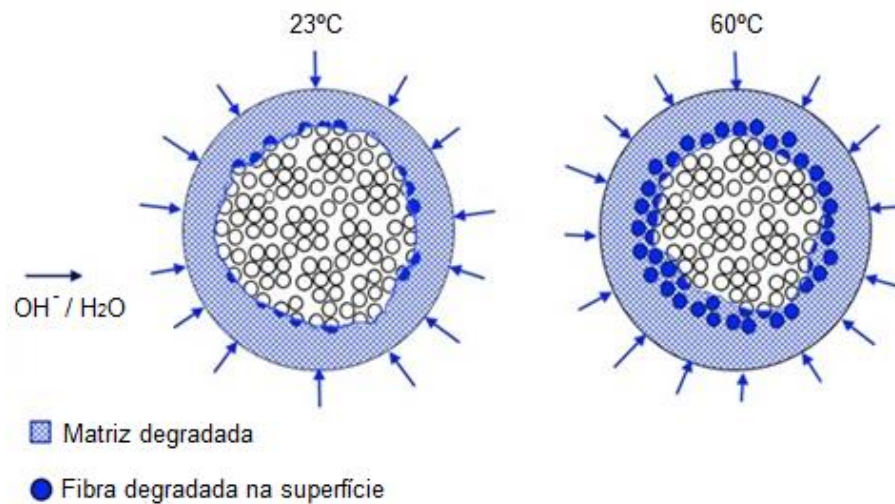
$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m$$

Equação 23

Em que  $\sigma_c$ ,  $\sigma_f$  e  $\sigma_m$  representam a resistência à tração do compósito, fibra e matriz, respectivamente.  $V_f$  e  $V_m$  indicam os teores de fibra e matriz em volume, respectivamente, no vergalhão de GFRP.

Assim, a perda total da resistência à tração devido ao ataque alcalino é proporcional à extensão do dano mecânico em cada fase que teve contato com os agentes agressivos. O mecanismo de degradação da resina foi intensificado com o aumento da temperatura para 60°C, o que proporcionou a penetração intermolecular dos íons hidroxila na resina e, posteriormente, nas fibras de vidro, conforme mostrado no modelo simplificado da Figura 45.

Figura 45. Modelo de degradação do vergalhão de GFRP degradado em ambiente alcalino.



Fonte: O autor.

A resistência à tração residual do vergalhão  $\bar{\sigma}_c$  pode, então, ser estimada por meio da Equação 24, com  $\bar{\sigma}_f$  e  $\bar{\sigma}_m$  representando as resistências residuais da fibra e da matriz após o envelhecimento, respectivamente.

$$\bar{\sigma}_c = \bar{\sigma}_f V_f + \bar{\sigma}_m V_m \quad \text{Equação 24}$$

Considerando um dano isotrópico, as resistências residuais da matriz e fibra podem ser estimadas pelas Equações 25 e 26, respectivamente, onde  $D_f$  e  $D_m$  representa o dano à fibra e à matriz, respectivamente, devido ao ataque alcalino.

$$\bar{\sigma}_f = \sigma_f (1 - D_f) \quad \text{Equação 25}$$

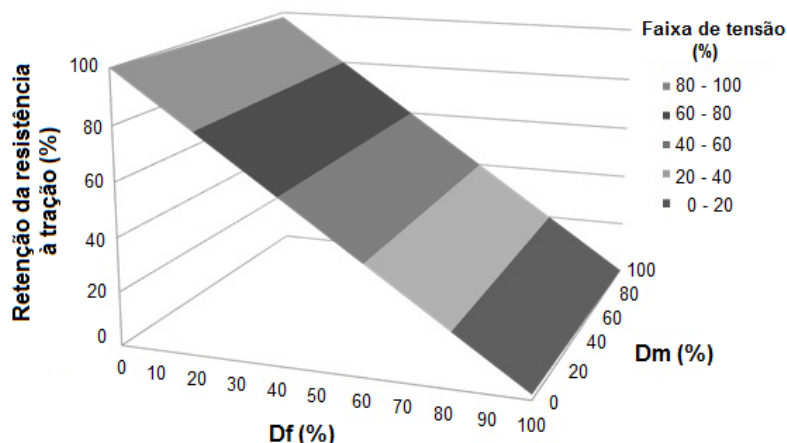
$$\bar{\sigma}_m = \sigma_m(1 - D_m) \quad \text{Equação 26}$$

Assim, a Equação 24 pode ser modificada, combinando-a com as Equações 25 e 26, a fim de se obter a Equação 27.

$$\bar{\sigma}_c = \sigma_f(1 - D_f)V_f + \sigma_m(1 - D_m)V_m \quad \text{Equação 27}$$

A Figura 46 mostra o estudo paramétrico da Equação 27, para os vergalhões de GFRP com um volume de fibra de aproximadamente 60%, com valores de  $D_f$  (dano à fibra) e  $D_m$  (dano à matriz) variando de 0 a 100%. Na simulação numérica foi adotada uma resistência à tração de 1420,0 MPa para a fibra de vidro, 60,0 MPa para a resina éster vinílica e 98,0 MPa para a resina poliéster (FIB Bulletin 40, 2007).

Figura 46. Resistência residual em função do dano à matriz e fibra de vidro, para o vergalhão de GFRP com fração volumétrica da fibra de vidro de 60 %.



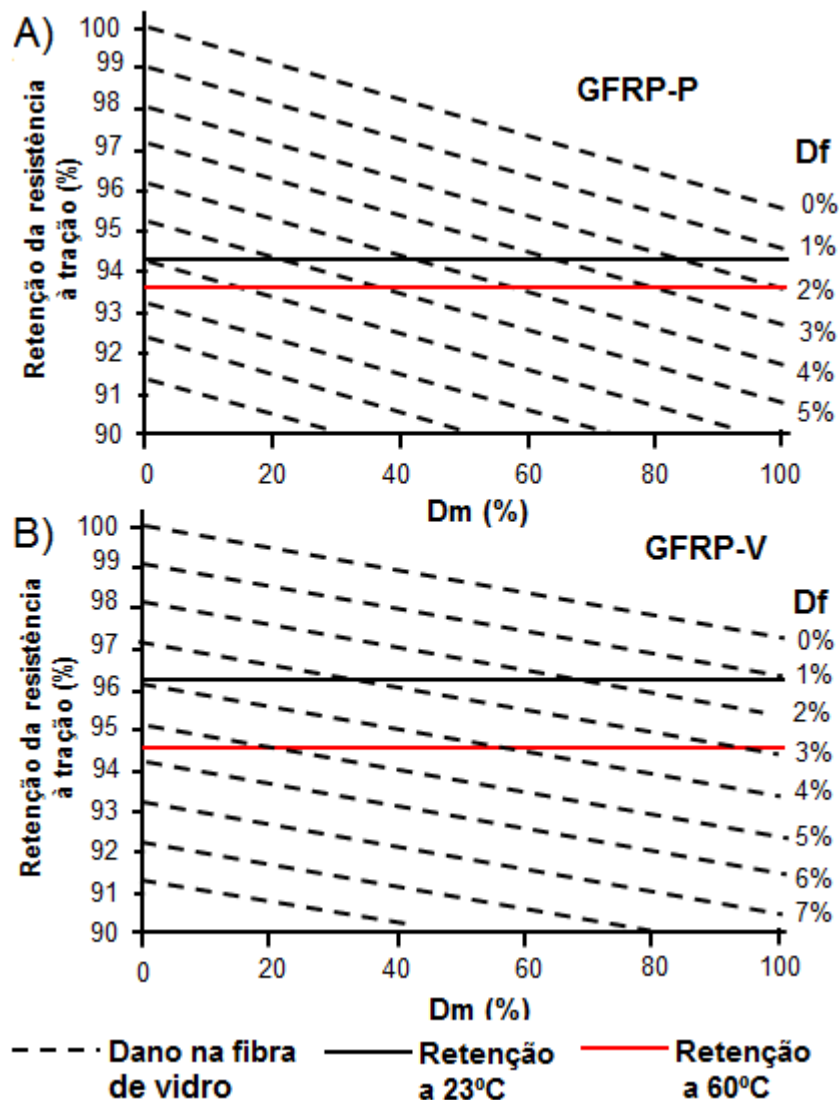
Fonte: O autor.

Verificou-se que a resistência à tração do vergalhão de GFRP é muito mais sensível ao dano da fibra de vidro que ao dano da matriz. É possível estimar que, para um dano de 100% na matriz, a redução da resistência do vergalhão de GFRP com matriz poliéster é de apenas 4,5% e a redução do vergalhão GFRP com matriz éster vinílica é de 2,8%. Esses valores de redução de resistência são inferiores aos valores observados experimentalmente, conforme pode ser visto na Figura 46, o que indica que, além do dano à matriz, o envelhecimento acelerado resultou em danos mecânicos às fibras de vidro. Esse resultado corrobora a observação experimental sobre a

modificação das fibras de vidro por ataque alcalino, o que já foi confirmado pela modificação da composição química da fibra (Tabela 20).

Os resultados mostrados na Figura 47, obtidos por meio da Equação 27, permitem estimar o dano em cada componente dos vergalhões de GFRP devido ao ataque alcalino. Comparando os valores de redução da resistência à tração dos vergalhões submetidos ao ataque alcalino a 23°C e 60°C é possível verificar que as fibras de vidro sofreram danos mecânicos que variaram de 1% a 4%, para vergalhões de GFRP com matriz éster vinílica e 1% a 6% para vergalhões de GFRP com matriz poliéster.

Figura 47. Efeito do dano na matriz ( $D_m$ ) e do dano na fibra ( $D_f$ ) na resistência residual dos vergalhões de GFRP (linhas tracejadas representam os resultados da modelagem): (A) GFRP-P e (B) GFRP-V.



Fonte: O autor.

As intersecções entre as linhas tracejadas (que representam o percentual de dano na fibra) e as linhas sólidas horizontais pretas e vermelhas (que representam a retenção da resistência dos vergalhões GFRP), indicam as possíveis combinações de danos à matriz e à fibra, devido ao envelhecimento em ambiente alcalino. Por exemplo, para um vergalhão de GFRP com uma matriz de poliéster submetida a 23°C, a perda de resistência à tração pode resultar da ocorrência de 2% de danos na fibra e 85% de danos na matriz.

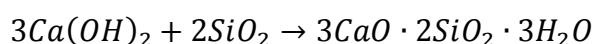
### 4.3.2 Envelhecimento do concreto armado

#### a) Resistência ao cisalhamento interlaminar

A Tabela 22 apresenta os resultados experimentais obtidos nos ensaios de cisalhamento interlaminar (S) dos vergalhões de GFRP com matrizes poliéster, éster vinílica e epóxi, inseridos em corpos de prova de concreto armado expostos às temperaturas de 23°C, 40°C e 60°C, pelos períodos de 500 h, 1000 h e 3000 h.

Conforme esperado, houve uma redução na resistência ao cisalhamento interlaminar dos vergalhões de GFRP após envelhecimento. Observa-se, ainda, que o tipo de matriz dos vergalhões de GFRP tem influência significativa em sua perda de resistência.

Nas amostras de concreto armado contendo vergalhões de GFRP e submetidas a 23°C, observou-se uma redução na resistência ao cisalhamento interlaminar dos vergalhões em cerca 10,6%, 6,1% e 5,8%, para aquelas que continham recobrimento de concretos REF, SA-10 e CAR, respectivamente (Figura 48). Nota-se que a adição de 10% de sílica ativa (SA-10) ao concreto resultou em uma matriz cimentícia menos agressiva aos vergalhões de GFRP e, conseqüentemente, houve uma menor redução da sua resistência ao cisalhamento interlaminar, comparativamente aos vergalhões envelhecidos no concreto REF. A menor agressividade da matriz SA-10 foi consequência da atividade pozolânica da sílica ativa que, ao consumir hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  e formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional (Equação 28), reduz a porosidade e o pH na solução dos poros de concreto, reduzindo a degradação à matriz polimérica dos vergalhões de GFRP.



Equação 28

A redução média da resistência ao cisalhamento interlaminar dos vergalhões de GFRP envelhecidos no concreto carbonatado (CAR) foi de apenas 5,8%, sendo inferior à observada nos corpos de prova contendo concretos REF (10,1%) e bastante similar à observada naqueles contendo concretos SA-10 (6,1%). Assim como a reação pozolânica proveniente da adição de sílica ativa, a carbonatação do concreto reduz o pH da matriz, por meio da reação do  $\text{CO}_2$  com compostos hidratados à base de cálcio (principalmente a portlandita), formando calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). Esta redução, se mostrou benéfica para os vergalhões de GFRP, conforme mostra a Figura 48.

Nas amostras de concreto armado contendo vergalhões de GFRP e submetidas a 40°C, a resistência ao cisalhamento interlaminar foi significativamente afetada nas amostras contendo cobrimento do concreto REF, e ligeiramente reduzida naquelas com concretos SA-10 e CAR, conforme mostrado na Figura 48B. Após envelhecimento durante 3000 h, a resistência ao cisalhamento interlaminar dos vergalhões de GFRP foi reduzida em 12,8%, 8,1% e 8,6%, quando utilizados cobrimentos de concretos REF, SA-10 e CAR, respectivamente. A maior perda de resistência em função do aumento da temperatura ocorre devido à maior facilidade de reação entre a resina polimérica e os íons alcalinos e moléculas de água. Apesar de apresentarem uma perda mais significativa de resistência que os vergalhões inseridos em concretos submetidos a 23°C, observou-se comportamento semelhante em função dos tipos de concreto.

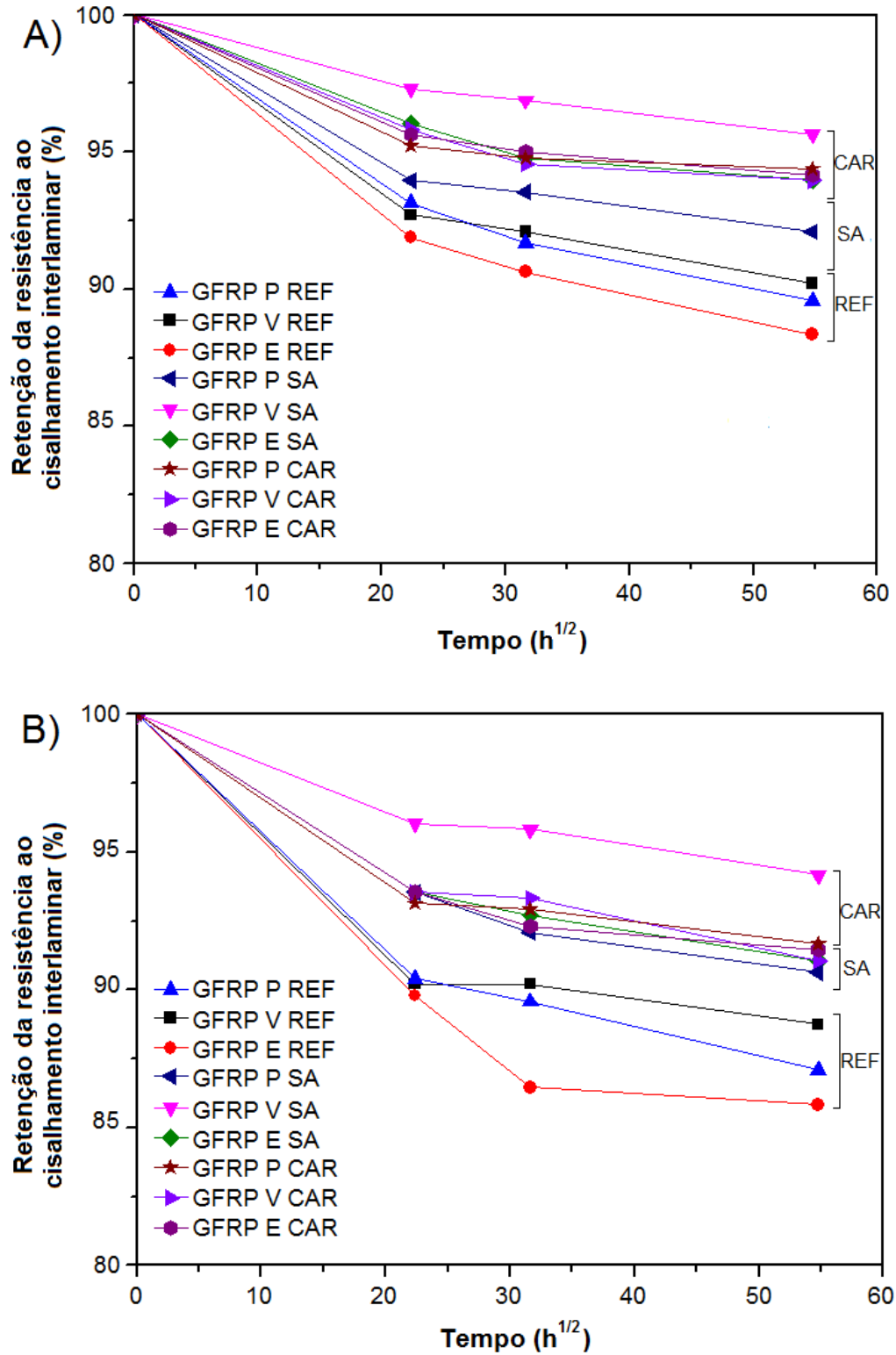
A Figura 48C mostra que amostras de vergalhões de GFRP envelhecidas no concreto e submetidas a 60°C durante 3000 h apresentaram reduções médias da resistência ao cisalhamento interlaminar iguais a 15,3%, 11,3% e 10,7%, quando utilizados cobrimentos de concreto REF, SA-10 e CAR, respectivamente, mantendo o comportamento relativo observado nas amostras expostas a 23°C e 40°C. Assim, observa-se que a elevação da temperatura acelera o processo de degradação dos vergalhões de GFRP inseridos no concreto, independentemente do tipo de concreto de cobrimento e que concretos contendo adição pozolânica e/ou carbonatados são menos agressivos aos vergalhões de GFRP.

Tabela 22. Resistência ao cisalhamento interlaminar média dos vergalhões de GFRP com matrizes poliéster, éster vinílico e epóxi, inseridas em corpos de prova de concreto nas temperaturas de 23°C, 40°C e 60°C nos períodos de 500 h, 1000 h e 3000 h.

Temp. (°C)	Tipo de concreto	Resistência ao cisalhamento interlaminar (MPa)								
		GFRP-P			GFRP-V			GFRP-E		
		500 h	1000 h	3000 h	500 h	1000 h	3000 h	500 h	1000 h	3000 h
<b>Controle</b>		48,2 ± 1,0			48,2 ± 2,5			50,6 ± 2,2		
<b>23,0</b>	REF	44,7 ± 0,2	44,0 ± 1,7	43,0 ± 0,2	44,5 ± 0,8	44,2 ± 1,7	43,3 ± 1,3	44,1 ± 0,4	43,5 ± 1,1	42,4 ± 1,0
	SA-10	45,1 ± 1,2	44,9 ± 1,3	44,2 ± 1,6	46,7 ± 1,4	46,5 ± 1,5	45,9 ± 2,3	46,1 ± 0,2	45,4 ± 0,3	45,1 ± 0,8
	CAR	45,7 ± 0,7	45,5 ± 0,5	45,3 ± 0,9	46,0 ± 0,2	45,4 ± 1,3	45,1 ± 1,6	45,9 ± 0,2	45,6 ± 1,9	45,2 ± 0,1
<b>40,0</b>	REF	43,4 ± 1,1	43,0 ± 0,9	41,8 ± 0,4	43,5 ± 2,5	43,3 ± 0,1	42,6 ± 0,2	43,1 ± 3,0	41,5 ± 1,7	41,2 ± 0,2
	SA-10	44,9 ± 0,8	44,2 ± 0,8	43,5 ± 1,4	46,1 ± 1,7	46,0 ± 1,9	45,2 ± 0,8	44,9 ± 4,0	44,5 ± 1,7	43,7 ± 2,0
	CAR	44,7 ± 0,4	44,6 ± 2,5	44,0 ± 0,3	44,9 ± 1,8	44,8 ± 0,7	43,7 ± 0,3	44,9 ± 0,8	44,3 ± 0,2	43,9 ± 0,1
<b>60,0</b>	REF	41,7 ± 0,8	41,1 ± 2,4	40,8 ± 0,8	41,8 ± 0,1	41,3 ± 2,4	40,9 ± 0,6	41,4 ± 0,5	41,1 ± 3,0	40,3 ± 1,6
	SA-10	44,6 ± 1,5	43,9 ± 3,5	42,6 ± 0,2	44,3 ± 4,7	43,3 ± 0,9	42,6 ± 0,6	44,3 ± 4,7	43,0 ± 2,5	42,5 ± 1,4
	CAR	44,2 ± 2,2	43,6 ± 4,9	43,2 ± 0,6	44,3 ± 2,9	43,6 ± 3,1	43,3 ± 0,9	43,7 ± 1,1	43,1 ± 3,5	42,1 ± 0,2

Fonte: O autor.

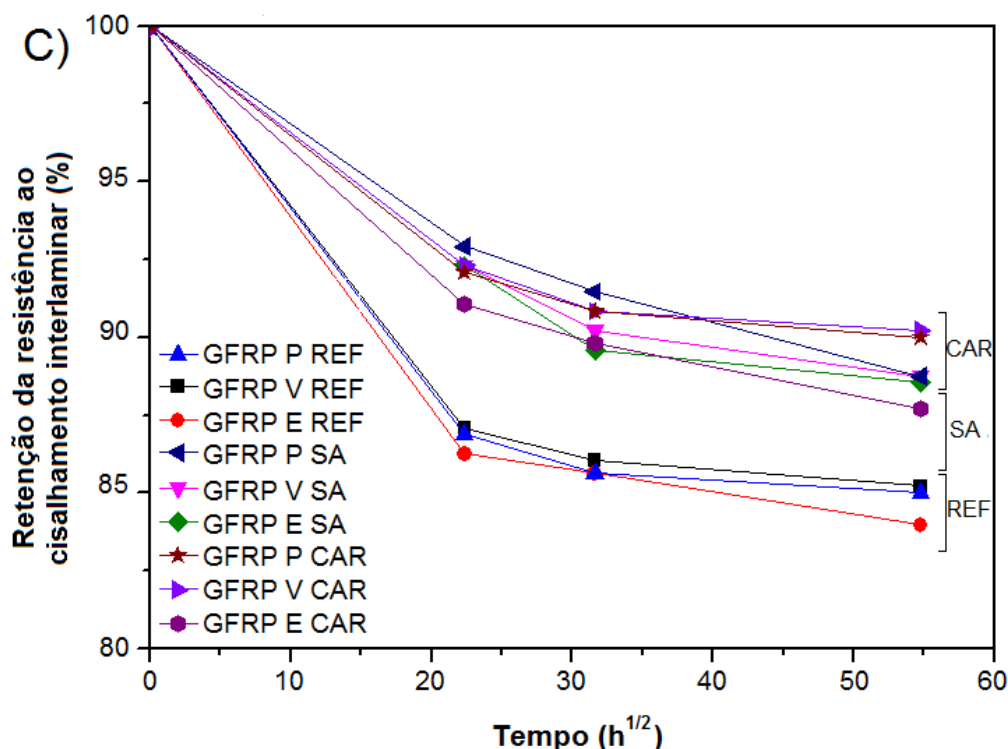
Figura 48. Retenção da resistência ao cisalhamento interlaminar média em função do tempo de imersão no concreto dos vergalhões de GFRP nas temperaturas: (A) 23°C, (B) 40°C e (C) 60°C.



Fonte: O autor.



Figura 48 (continuação). Retenção da resistência ao cisalhamento interlaminar média em função do tempo de imersão no concreto dos vergalhões de GFRP nas temperaturas: (A) 23°C, (B) 40°C e (C) 60°C.



Fonte: O autor.

Os resultados apresentados na Figura 48 indicam que o aumento da temperatura teve um impacto imediato na redução da resistência ao cisalhamento interlaminar, uma vez que esse aumento de temperatura pode afetar a interface fibra-matriz. As moléculas de água e os íons hidroxila, que podem difundir-se na matriz polimérica, provocam mudanças na sua estrutura molecular, tendo um efeito de plastificação e causam reações de hidrólise (nos grupos éster). Este processo de degradação pode ter causado, também, danos às fibras de vidro, como lixiviação de cálcio, o que enfraquece a ligação entre a fibra e a matriz polimérica.

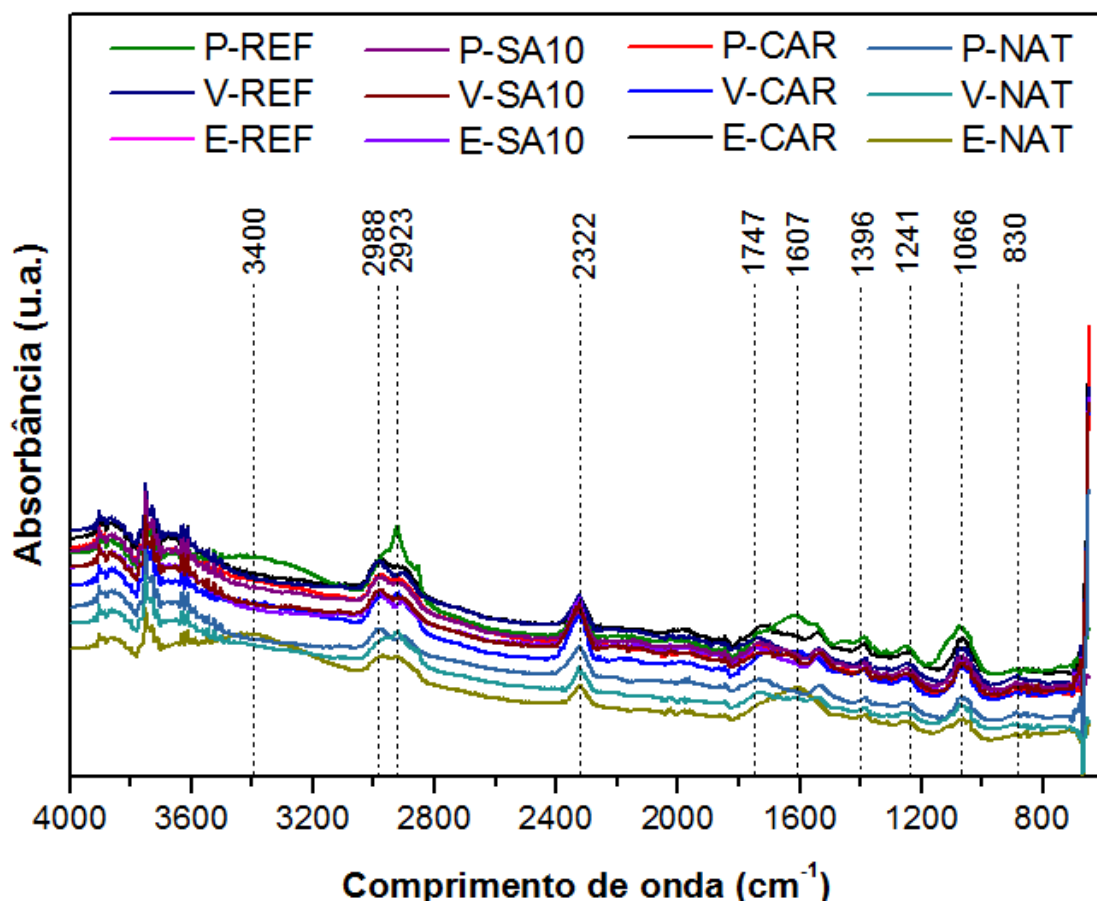
Estes resultados corroboram com os resultados apresentados por YU *et al.* (2021), ou seja, a degradação mais crítica dos vergalhões de GFRP ocorre em ambiente alcalino com maior disponibilidade de íons hidroxila livres. MANALO *et al.* (2020) obtiveram resultados semelhantes, medindo elevados níveis de degradação da resistência ao cisalhamento interlaminar em soluções com maior alcalinidade, com redução de 27% da resistência em vergalhões de GFRP (matriz éster vinílica e fibra de vidro

ECR) imersas em solução alcalina por 112 dias e a 60°C. Enquanto, PAN e YAN (2021) observaram uma redução máxima na resistência ao cisalhamento interlaminar de 57,3% em vergalhões de GFRP (matriz epóxi e fibra de vidro E) imersos em solução alcalina por 140 dias e a 60°C.

## b) Análise FTIR

Na Figura 49 são apresentados os espectros de FTIR para as amostras de vergalhões de GFRP com resina poliéster (P), éster vinílica (V) e epóxi (E) embutidos no concreto, antes (NAT) e após exposição durante 3000 horas a 60°C.

Figura 49. Espectros de FTIR dos vergalhões de GFRP com matrizes: poliéster (P), éster vinílica (V) e epóxi (E), imersos em concreto (REF, SA-10 e CAR), na temperatura de 60°C durante 3000 h.



Fonte: O autor.

Os espectros de IR dos vergalhões de GFRP extraídos do concreto após envelhecimento exibiram um aumento na intensidade dos picos dos principais grupos funcionais presentes nas suas resinas, em comparação aos resultados das amostras analisadas antes da exposição (NAT), apesar de não serem observados novos picos característicos. Isso indica que ocorreram mudanças na estrutura química das matrizes poliméricas nos vergalhões de GFRP.

As principais bandas observadas nos espectros foram: 3500–3400  $\text{cm}^{-1}$  (estiramento O – H), 3100–3000  $\text{cm}^{-1}$  (estiramento do anel benzênico = C – H e grupo vinílico), 3000–2800  $\text{cm}^{-1}$  (estiramento C – H alifático de grupos CH, CH<sub>2</sub> e CH<sub>3</sub>), 1750–1720  $\text{cm}^{-1}$  (estiramento C = O), 1507  $\text{cm}^{-1}$  para o anel de benzeno aromático CH, 1232  $\text{cm}^{-1}$  para o éster C – O, próximo a 1180  $\text{cm}^{-1}$  (estiramento C – CO – C), próximo a 830  $\text{cm}^{-1}$  (deformação do anel do grupo epóxi).

A partir dos espectros obtidos, observa-se uma mudança na banda identificada a 3400  $\text{cm}^{-1}$ , indicando um aumento da concentração de hidroxilas (OH<sup>-</sup>), o que pode ser atribuído a hidrólise de grupos éster, levando a cisão da cadeia e o craqueamento da matriz polimérica, principalmente nos vergalhões de GFRP inseridos nos corpos de prova de concreto REF.

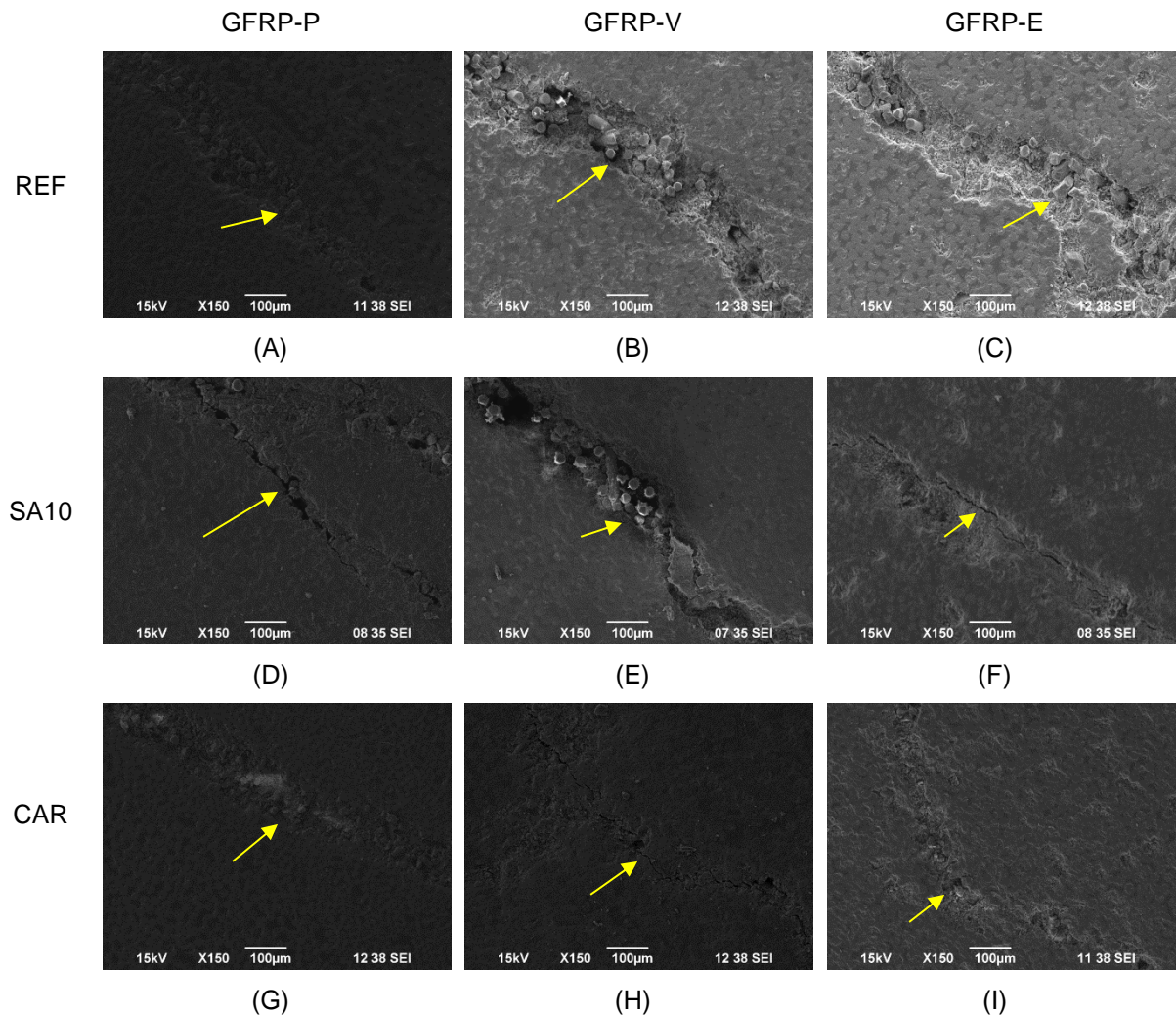
Nos vergalhões de GFRP com resina éster vinílica, após exposição, ocorre uma pequena diferença no formato das bandas na região de 1440-1350  $\text{cm}^{-1}$ , o que pode indicar pequenas modificações na estrutura química das amostras envelhecidas em relação às não expostas. Nos vergalhões, com resina epóxi, foram verificadas diferenças na banda que ocorre em 1062  $\text{cm}^{-1}$ , estando associada à deformação da ligação C – O. Estes resultados são semelhantes aos apresentados por SAWPAN *et al.* (2014) e VEMUGANTI *et al.* (2020).

### c) Análise microestrutural

A Figura 50 mostra as micrografias da superfície de fratura dos vergalhões de GFRP inseridos em corpos de prova de concreto expostos a 60°C durante 3000 h, após o ensaio de cisalhamento interlaminar. Para os vergalhões de GFRP inseridos no concreto de referência (Figura 50 A-C), a ruptura entre a matriz e a fibra de vidro foi o principal tipo de dano observado. Foram encontrados resquícios de matriz polimérica sobre as superfícies de fibra rompida, indicando boa ligação fibra/matriz. As amostras de vergalhões de GFRP inseridas em concreto contendo sílica ativa (SA-10,

Figura 50 D-F), apresentaram falha semelhante. Nas amostras envelhecidas no concreto carbonatado (CAR, Figura 50 G-I), foram observados danos às fibras de vidro e descolamento na interface fibra/matriz.

Figura 50. Micrografias da superfície de fratura em vergalhões de GFRP embutidos em concreto e envelhecidos durante 3000 horas a 60°C, após o ensaio de cisalhamento interlaminar.



Fonte: O autor.

Com a penetração das hidroxilas no vergalhão de GFRP, inicialmente em contato com a matriz polimérica e, posteriormente, com a fibra de vidro, ocorreram mudanças na estrutura química da matriz polimérica que resultaram no enfraquecimento da ligação entre a matriz e a fibra de vidro (ver FTIR), resultando em perda da resistência ao cisalhamento interlaminar (Figura 48). Estes resultados evidenciam a função da matriz polimérica como uma barreira de proteção ao ataque alcalino.

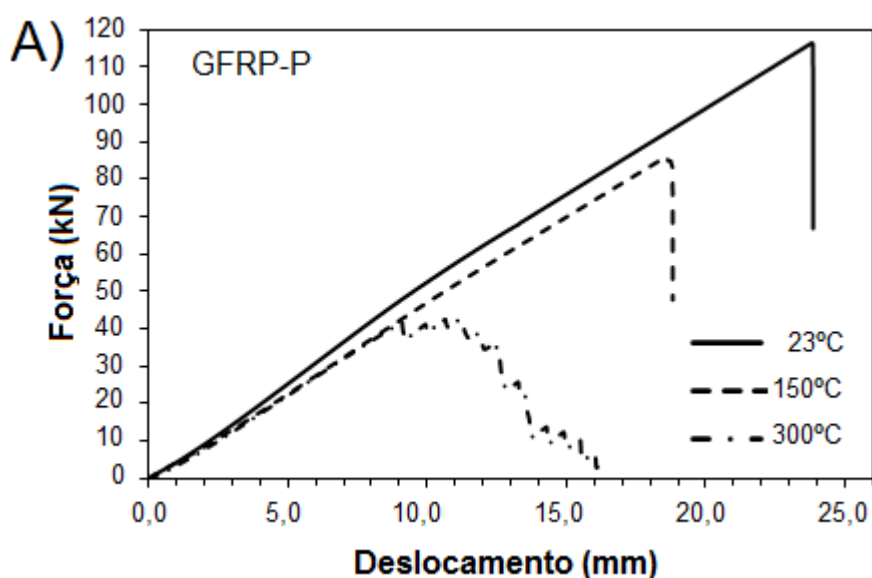
Os resultados apresentados na Figura 50 estão em consonância com os resultados de absorção de água e resistência ao cisalhamento interlaminar, que mostraram que as amostras envelhecidas em concreto de referência (REF) sofreram maior degradação. Estes resultados são semelhantes aos apresentados por Moon *et al.* (2017), Pan e Yan (2021) e Yu *et al.* (2021).

### 4.3.3 Exposição a elevadas temperaturas

#### 4.3.3.1 Vergalhões de GFRP

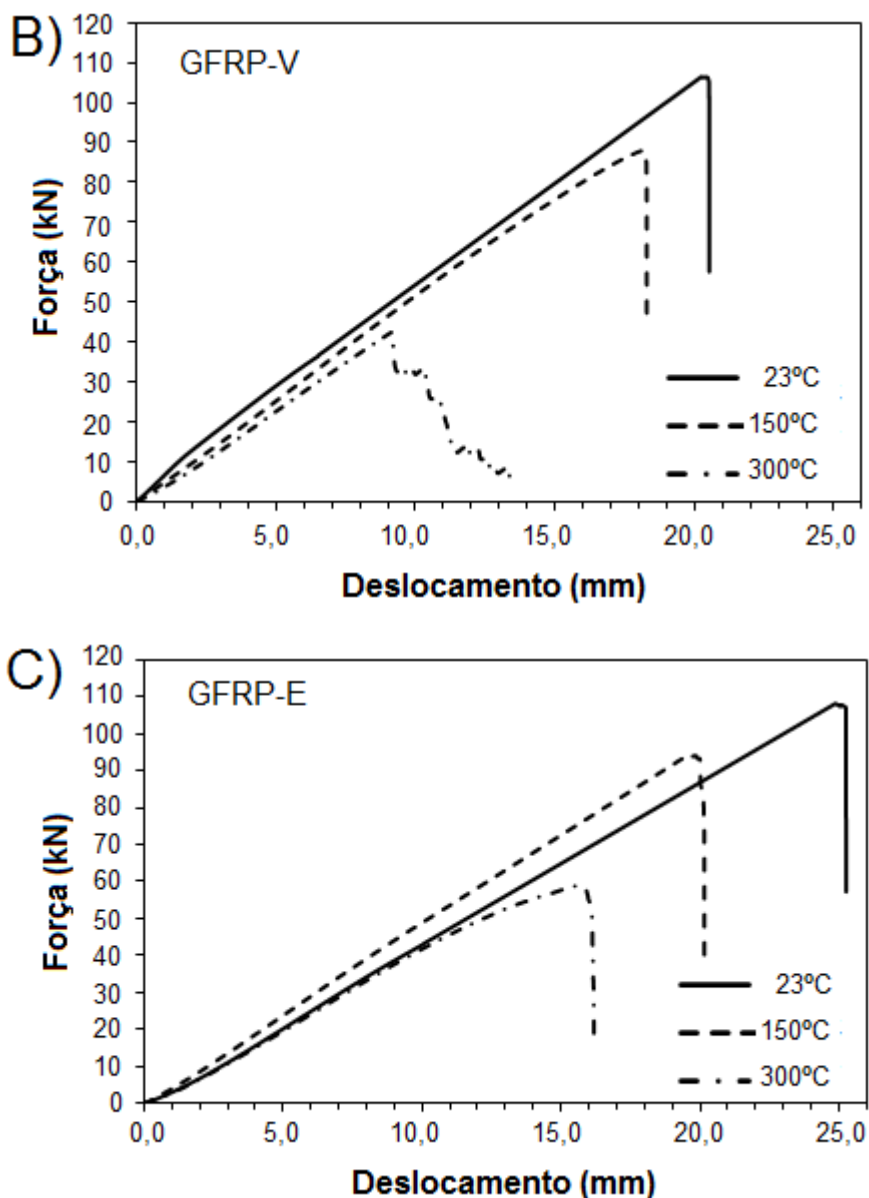
A Figura 51 apresenta as curvas força-deslocamento na tração de vergalhões de GFRP submetidos a temperatura ambiente (23°C) e elevadas temperaturas (150°C e 300°C). Verifica-se que os vergalhões testados nas temperaturas de 23°C e 150°C exibiram comportamento elástico até a ruptura com ruptura frágil. Para temperatura de 300°C há um trecho linear até a carga máxima seguido de uma perda gradual de força até a ruptura.

Figura 51. Curvas de força média em função do deslocamento para os vergalhões de GFRP submetidos a diferentes temperaturas: (A) GFRP-P, (B) GFRP-V e (C) GFRP-E.



Fonte: O autor.

Figura 51 (continuação). Curvas de força média em função do deslocamento para os vergalhões de GFRP submetidos a diferentes temperaturas: (A) GFRP-P, (B) GFRP-V e (C) GFRP-E.



Fonte: O autor.

A Tabela 23 apresenta os resultados de resistência à tração dos corpos de prova de vergalhões de GFRP calculados a partir dos resultados mostrados na Figura 51. É possível observar que houve redução na resistência à tração de todos os tipos de vergalhões de GFRP com o aumento da temperatura de exposição.

A degradação térmica sofrida pela matriz polimérica dos vergalhões de GFRP proporciona um aumento do espaçamento interatômico e quebra das ligações intermoleculares devido ao aquecimento. Conseqüentemente, a interface entre a matriz

polimérica e as fibras de vidro foi danificada, refletindo em uma redução na transferência de esforços entre as fibras e a matriz. Essa perda de desempenho mecânico pode ser expressa em termos da redução dos valores de resistência à tração, conforme apresentado na Tabela 23.

Tabela 23. Resistência à tração média dos vergalhões de GFRP submetidos a elevadas temperaturas.

Amostra	$T_g^a$ (°C)	$T_d^b$ (°C)	Temperatura (°C)	Resistência à tração (MPa)	Retenção da resistência (%)
GFRP-P	116,9	389,4	23,0	821,8 ± 7,2	100,0
			150,0	612,6 ± 2,4	74,5
			300,0	338,1 ± 12,9	41,1
GFRP-V	120,5	395,4	23,0	844,8 ± 1,2	100,0
			150,0	720,7 ± 18,4	85,3
			300,0	336,4 ± 11,1	39,8
GFRP-E	117,1	366,0	23,0	971,3 ± 6,1	100,0
			150,0	871,1 ± 17,6	89,7
			300,0	566,7 ± 6,2	58,3

<sup>a</sup>: Temperatura de transição vítrea da matriz polimérica.

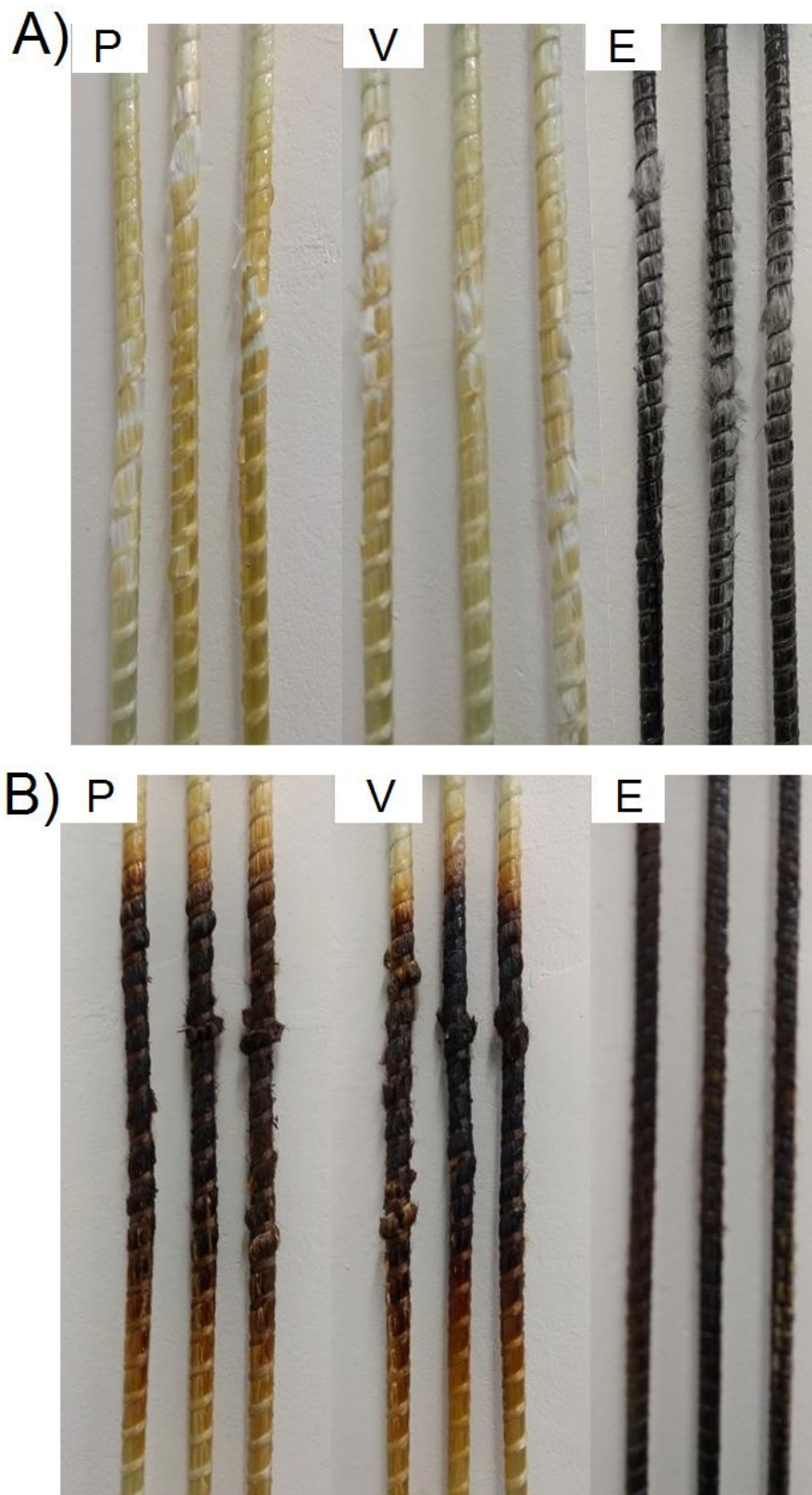
<sup>b</sup>: Temperatura de decomposição da matriz polimérica.

Fonte: O autor.

Esses resultados corroboram com as perdas de resistência à tração relatadas por Wang *et al.* (2007), que observaram que os vergalhões de GFRP com matriz poliéster (diâmetro de 12,7 mm) perderam 24%, 42%, 47%, 64% e 91% da sua resistência à tração quando submetidos a temperaturas de 100°C, 200°C, 300°C, 400°C e 500°C, respectivamente, em comparação com os vergalhões de GFRP analisados em temperatura ambiente (20°C). Rosa *et al.* (2019) e Ashrafi *et al.* (2018) mostraram que a resistência à tração de vergalhões de GFRP com matriz epóxi submetidos a temperaturas de 150°C e 300°C foi reduzida em valores que variaram entre 34,5% e 43,3%, respectivamente, em relação àqueles ensaiados à temperatura ambiente.

A Figura 52 mostra a aparência dos vergalhões após o ensaio. Uma mudança de cor foi observada na superfície dos vergalhões testados a 150°C (acima da  $T_g$  da matriz polimérica). Com o aumento da temperatura para 300°C, essa mudança de cor foi intensificada, sendo, ainda, observada a liberação de calor e voláteis tóxicos devido à degradação térmica da matriz polimérica (WANG e ZHA, 2011).

Figura 52. Fratura nos vergalhões de GFRP testados em temperaturas iguais a (A) 150°C e (B) 300°C.



Fonte: O autor.



Para avaliar a degradação na interface fibra/matriz provocada pela exposição a elevadas temperaturas, amostras dos vergalhões de GFRP-P, GFRP-V e GFRP-E foram aquecidas nas temperaturas de 150°C e 300°C e posteriormente submetidas ao ensaio de cisalhamento interlaminar.

A Tabela 24 e a Figura 53 apresentam os resultados de resistência ao cisalhamento interlaminar ( $S$ ) e a ruptura típica, respectivamente, das amostras dos vergalhões analisados, expostos às temperaturas de 23°C, 150°C e 300°C.

Os resultados obtidos indicam que a exposição a elevadas temperaturas teve um impacto imediato na degradação da resistência ao cisalhamento interlaminar. Com o aquecimento dos vergalhões de GFRP, o coeficiente de expansão térmica é influenciado principalmente pelas propriedades das fibras de vidro (direção longitudinal do vergalhão), que exibem elevado desempenho em elevadas temperaturas, enquanto, na direção transversal às fibras de vidro, o coeficiente de expansão térmica é influenciado pela resina polimérica, como o cisalhamento interlaminar (SAAFI, 2002) e, conseqüentemente, ocorre a degradação da interface fibra-matriz (MANALO *et al.*, 2020; ASHRAFI *et al.*, 2018). Assim, é esperada uma redução na resistência ao cisalhamento de um vergalhão de GFRP a partir da exposição à elevadas temperaturas, o que corrobora com os resultados apresentados na Tabela 23, pois a resistência à tração do vergalhão de GFRP depende da transferência de esforços através da matriz polimérica.

Tabela 24. Resistência ao cisalhamento interlaminar média dos vergalhões de GFRP submetidos à elevadas temperaturas.

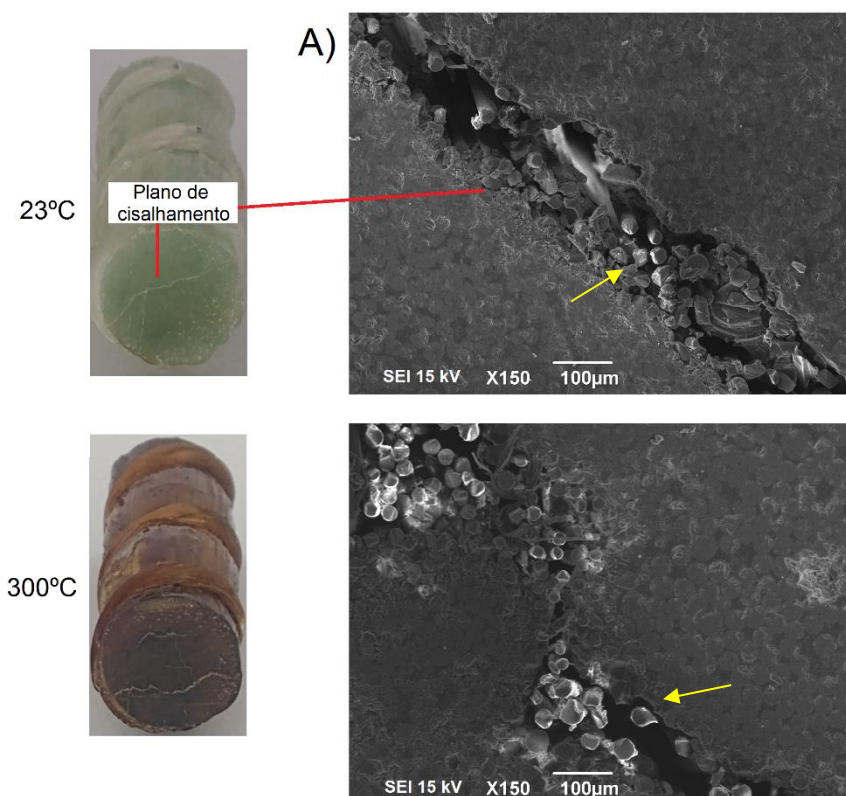
Amostra	Temperatura (°C)	Resistência ao cisalhamento interlaminar (MPa)	Retenção da resistência (%)
GFRP-P	23,0	47,1 ± 0,9	100,0
	150,0	45,1 ± 1,5	95,8
	300,0	41,6 ± 0,3	88,4
GFRP-V	23,0	47,5 ± 2,8	100,0
	150,0	45,5 ± 0,2	95,8
	300,0	41,6 ± 1,7	87,5
GFRP-E	23,0	45,5 ± 0,7	100,0
	150,0	43,9 ± 0,9	96,4
	300,0	40,7 ± 1,7	89,5

Fonte: O autor.

Visando uma melhor compreensão dos mecanismos de falha, as amostras submetidas ao teste de cisalhamento interlaminar foram analisadas em MEV, conforme apresentado na Figura 53. Todas as amostras falharam devido ao cisalhamento horizontal, com o aparecimento de fissuras horizontais no plano médio abaixo do ponto de aplicação da carga, espalhando-se para as extremidades do corpo de prova (ruptura por cisalhamento) e indicando que, nesta região, a interface fibra/matriz possui menor resistência. Verifica-se que houve ruptura frágil da matriz polimérica e descolamento das fibras de vidro em todas as amostras. A amostra de GFRP-E apresentou menor dano, mesmo com o aumento da temperatura para 300°C, seguida das amostras de GFRP-V e GFRP-P.

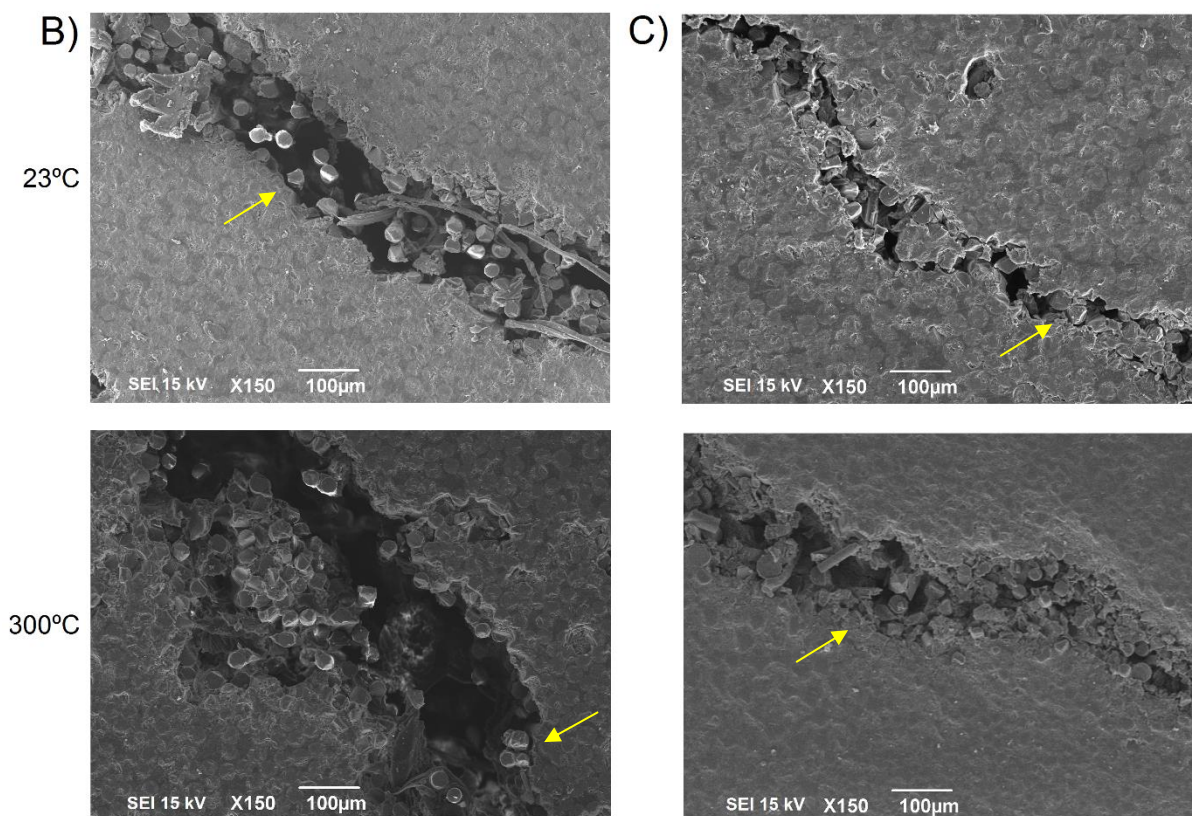
Analisando comparativamente a resistência à tração e a resistência ao cisalhamento interlaminar dos vergalhões de GFRP em elevadas temperaturas, verifica-se que a resistência à tração diminui linearmente com o aumento da temperatura de exposição, como mostrado na Figura 54.

Figura 53. Micrografia das amostras submetidas a temperaturas elevadas: (A) GFRP-P, (B) GFRP-V e (C) GFRP-E.



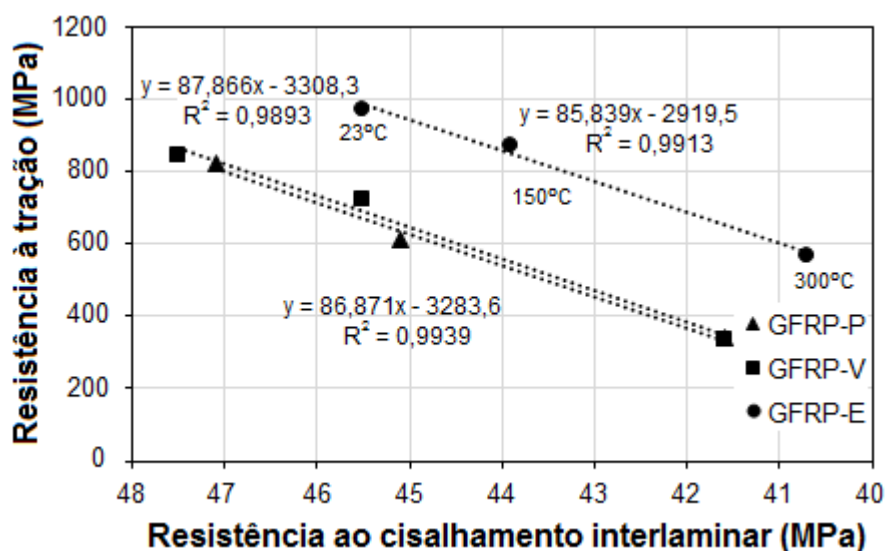
Fonte: O autor.

Figura 53 (continuação). Micrografia das amostras submetidas a temperaturas elevadas: (A) GFRP-P, (B) GFRP-V e (C) GFRP-E.



Fonte: O autor.

Figura 54. Relação entre a resistência à tração média e a resistência ao cisalhamento interlaminar média das amostras submetidas às temperaturas de 150°C e 300°C.



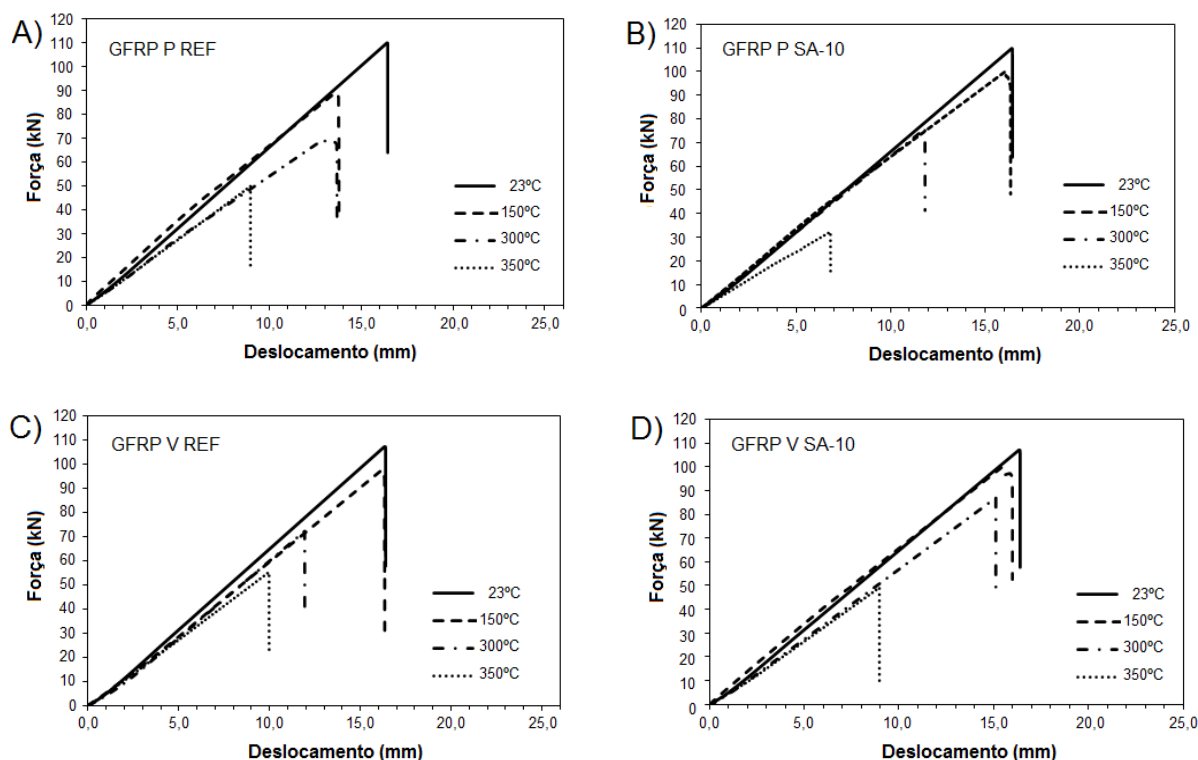
Fonte: O autor.

A partir da regressão linear dos dados de resistência à tração e resistência ao cisalhamento interlaminar dos vergalhões de GFRP, foi possível obter equações de correlação destas variáveis com  $R^2$  de 0,99, indicando a possibilidade de aplicação na previsão da resistência à tração a partir da resistência ao cisalhamento interlaminar.

#### 4.3.3.2 Concreto armado com vergalhões de GFRP

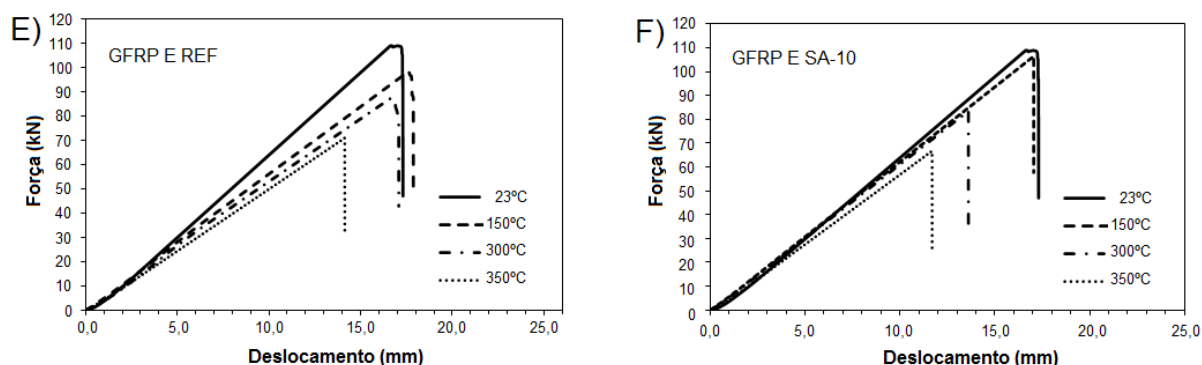
A Figura 55 apresenta o comportamento carga-deslocamento sob tração direta do concreto armado com vergalhões de GFRP, utilizando concreto de referência (Figuras 55 A-C-E) e contendo sílica ativa (Figuras 55 B-D-F) submetidos às temperaturas de 150°C, 300°C e 350°C. A partir do valor da força máxima e utilizando a área da seção transversal do vergalhão, foi possível calcular a resistência à tração, como mostra a Tabela 25.

Figura 55. Relação entre a força média aplicada e o deslocamento dos corpos de prova GFRP-C, com concreto de referência, REF, (A-C-E) e concreto contendo 10% de sílica ativa, SA-10, (B-D-F) submetidos a elevadas temperaturas.



Fonte: O autor.

Figura 55 (continuação). Relação entre a força média aplicada e o deslocamento dos corpos de prova GFRP-C, com concreto de referência, REF, (A-C-E) e concreto contendo 10% de sílica ativa, SA-10, (B-D-F) submetidos a elevadas temperaturas.



Fonte: O autor.

Tabela 25. Resistência à tração média dos vergalhões de GFRP com concreto de cobrimento, submetidos a elevadas temperaturas.

Amostra	Temperatura (°C)	Resistência à tração (MPa)		
		Vergalhão GFRP-N (sem concreto)	Vergalhão GFRP-C (com concreto)	
			REF	SA-10
GFRP-P	23,0	821,8 ± 7,2	825,8 ± 12,3	800,0 ± 16,8
	150,0	612,6 ± 2,4	751,8 ± 9,3	796,5 ± 21,4
	300,0	338,1 ± 12,9	555,1 ± 23,1	561,9 ± 16,1
	350,0	---	379,3 ± 32,4	374,6 ± 19,0
GFRP-V	23,0	844,8 ± 1,2	835,6 ± 19,9	840,9 ± 37,5
	150,0	720,7 ± 18,4	787,0 ± 8,4	805,3 ± 5,8
	300,0	336,4 ± 11,1	598,5 ± 20,4	629,1 ± 34,8
	350,0	---	364,9 ± 29,1	389,7 ± 12,9
GFRP-E	23,0	971,3 ± 6,1	953,1 ± 4,39	960,4 ± 5,7
	150,0	871,1 ± 17,6	916,3 ± 27,9	958,0 ± 8,6
	300,0	566,7 ± 6,2	755,9 ± 12,4	769,3 ± 41,5
	350,0	---	582,6 ± 25,3	609,7 ± 23,1

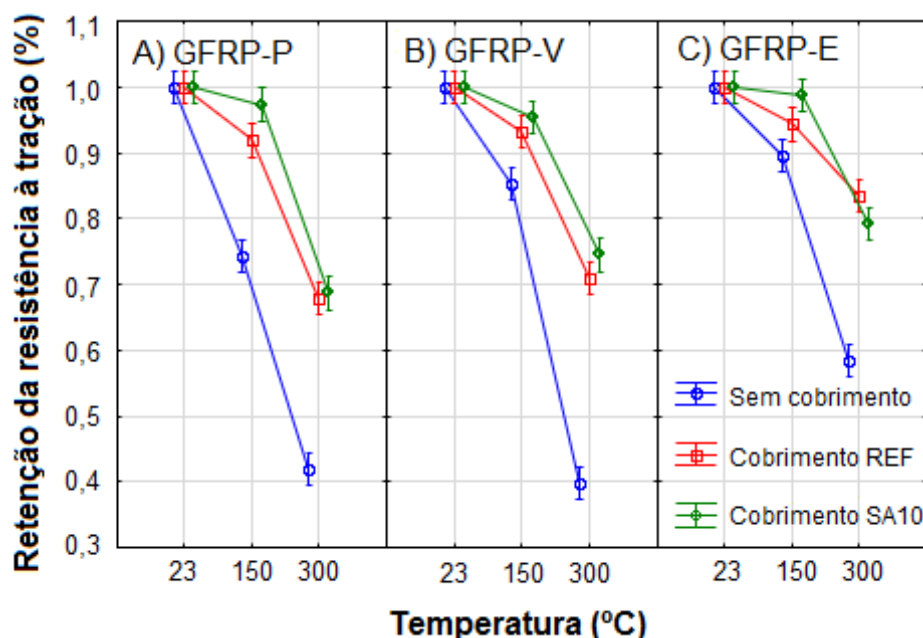
Fonte: O autor.

Assim como observado nos vergalhões isolados, verifica-se uma redução da resistência do concreto reforçado com vergalhão de GFRP com o aumento da temperatura. No entanto, devido à proteção que o cobrimento de concreto forneceu aos vergalhões de GFRP, os danos na resistência à tração são menores, como mostra a

Figura 56. Por exemplo, enquanto para os vergalhões de GFRP-P submetidos a 300 °C há uma perda de 60% da resistência à tração, com o cobrimento do concreto essa perda é de apenas 30%. Isto ocorreu devido à sua baixa difusividade térmica do concreto, que retardou o contato do calor e do oxigênio com o vergalhão de GFRP (MA *et al.*, 2015), conseqüentemente, os vergalhões com cobrimento de concreto (GFRP-C) não produziram gases tóxicos e fumaça observados nos vergalhões sem cobrimento (GFRP-N).

Na tentativa de estabelecer um padrão de espessura de concreto em estruturas de concreto armadas com vergalhões de GFRP, a Norma CAN/CSA S806 (CSA, 2012) estabeleceu que a espessura de cobrimento mínimo deve ser igual a 3,5 vezes o diâmetro do vergalhão de FRP, a fim de garantir uma proteção adequada. No entanto, esta Norma não especifica o tipo de concreto que deve ser utilizado, no que diz respeito à sua composição.

Figura 56. Relação entre a retenção da resistência à tração média e a temperatura de teste das amostras: (A) GFRP-N, (B) GFRP-C-REF e (C) GFRP-C-SA10.



Fonte: O autor.

A comparação entre os tipos de concreto indica que aquele com adição de sílica ativa melhora a proteção do vergalhão de GFRP em comparação ao concreto de referência, principalmente a 150 °C. O efeito da substituição de 10% da massa de cimento por sílica ativa provocou uma mudança na estrutura de poros do concreto. O

concreto de referência (REF) apresentou densidade e porosidade aparentes iguais a 2556,0 kg/m<sup>3</sup> e 18,2%, respectivamente, enquanto para o concreto SA-10 estes valores foram iguais a 2617,0 kg/m<sup>3</sup>, 16,3%, respectivamente, ou seja, a adição de sílica ativa promoveu uma maior barreira ao fluxo de fluidos (calor, ar e vapor d'água) resultando em uma maior proteção térmica aos vergalhões de GFRP.

Além disso, os resultados da análise termogravimétrica mostraram uma menor perda de massa associado a decomposição do hidróxido de cálcio (portlandita) nas amostras de matriz cimentícia com 10% de sílica ativa, comparativamente a matriz cimentícia de referência, correspondendo a 3,8% e 2,6%, respectivamente, contribuindo para a redução da microfissuração da matriz cimentícia das amostras de concreto com sílica ativa.

A tendência de redução das propriedades mecânicas dos vergalhões de GFRP após exposição a elevadas temperaturas corrobora com os resultados obtidos por vários outros autores (ALSAYED *et al.*, 2012; NAJAFABADI *et al.*, 2019), que verificaram uma redução na resistência à tração dos vergalhões de GFRP submetidos a temperaturas de 100°C a 400°C. Alsayed *et al.* (2012) usaram um revestimento de concreto com espessura de 40 mm e observaram reduções na resistência à tração em vergalhões de GFRP (12 mm de diâmetro) iguais a 3,1%, 12,3% e 16,8% após exposição a 100°C, 200°C e 300°C respectivamente. Najafabadi *et al.* (2019) relataram que o vergalhão de GFRP (10 mm de diâmetro) protegido por uma camada de revestimento de concreto de 20 mm experimentou uma redução na resistência à tração de cerca de 13,4%, 23,2% e 33,2%, após exposição a temperaturas de 150°C, 300°C e 400°C, respectivamente.

Observa-se que os corpos de prova aquecidos a 150°C (superior à  $T_g$ ) apresentaram uma razoável perda de resistência à tração (16,9% e 12,2%), que se intensificou a 300°C (27,5% e 22,5%), além do aparecimento de fissuras longitudinais no corpo de prova de concreto. A 300°C, a presença de fissuras longitudinais no concreto de revestimento foi mais acentuada (Figura 57), com redução da resistência à tração em torno de 41,7% e 40,0%.

Figura 57. Falha longitudinal do concreto armado com vergalhões de (A) GFRP-P, (B) GFRP-V e (C) GFRP-E submetidos a 300°C.



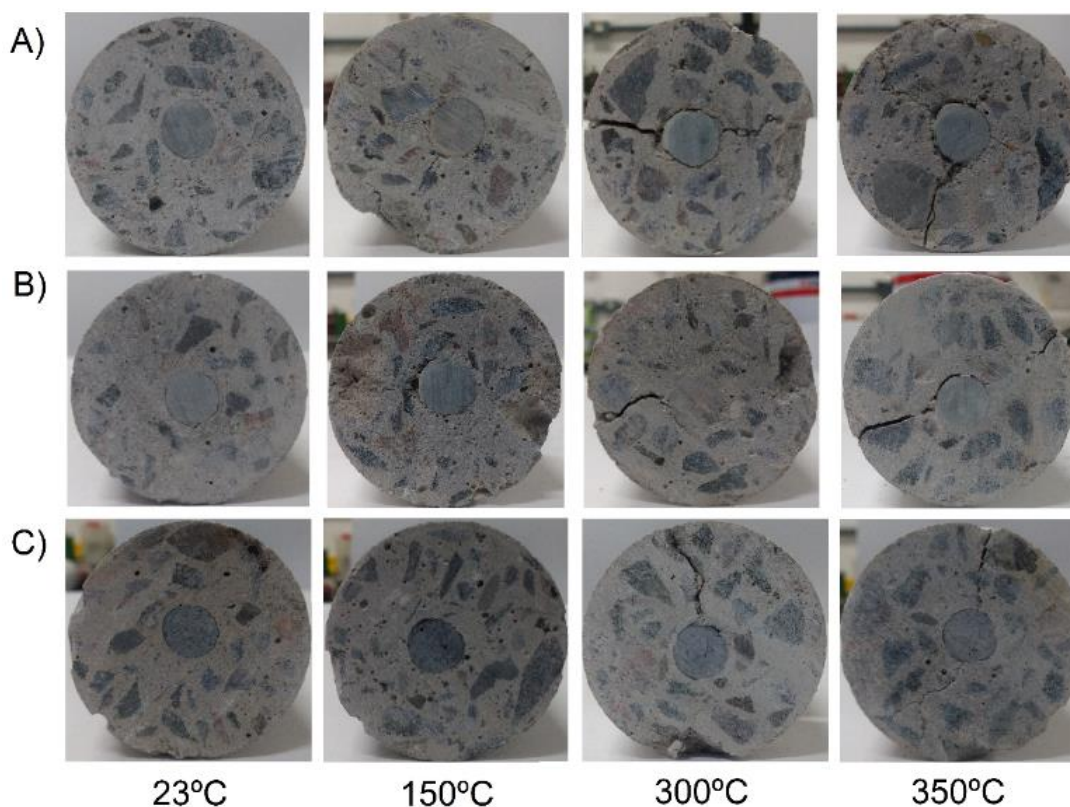
Fonte: O autor.

De acordo com Dwaikat e Kodur (2009), o aquecimento causa a transformação da água em vapor no interior do concreto e, conseqüentemente, a pressão nos poros é elevada. Quando esta pressão ultrapassa a resistência à tração do concreto, pode ocorrer a sua fratura por tração, em fenômeno que pode ser de natureza explosiva, a depender das condições de aquecimento e das características do concreto.

As fissuras longitudinais nos corpos de prova GFRP-C apresentadas na Figura 57, surgiram após aquecimento às temperaturas de 300°C e 350°C, devido à diferença de dilatação térmica em sua direção transversal, visto que o coeficiente de dilatação térmica do concreto é de  $7-11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  e o coeficiente de dilatação térmica transversal do vergalhão de GFRP é de  $21-23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (SPAGNUOLO *et al.*, 2018; AYDIN, 2018). Como resultado, tensões de tração surgiram no interior do concreto ao redor dos vergalhões de GFRP (Figura 58), com o conseqüente aparecimento de fissuras no cobrimento de concreto, devido ao elevado coeficiente transversal de expansão térmica dos vergalhões de GFRP, após exposição a elevadas temperaturas, corroborando com os resultados obtidos por Aydin (2018) e Abdalla (2006).



Figura 58. Fratura na seção transversal dos corpos de prova de concreto: (A) GFRP-P, (B) GFRP-V e (C) GFRP-E submetida a elevadas temperaturas.



Fonte: O autor.

A contribuição de diferentes parâmetros para a resistência à tração final dos vergalhões de GFRP foi investigada usando a análise de variância de múltiplos fatores - ANOVA (Tabela 26). O parâmetro de saída selecionado foi a resistência à tração final dos vergalhões de GFRP testados em diferentes temperaturas, enquanto as variáveis de entrada foram o tipo de concreto de cobrimento (REF e SA-10), o tipo de vergalhão de GFRP (P, V e E) e a temperatura de exposição (23°C, 150°C e 300°C). Os efeitos do cobrimento, tipo de vergalhão, temperatura são estatisticamente significativos, uma vez que os valores de P são aproximadamente iguais a zero.

Tabela 26. Resultados da análise ANOVA para a resistência à tração dos corpos de prova GFRP-N e GFRP-C testados em temperaturas entre 23°C e 300°C.

Parâmetro	SQ	GL	MQ	F	Valor p	Efeito Significativo
Cobrimento	214312	2	107156	184,43	0,00	Sim
Vergalhão de GFRP	527409	2	263705	453,86	0,00	Sim
Temperatura	1284313	2	642157	11105,22	0,00	Sim
Cobrimento – Vergalhão de GFRP	4850	4	1213	2,09	$9,52 \times 10^{-2}$	Não
Cobrimento – Temperatura	194243	4	48561	83,58	0,00	Sim
Vergalhão de GFRP – Temperatura	24435	4	6109	10,51	$2,26 \times 10^{-6}$	Sim
Cobrimento – Vergalhão de GFRP – Temperatura	19689	8	2461	4,24	$5,39 \times 10^{-4}$	Sim
Erro	31375	54	---	---	---	---
Total	2300627	80	---	---	---	---

Nota: SQ – Soma quadrada; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada; F – Valor calculado de F; Valor p – nível de significância; Se  $p < 5\%$  o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.

Fonte: O autor.

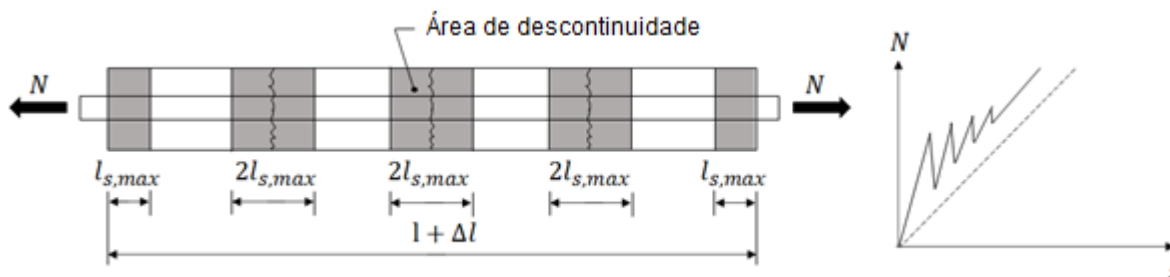
#### 4.3.2.3 Aderência dos vergalhões de GFRP ao concreto

De acordo com a Norma do Instituto Americano do Concreto (ACI 440-1R, 2015), devido à presença da camada de concreto que protege o vergalhão de GFRP, a perda de aderência entre o vergalhão de GFRP e o concreto, devido ao aumento de temperatura, pode afetar o comportamento estrutural em elevadas temperaturas, com aumento da abertura de fissuras e das deformações no concreto armado. Dessa forma, vários estudos têm sido realizados para determinação da tensão de aderência entre o vergalhão de GFRP e o concreto, através do ensaio de *pull-out* (ELLIS *et al.*, 2018; SOLYON *et al.*, 2019; ROSA *et al.*, 2021; MALUK *et al.*, 2011; KATZ *et al.*, 1999) ou do ensaio de tirante (GRIBNIAK *et al.*, 2017; VILANOVA *et al.*, 2014; MARTINS *et al.*, 2020).

A Figura 59 apresenta o comportamento básico de um corpo de prova de concreto reforçado com vergalhão de GFRP (GFRP-C) submetido à carga axial de tração. Até o surgimento da primeira fissura, a relação entre a carga e o deslocamento é

admitida linear e a eficiência da aderência é garantida prioritariamente por adesão química entre a pasta de cimento e a matriz polimérica.

Figura 59. Comportamento de um corpo de prova de concreto reforçado com vergalhão submetido à tração.

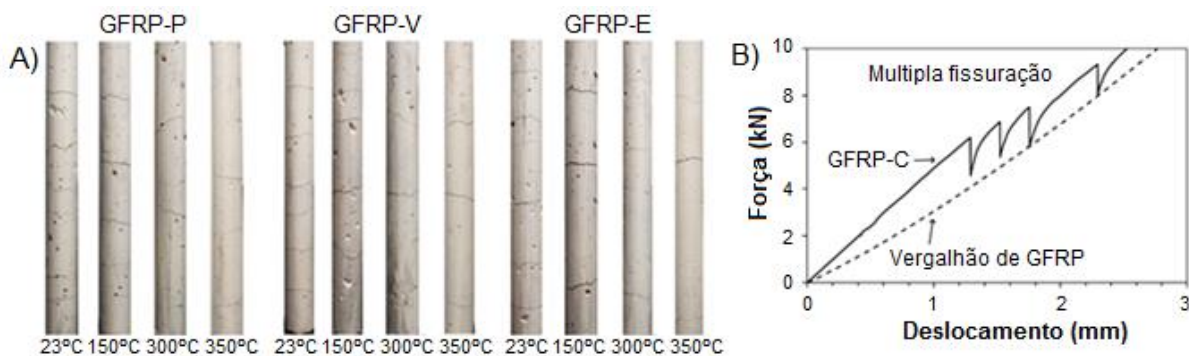


Fonte: Adaptado de FIB *Model Code* (2010).

Após a formação da primeira fissura, a força é transmitida entre as duas partes do corpo de prova GFRP-C fissurado por meio de tensões de aderência entre o vergalhão de GFRP e o concreto. Com a ruptura da adesão química na região próxima da fissura, a ancoragem mecânica propiciada pelas nervuras é responsável pela maior parcela da aderência. Com o incremento das cargas aplicadas, uma nova fissura se forma a uma certa distância da fissura inicial, chamada de comprimento de transferência ( $l_r$ ), e a compatibilidade de deformações se estabelece entre o reforço e o concreto. Novas fissuras vão sendo formadas gradualmente, com espaçamento relativamente uniforme ( $s$ ), em um processo denominado múltipla fissuração (Figura 59), até que o tirante atinja um estágio de fissuração estabilizada e nenhuma nova fissura se desenvolva. Neste estágio, o espaçamento entre fissuras está em um intervalo compreendido entre a medida do comprimento de transferência e o dobro deste valor ( $l_r < s < 2l_r$ ).

A Figura 60A apresenta o processo de fissuração dos corpos de prova de concreto armado reforçados com três tipos de vergalhões de GFRP e submetidos a diferentes temperaturas. Na Figura 60B é possível observar, na curva típica força-deslocamento de um dos corpos de prova GFRP-C avaliados experimentalmente, o processo de múltipla fissuração. Verifica-se que o aumento da temperatura resultou em redução do espaçamento entre fissuras, como mostra a Tabela 27.

Figura 60. Fissuras em corpos de prova GFRP-C: (A) padrão de fissuração, (B) Comportamento típico de carga *versus* deslocamento.



Fonte: O autor.

Tabela 27. Resultados da tensão de aderência, distância entre fissuras e força de primeira fissura dos corpos de prova GFRP-C nas temperaturas de 23°C, 150°C, 300°C e 350°C.

Amostra	Temp. (°C)	Distância entre fissuras (mm)		Carga na primeira fissura (kN)		Tensão de aderência (MPa)	
		REF	SA-10	REF	SA-10	REF	SA-10
GFRP-P	23,0	65,7 ± 4,9	64,4 ± 13,9	2,5 ± 0,1	2,7 ± 0,4	4,2 ± 0,3	4,6 ± 0,9
	150,0	90,7 ± 9,2	85,3 ± 9,2	2,1 ± 0,1	2,4 ± 0,5	2,4 ± 0,6	3,1 ± 0,3
	300,0	120,0 ± 0,3	146,7 ± 23,1	2,5 ± 0,3	2,6 ± 0,2	1,6 ± 0,1	1,2 ± 0,2
	350,0	160,0 ± 0,2	186,7 ± 16,2	2,1 ± 0,1	4,1 ± 0,1	1,1 ± 0,1	0,9 ± 0,2
GFRP-V	23,0	74,3 ± 5,7	64,3 ± 10,0	3,1 ± 0,2	2,1 ± 0,1	3,8 ± 0,3	4,3 ± 0,6
	150,0	72,4 ± 6,6	90,7 ± 9,2	2,9 ± 0,8	2,0 ± 0,1	3,1 ± 0,3	3,0 ± 0,3
	300,0	112,0 ± 13,8	160,0 ± 0,8	2,6 ± 0,1	2,7 ± 0,1	1,7 ± 0,2	1,1 ± 0,1
	350,0	160,0 ± 0,5	160,0 ± 0,4	2,0 ± 0,1	6,4 ± 0,7	1,1 ± 0,1	1,0 ± 0,2
GFRP-E	23,0	69,5 ± 10,0	65,7 ± 4,9	3,2 ± 0,1	2,2 ± 0,1	4,4 ± 0,6	4,8 ± 0,4
	150,0	112,0 ± 13,9	85,3 ± 9,2	3,5 ± 0,1	2,2 ± 0,1	2,1 ± 0,3	3,4 ± 0,3
	300,0	120,0 ± 0,5	146,7 ± 23,1	2,3 ± 0,3	3,0 ± 0,3	1,7 ± 0,1	1,3 ± 0,2
	350,0	160,0 ± 0,2	186,7 ± 46,2	2,1 ± 0,1	4,2 ± 0,1	1,2 ± 0,2	0,9 ± 0,2

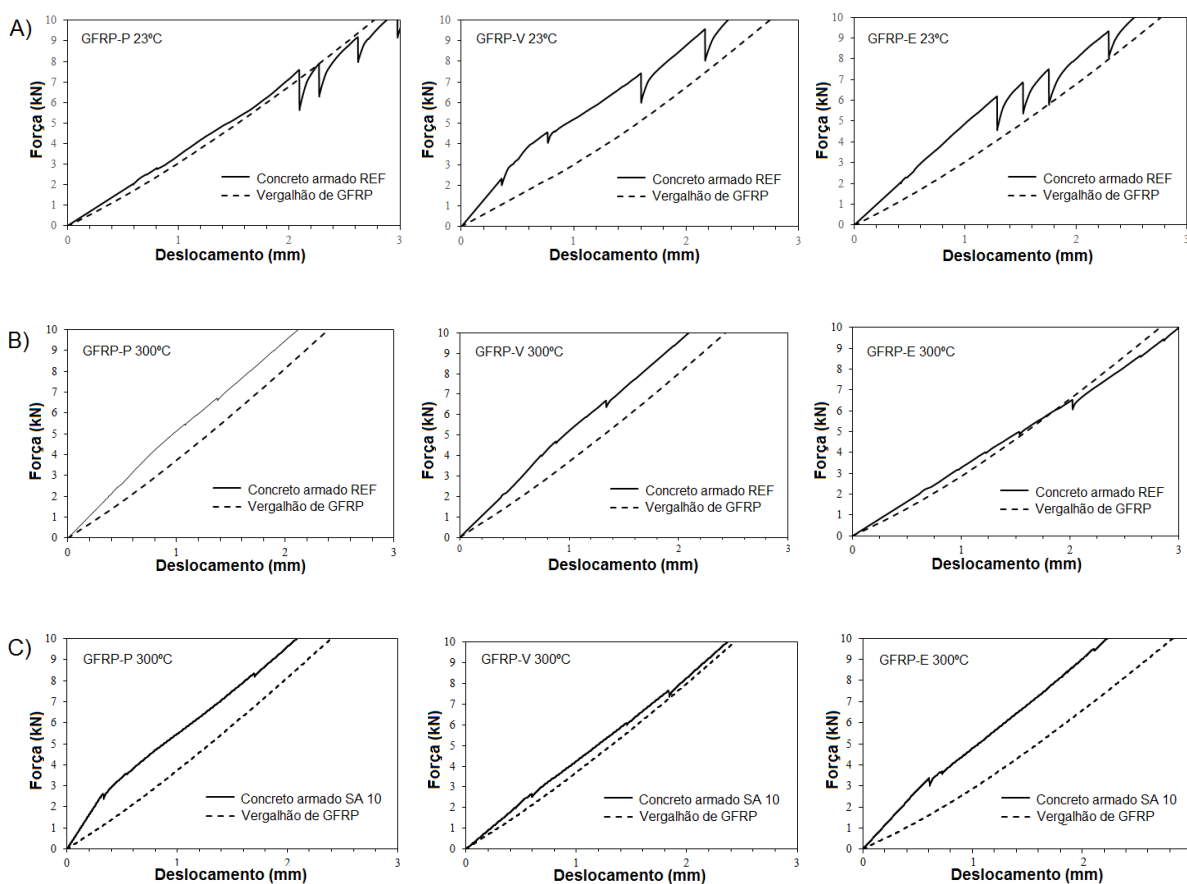
Fonte: O autor.

É possível observar que até o surgimento da primeira fissura, a força é suportada pela matriz e pelo reforço, em conjunto, abrangendo deformações elásticas até o início da fissuração. Com o surgimento da primeira fissura e o processo de múltipla fissuração ocorre a degradação gradual da tensão de aderência entre o vergalhão de GFRP e o concreto. No processo de fissuração, a matriz sofre perdas sucessivas de

resistência, até o ponto em que a matriz deixa de contribuir de forma significativa e o vergalhão de GFRP passa a suportar integralmente as cargas de tração, conforme apresentado na Figura 61.

Com a continuação da aplicação da força, o vergalhão de GFRP é tracionado até a sua ruptura total. Além disso, foi possível verificar mudanças na carga de primeira fissura das amostras de GFRP-C, conforme mostrado na Tabela 27. Observa-se que os valores da carga de primeira fissura nos corpos de prova de GFRP-C-REF estão entre 3,2 e 2,1 kN, enquanto para os corpos de prova GFRP-C-SA10 estão entre 6,4 e 2,1 kN.

Figura 61. Curvas de força média versus deslocamento dos corpos de prova GFRP-C com concreto REF e SA-10 nas temperaturas de: (A) 23°C, (B) 300°C REF, e (C) 300°C SA.



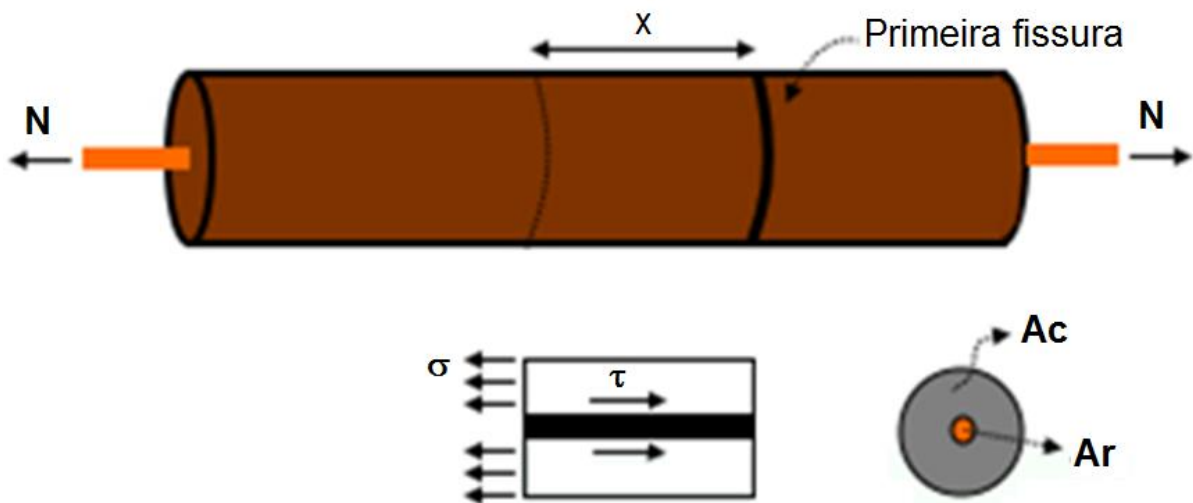
Fonte: O autor.

Após o surgimento da primeira fissura, o equilíbrio do corpo de prova GFRP-C é garantido pela transferência de esforços de um lado a outro da fissura por meio do

vergalhão de reforço. Enquanto na região fissurada os vergalhões estão submetidos apenas a tensões normais, na região não fissurada o surgimento de tensões cisalhantes ao redor da área lateral do vergalhão permite transferir esses esforços para o concreto e manter o equilíbrio do corpo de prova GFRP-C sobre esforços axiais. Analisando uma seção do corpo de prova GFRP-C não fissurado, como mostra a Figura 62, localizada a uma distância ( $l_r$ ) da primeira fissura, é possível estabelecer a Equação 29 de equilíbrio entre as forças internas no concreto e na superfície do vergalhão de GFRP, em que  $A_c$  é a área da seção transversal do concreto.

$$\sigma_c A_c = \tau A_{lateral} \quad \text{Equação 29}$$

Figura 62. Esquema de fissuração nos corpos de prova GFRP-C.



Fonte: O autor.

Considerando que a área lateral é dada por  $A_{lateral} = (2\pi r) \cdot l_r$  e que a relação entre a área da seção transversal do concreto ( $a_c$ ) e a área da seção transversal do vergalhão de GFRP ( $a_r$ ) corresponde à taxa de reforço  $\rho = \frac{A_r}{A_c}$ , obtém-se a Equação 30.

$$l_r = \frac{1}{4} \frac{d_b \sigma_c}{\rho \tau} \quad \text{Equação 30}$$

Em que  $d_b$  é o diâmetro do vergalhão de GFRP e  $l_r$  é denominado comprimento de transferência.

A partir da Equação 30 é possível definir a posição de uma nova fissura que ocorrerá quando a tensão no concreto atingir o valor de resistência à tração, ou seja,  $\sigma_c = f_{ct}$  e determinar o espaçamento provável entre fissuras após a fase de múltipla fissuração. De acordo com Schlicke *et al.* (2021), a nova fissura acontecerá a uma distância no intervalo entre  $l_r$  e  $2l_r$ , conforme Equação 31.

$$0,25 \frac{d_b f_{ct}}{\rho \tau_{min}} < s < 0,5 \frac{d_b f_{ct}}{\rho \tau_{max}} \quad \text{Equação 31}$$

A partir deste conceito, a NBR 7477 (ABNT, 1982), estabelece que o espaçamento médio entre fissuras em um tirante de concreto armado é dado pela Equação 32.

$$s_m = 0,375 \frac{d_b f_{ct}}{\rho \tau_m} \quad \text{Equação 32}$$

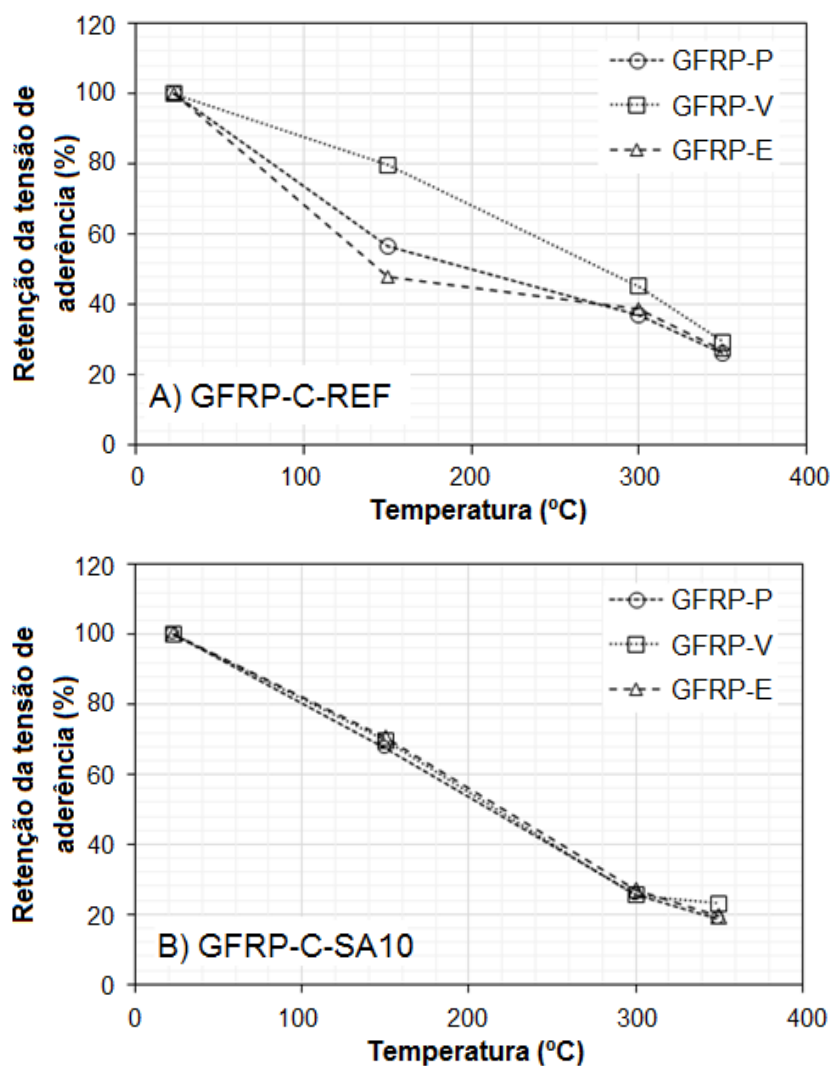
Em uma outra abordagem, a correlação entre o espaçamento das fissuras e a tensão de aderência deve considerar a influência do cobrimento de concreto (SCHLICKE *et al.*, 2021), o que resulta na adição de um termo na equação, como indica o *FIB Model Code* (FIB, 2010), conforme Equação 33.

$$l_r = kc + \frac{1}{4} \frac{d_b f_{ct}}{\rho \tau} \quad \text{Equação 33}$$

Em que  $k$  é um parâmetro empírico para levar em consideração a influência do cobrimento de concreto (como uma simplificação,  $k = 1,0$  pode ser utilizado) e  $c$  é a espessura de cobrimento.

Utilizando os valores experimentais de espaçamento de fissuras obtidos neste trabalho foi possível obter a tensão de aderência média (Equação 32) e valores mínimos e máximos de tensão de aderência, utilizando a Equação 31, conforme a Teoria Clássica, ou a Equação 33, conforme o *FIB Model Code* (FIB, 2010). Os resultados já apresentados na Tabela 27 são destacados na Figura 63.

Figura 63. Retenção da tensão de aderência dos vergalhões de GFRP inseridos ao concreto (A) de referência, REF e (B) contendo 10% de sílica ativa, SA-10.



Fonte: O autor.

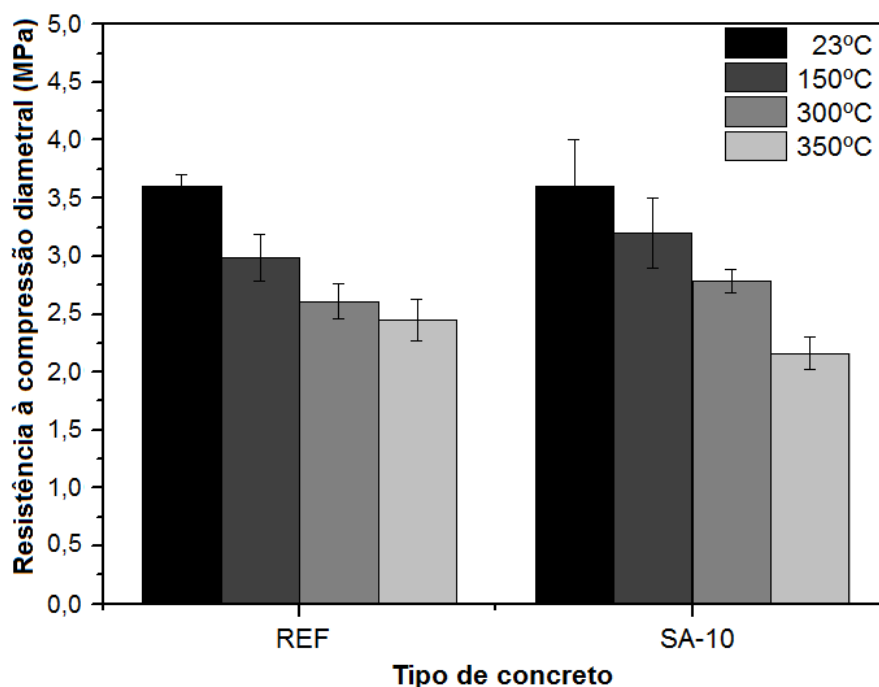
Observa-se que os corpos de prova de concreto armado de referência (GFRP-C-REF) aquecidos a 150°C apresentaram uma perda significativa na resistência de aderência (43,6%, 20,3% e 52,0%), que se intensificou nas temperaturas de 300°C (63,1%, 54,9% e 61,4%) e 350°C (74,1%, 70,7% e 72,8%). Comportamento semelhante foi verificado nos corpos de prova de concreto armado contendo sílica ativa (GFRP-C-SA10) aquecidos a 150°C (perda na resistência de aderência de 32,4%, 30,3% e 29,3%), 300°C (perda de 74,3%, 74,6% e 73,1%) e 350°C (perda de 81,2%, 76,9% e 80,4%), para vergalhões de GFRP-P, GFRP-V e GFRP-E, respectivamente.

O aquecimento dos corpos de prova de GFRP-C provocou alterações físicas e químicas no concreto, tais como desidratação de produtos hidratados (conforme



resultados de TG/DTA), mudança na estrutura dos poros e na microestrutura (MA *et al.*, 2015; MEMON *et al.*, 2019). Como resultado, houve uma redução na resistência à compressão diametral do concreto, de 16,9% e 12,2% quando aquecido a 150°C; 27,5% e 22,5% quando aquecido a 300°C; 41,7% e 40,0% quando aquecido a 350°C, para os concretos REF e SA-10, respectivamente (Figura 64).

Figura 64. Resistência à compressão diametral dos concretos REF e SA-10 submetidos a elevadas temperaturas.



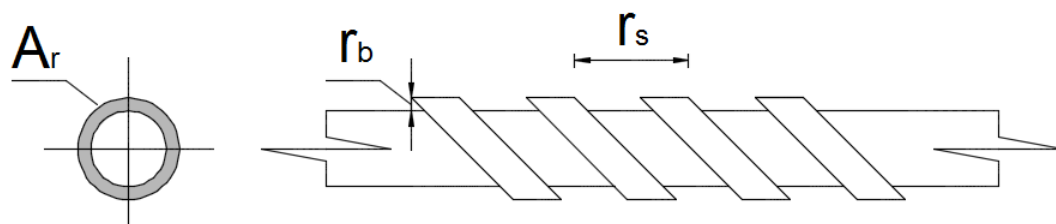
Fonte: O autor.

Além do tipo de resina, outro fator que afeta a redução da aderência do vergalhão de GFRP com o aumento da temperatura é a diferença na sua geometria, conforme mostrado na Tabela 11, já que as nervuras são diferentes. De acordo com Baena *et al.* (2009), é possível analisar a influência da geometria dos vergalhões de GFRP na área relativa da nervura ( $a_s$ ), que pode ser calculada por meio da Equação 34 e conforme Figura 65.

$$a_s = \frac{A_r}{r_s} \quad \text{Equação 34}$$

Em que ( $A_r$ ) é a projeção da área perpendicular da nervura ao eixo do vergalhão e ( $r_s$ ) é o espaçamento entre as nervuras.

Figura 65. Definição da área relativa da nervura ( $a_s$ ).



Fonte: Adaptado de BAENA *et al.* (2009).

Embora os corpos de prova de concreto armado com vergalhões de GFRP-E apresentem maior resistência à tração em elevadas temperaturas, isso não foi observado em seu comportamento quanto à resistência de aderência, quando comparados aos corpos de prova armados com vergalhões de GFRP-E e GFRP-P. A menor perda de resistência de aderência dos vergalhões de GFRP-V é consequência de suas características geométricas e da estabilidade térmica da matriz éster vinílica, com área relativa de nervura equivalente a 2,81 mm<sup>2</sup>/mm, seguidos de 2,75 mm<sup>2</sup>/mm e 2,38 mm<sup>2</sup>/mm para os vergalhões de GFRP-E e GFRP-P, respectivamente.

A contribuição de diferentes parâmetros para a resistência de aderência dos vergalhões de GFRP-C foi investigada usando a análise de variância de múltiplos fatores, conforme mostrado na Tabela 28. O parâmetro de saída selecionado foi a tensão de aderência dos vergalhões de GFRP testados em diferentes temperaturas, enquanto as variáveis de entrada foram o tipo de concreto de cobrimento (REF e SA-10), o tipo de vergalhão de GFRP (P, V e E) e a temperatura de exposição (23°C, 150°C, 300°C e 350°C). É possível observar que a influência da temperatura nos efeitos dos diferentes tipos de concreto é estatisticamente significativa, com valores de P aproximadamente iguais a zero.

Também é possível observar que os corpos de prova GFRP-C com concreto SA-10 apresentaram maior resistência de aderência em comparação aos corpos de prova GFRP-C com concreto REF, devido à redução da porosidade interfacial na zona de transição entre a matriz cimentícia e a superfície do vergalhão de GFRP, conforme esquematizado na Figura 66. O efeito favorável na aderência, provocado pela adição de sílica ativa é explicado pelo fato destas partículas preencheram as áreas anteriormente ocupadas por água na zona de transição (MONTEIRO *et al.*, 1989; DYBEL *et al.*, 2018; CHUNG, 2002). Assim, ocorre a densificação da zona de transição devido à presença do C-S-H formado a partir do hidróxido de cálcio (CH) como resultado da

reação pozolânica, conforme mostrado na Figura 33, que indicou a redução do teor de CH na pasta de cimento com sílica ativa.

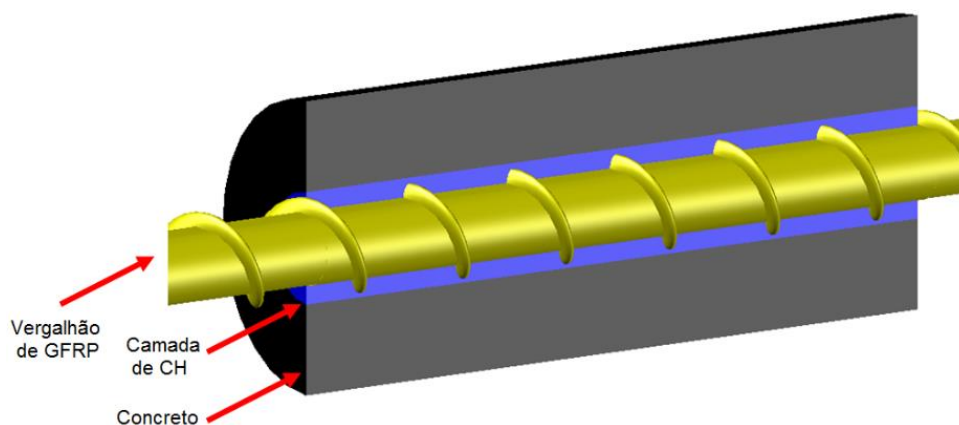
Tabela 28. Resultado da análise ANOVA para a resistência de aderência dos corpos de prova GFRP-C testados nas temperaturas de 23°C – 350°C.

Parâmetro	SQ	GL	MQ	F	Valor p	Efeito Significativo
Tipo de concreto	0,1301	1	0,1301	1,150	$2,89 \times 10^{-1}$	Não
Vergalhão de GFRP	0,1530	2	0,0765	0,676	$5,13 \times 10^{-1}$	Não
Temperatura	123,2830	3	41,0943	363,209	0,00	Sim
Tipo de concreto – Vergalhão de GFRP	0,3544	2	0,1772	1,566	$2,19 \times 10^{-1}$	Não
Tipo de concreto – Temperatura	3,6422	3	1,2141	10,730	$1,64 \times 10^{-15}$	Sim
Vergalhão de GFRP – Temperatura	1,1298	6	0,1883	1,664	$1,50 \times 10^{-1}$	Não
Tipo de concreto – Vergalhão de GFRP – Temperatura	1,0811	6	0,1802	1,593	$1,70 \times 10^{-1}$	Não
Erro	5,4308	48	0,1131	---	---	---
Total	135,2045	71	---	---	---	---

Nota: SQ – Soma quadrada; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada; F – Valor calculado de F; Valor p – nível de significância; Se  $p < 5\%$  o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.

Fonte: O autor.

Figura 66. Densificação da zona de transição entre o concreto e o vergalhão de GFRP devido a adição de sílica ativa.



Fonte: O autor.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou os resultados de um estudo experimental realizado para investigar a durabilidade de vergalhões de GFRP, produzido com diferentes tipos de resina, frente à degradação provocada pelos ambientes alcalinos e por elevadas temperaturas. O efeito do cobrimento de concreto sobre a durabilidade dos vergalhões também foi avaliado. As seguintes conclusões podem ser tiradas com base nos resultados e discussões relatados neste documento:

- O envelhecimento acelerado promoveu a degradação nos vergalhões de GFRP, resultando na deterioração da matriz polimérica, das fibras de vidro e descolamento interfacial entre a fibra de vidro e a matriz polimérica;
- A elevação de temperatura acelerou o processo de degradação dos vergalhões de GFRP imersos em solução ou inseridos no concreto, independentemente do tipo de solução alcalina ou tipo de concreto de cobrimento;
- Os vergalhões com matriz poliéster absorveram água com maior intensidade em comparação aos vergalhões com matriz éster vinílica e epóxi, o que provocou uma maior plastificação destas matrizes poliméricas com uma consequente redução na temperatura de transição vítrea, formação de microtrincas, descolamento entre a matriz polimérica e as fibras de vidro e dissolução das fibras de vidro dos vergalhões de GFRP. Estes danos foram observados principalmente na região perimetral dos vergalhões de GFRP;
- Em comparação com vergalhões imersos em solução à temperatura ambiente ou a 40°C, nos vergalhões expostos a soluções com temperatura 60°C, a difusão de água e de íons nocivos às fibras de vidro (principalmente o Na<sup>+</sup>) foi intensificada através da matriz polimérica, deixando as fibras de vidro desprotegidas ao ataque alcalino, o que resultou na dissolução das fibras de vidro;
- Os vergalhões de GFRP com matriz poliéster apresentaram menor resistência à tração e módulo de elasticidade quando submetido ao ambiente alcalino que os vergalhões de GFRP com matriz éster vinílica, o que está associado principalmente à maior suscetibilidade à absorção de água pela matriz poliéster, que resulta em menor eficiência desta matriz na proteção às fibras de vidro;

- A degradação do concreto armado com vergalhões de GFRP em ambiente alcalino foi menor que a degradação dos vergalhões testados isoladamente, confirmando a proteção que o cobrimento de concreto pode prover à armadura;
- O concreto contendo sílica ou concreto submetido a carbonatação apresentaram melhor proteção que o concreto de referência, sem sílica e sem carbonatação;
- A substituição de 10,0% de cimento por sílica ativa (em massa) no concreto se mostrou benéfica à durabilidade dos vergalhões de GFRP, com perda na resistência ao cisalhamento interlaminar de 11,3%, o que indiretamente favorece ao aumento da vida útil das estruturas de concreto armado com vergalhões de GFRP;
- A carbonatação do concreto resultou em um ambiente menos nocivo aos vergalhões de GFRP, com redução de 10,7% na resistência ao cisalhamento interlaminar após 3.000 horas de exposição;
- Os vergalhões de GFRP com matriz éster vinílica, dentre os vergalhões estudados, apresentou melhor desempenho, após o envelhecimento em ambiente alcalino;
- Os vergalhões de GFRP exibiram comportamento elástico, mesmo quando aquecidos nas temperaturas de 150°C, 300°C e 350°C, porém ocorreu uma gradual redução no deslocamento e, conseqüentemente, uma redução na carga necessária para atingir sua ruptura;
- A resistência à tração dos vergalhões de GFRP diminuiu significativamente quando submetidos a elevadas temperaturas, sendo 350°C a temperatura crítica, na qual ocorreu a decomposição da matriz polimérica;
- Em comparação com o vergalhão isolado, os tirantes de concreto armado apresentaram menor perda de resistência à tração após exposição a elevadas temperaturas. Para a temperatura de 350°C, foi verificado o aparecimento de fissuras longitudinais no concreto, devido à expansão volumétrica dos vergalhões de GFRP;
- A degradação termoxidativa das nervuras do vergalhão de GFRP com o aumento de temperatura resultou na redução da capacidade de transferência de esforços para o concreto, independentemente do tipo de concreto de

cobrimento, com aumento do espaçamento de fissuras no concreto armado tracionado e redução da tensão de aderência entre o vergalhão e o concreto;

- A influência do tipo de matriz polimérica foi significativa no comportamento à tração dos vergalhões de GFRP, quando submetidos em elevadas temperaturas. Nesse sentido os vergalhões de GFRP com matriz epóxi apresentaram o melhor desempenho, seguido daquelas com matrizes éster vinílica e poliéster;
- A sílica ativa melhorou o desempenho do cobrimento de concreto e, consequentemente, melhorou a proteção aos vergalhões de GFRP, dificultando a difusão de oxigênio e calor em direção aos vergalhões. Como resultado, os vergalhões de GFRP com cobrimento de concreto apresentaram melhor comportamento à tração em elevadas temperaturas, em comparação com vergalhões de GFRP que foram diretamente expostos ao calor;
- Devido ao comportamento de fissuração dos corpos de prova com cobrimento (GFRP-C) e à degradação da aderência entre o vergalhão de GFRP e o concreto de cobrimento quando expostos a elevadas temperaturas, recomenda-se a utilização de espessura de concreto superior a 20 mm;
- O concreto com sílica ativa (SA-10) apresentou melhor proteção aos vergalhões de GFRP do que o concreto de referência (REF), devido a sua menor porosidade aparente;
- Após analisar uma combinação de fatores, os vergalhões de GFRP com matriz epóxi, dentre os vergalhões estudados, foi o que apresentou melhor desempenho em ambientes com exposição a elevadas temperaturas.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Avaliar a durabilidade de vergalhões de GFRP envelhecidos pela exposição à radiação ultravioleta e ao ambiente;
- b) Estudar a interface fibra/matriz utilizando as técnicas de micro tomografia, de modo a ter uma melhor perspectiva quanto ao grau de mudança das propriedades dos vergalhões de GFRP;
- c) Avaliar o desgaste na interface vergalhão de GFRP/concreto, simulando condições de carregamento na estrutura de concreto armado;
- d) Estudar a aderência dos vergalhões de GFRP após envelhecimento em concreto carbonatado com sílica ativa;
- e) Desenvolver modelos de previsão da vida útil sob condições severas de exposição ambiental dos vergalhões de GFRP.

## REFERÊNCIAS

- ABBASI, A.; HOGG, P.J. Temperature, and environmental effects on glass fibre rebar: Modulus, strength, and interfacial bond strength with concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 36, p. 394 – 404, 2005.
- ABDALLA, H. Concrete cover requirements for FRP reinforced members in hot climates. **Composite Structures**, v. 73, p. 61 – 69, 2006.
- ACI Committee 440. **Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars**. ACI 440.1R-06, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA; 2006.
- ACHILLIDES, Z.; PILAKOUTAS, K. Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions. **Journal of Composites for Construction**, v. 8, p. 173 – 181, 2004.
- AHMED, A.; GUO, S.; ZHANG, Z.; SHI, C.; ZHU, D. A review on durability of fiber reinforced polymer (FRP) bars reinforced seawater sea sand concrete. **Construction and Building Materials**, v. 256, p. 1 – 18, 2020.
- AL-SUNNA, R.; PIKALOUTAS, K.; WALDRON, P.; AL-HADEED, T. Tension stiffening in GFRP reinforced concrete beams, Measuring, monitoring, and modeling concrete properties. **Springer**, p. 711 – 718, 2006.
- ALSAYED, S. et al. Performance of glass fiber reinforced polymer bars under elevated temperatures. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, p. 2265 – 2271, 2012.
- AL-SALLOUM, Y. A. et al. Effect of harsh environmental conditions on the tensile properties of GFRP bars. **Composites Part B: Engineering**, v. 45 p. 835 – 844, 2013.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440-1R-15**: Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars, Farmington Hills, USA, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7705**: Standard Test Method for Alkali Resistance of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Matrix Composite Bars used in Concrete Construction, West Conshohocken, USA, West Conshohocken, USA, 2019.
- \_\_\_\_\_. **ASTM D3171**: Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials, West Conshohocken, USA, 2015.



\_\_\_\_\_. **ASTM E1142**: Standard Terminology relating to Thermophysical Properties, West Conshohocken, USA, 2015.

\_\_\_\_\_. **ASTM D7957**: Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement, West Conshohocken, USA, 2017.

\_\_\_\_\_. **ASTM D2734**: Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics, West Conshohocken, USA, 2016.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 792**: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity of Plastics by Displacement, West Conshohocken, USA, 2020.

\_\_\_\_\_. **ASTM E 1868**: Standard Test Methods for Loss-On-Drying by Thermogravimetry, West Conshohocken, USA, 2015.

\_\_\_\_\_. **ASTM E1356**: Standard Test Methods for Assignment of the Glass Transition Temperatures by Differential Scanning Calorimetry, West Conshohocken, USA, 2008.

\_\_\_\_\_. **ASTM D7205**: Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars, West Conshohocken, USA, 2016.

\_\_\_\_\_. **ASTM D4475**: Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods by the Short-Beam Method, West Conshohocken, USA, 2016.

AMRAN, Y. H. M.; ALYOUSEF, R.; RASHID, R. S. M.; ALABDULJABBAR, H.; HUNG, C. C. Properties, and applications of FRP in strengthening RC structures: A review. **Structures**, v. 16, p. 208 – 238, 2018.

APICELA, A.; MIGLIARESI, C.; NICOLAIS, L.; IACCARINO, L.; ROCCOTELLI, S. The water ageing of unsaturated polyester-based composites: influence of resin chemical structure. **Composites**, v.14, p. 387 – 392, 1983.

ASHRAFI, H.; BAZLI, M.; OSKOUEI, A. V.; BAZLI, L. Effect of sequential exposure to UV radiation and water vapor condensation and extreme temperatures on the mechanical properties of GFRP bars. **Journal of Composites for Construction**, v. 22, p. 1 – 16, 2018.

ASHRAFI, H.; BAZLI, M.; NAJAFABADI, E. P.; OSKOUEI, A. V. 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, 2017.

ASLANI, F. Residual bond between concrete and reinforcing GFRP rebars at elevated temperatures. **Structures and Buildings**, v. 172, p. 127 – 140, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7477**: Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado – Especificação. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 18**: Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 8802**: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

ARABI, N.; MOLEZ, L.; RANGEARD, D. Durability of alkali-resistant glass fibers reinforced cement composite: Microstructural observations of degradation. **Periodica Polytechnical Civil Engineering**, v. 62, p. 1 – 8, 2018.

ARCZEWSKA, P.; POLAK, M. A.; PENDILIS, A. Degradation of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars in concrete environment. **Construction and Building Materials**, v. 293, p. 1 – 16, 2021.

ARIAS, J. P. M.; BERNAL, C.; VAZQUEZ, A.; ESCOBAR, M. M. Aging in water and in an alkaline medium of unsaturated polyester and epoxy resins: experimental study and modeling. **Advances in Polymer Technology**, v. 37, p. 459 – 460, 2018.

AYDIN, F. Experimental investigation of thermal expansion and concrete strength effects on FRP bars behavior embedded in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 1 – 8, 2018.

BAENA, M.; TORRES, L.; TURON, A.; BARRIS, C. Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test. **Composites: Part B**, v.40, p. 784 – 797, 2009.

BAENA, M.; TORRES, LI.; TURON, A.; MIAS, C. Analysis of cracking behaviour and tension stiffening in FRP reinforced concrete tensile elements. **Composite: Part B**, v. 45, p. 1360 – 1367, 2013.

BENMOKRANE, B.; MANALO, A.; BOUHET, J. C.; MOHAMED, K.; ROBERT, M. Effects of diameter on the durability of glass fiber-reinforced polymer bars conditioned in alkaline solution. **Journal of Composites for Construction**, v. 21, p. 1 – 12, 2017.

BENMOKRANE, B.; WANG, P.; TON-THAT, T. M.; RAHMAN, H.; ROBERT, J. F. Durability of glass fiber-reinforced polymer reinforcing bars in concrete environment. **Journal of Composites for Construction**, v. 6, p. 143 – 153, 2002.

BENMOKRANE, B.; ALI, A. H.; MOHAMED, H. M.; ELSAFTY, A.; MANALO, A. 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, 2017.

BORSOI, C.; ZATTERA, A. J.; FERREIRA, C. A. Effect of cellulose nano whiskers functionalization with polyaniline for epoxy coatings. **Applied Surface Science**, v. 364, p. 124 – 132, 2016.

BRITISH STANDARD. **BS EN 12504** – Testing concrete – Part. 4: Determination of ultrasonic pulse velocity, London, United Kingdom, 2004.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION/NATIONAL STANDARD OF CANADA – **CAN/CSA-S806**: Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers, Toronto, Canada, 2012.

CERONI, F. et al. Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, p. 857 – 868, 2006.

CORREIA, J. R.; GOMES, M. M.; PIRES, J. M.; BRANCO, F. A. Mechanical behaviour of pultruded glass fibre reinforced polymer composites at elevated temperature: Experiments and model assessment. **Composite Structures**, v. 98, p. 303 – 313, 2013.

COSENZA, E.; MANFRADI, G.; REALFONZO, R. Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete. **Journal of Composites for Construction**, v. 1, p. 40 – 51, 1997.

COUSIN, P.; HASSAN, M.; VIJAY, P. V.; BENMOKRANE, B. Chemical resistance of carbon, basalt and glass fibers used in FRP reinforcing bars. **Journal of Composite Materials**, v. 53, p. 3651 – 3670, 2019

CHEN, Y.; DAVALOS, J. F.; RAY, I.; KIM, H. Y. Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures. **Composites Structures**, v. 78, p. 101 – 111, 2007.

CHIN, J. W.; NGUYEN, T.; AOJADI, K. Effects of environmental exposure on fiber-reinforced plastic (FRP) materials used in construction. **Journal of Composites Technology & Research**, v. 19, p. 205 – 213, 1997.

CHIN, J. W.; AOJADI, K.; HAIGHT, M. R.; HUGHES, W. L.; NGUYEN, T. 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, p. 282 – 297, 2001.

CHIN, J. W.; NGUYEN, T.; AOUADI, K. Sorption and diffusion of water, salt water, and concrete pore solution in composite matrices. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 71, p. 483 – 492, 1999.

CHUNG, D. D. L. Review improving cement-based materials by using silica fume. **Journal of Materials Science**, v. 37, p. 673 – 682, 2002.

CRUZ, C. L.; LIMA, T. G.; SAMPAIO, N. A. S.; SILVA, J. W. J. Statistical Study of Corrosion Types in Constructions in South Region of Rio De Janeiro - Brazil. **Mechanics. Materials Science & Engineering**, v. 7, p. 1 – 13, 2017.

D'ANTINO, T.; PISANI, M.A.; POGGI, C. Effect of the environment on the performance of GFRP reinforcing bars. **Composites Part B: Engineering**, v. 141, p. 123 – 136, 2018.

DE PAOLI, M. A. **Degradação e Estabilização de Polímeros**. p. 286, 2009.

DYBEL, P.; WALACH, D. Influence of silica fume content on bond behaviour of reinforcement in HPSCC. **Magazine of Concrete Research**, v. 70, p. 973 – 983, 2018.

DWAIKAT, M. B.; KODUR, V. K. R. Hydrothermal model for predicting fire-induced spalling in concrete structural systems. **Fire Safety Journal**, v. 44, p. 425 – 434, 2009.

EL HASSAN, H.; MAADAWY, T. E. Microstructure characteristics of GFRP reinforcing bars in harsh environment. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2019, p. 1 – 20, 2019.

ELLIS, D. S.; TABATABAI, H.; NABIZADEH, A. Residual tensile strength and bond properties of GFRP bars after exposure to elevated temperatures. **Materials**, v. 11, p. 1 – 14, 2018.

FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON. **FIB Model Code for Concrete Structures**, Switzerland, 2010.

FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON – **FIB Bulletin 40**: FRP reinforcement in RC structures, Switzerland, 2007.

FERGANI, H.; BENEDETTI, M. D.; OLLER, C. M.; LYNSDALE, C.; GUADAGNINI, M. Durability and degradation mechanisms of GFRP reinforcement subjected to severe environments and sustained stress. **Construction and Building Materials**, v. 170, p. 637 – 648, 2018.

FERNANDES, B.; GIL, A. M.; BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F. Microstructure of concrete subjected to elevated temperatures: physical-chemical changes and analysis techniques. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 10, p. 838 – 863, 2017.

FORNARI JUNIOR, C. C. M. **Fibras vegetais para compósitos poliméricos**. 1 ed. Editus, 2017.

GANGARAO, H. V. S.; TALY, N.; VIJAY, P. V. **Reinforced concrete design with FRP composites**, CRC Press, v. 1, 2007.

GARAY, A. C.; PAESE, L. T.; SOUZA, J. A.; AMICO, S. C. Studies on thermal and viscoelastic properties of vinyl ester resin and its composites with glass fiber. **Revista Matéria**, v. 20, p. 64 – 71, 2015.

GOORANORIMI, O.; SUARIS, W.; DAUER, E.; NANNI, A. Microstructural investigation of glass fiber reinforced polymer bars. **Composites Part B**, v. 110, p. 338 – 395, 2017.

GONÇALVES, J. F. G. **Aderência de varões GFRP no betão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade da Madeira, 2013.

GRIBNIAK, V.; RIMKUS, A.; TORRES, L.; JAKSTAITE, R. Deformation analysis of reinforced ties: Representative geometry. **International Federation for Structural Concrete**, v. 1, p. 1 – 15, 2017.

HELEBRANT, A.; HRADECKA, H.; HOLUBOVA, B.; BRAZDA, L.; NETUSILOVA M.; ZLAMALOVA-CILOVAM, Z. Kinetics of processes modeling corrosion of glass fibers mixed into concrete. **Ceramics–Silikaty**, v. 61, p. 163 – 171, 2017.

HOLLAWAY, L. C. 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, p. 2419 – 2445, 2010.

HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; QUARCIONE, V. A.; MEDEIROS, M. H. F. Pozzolanic activity of mineral additions to Portland cement (Part I): Pozzolanic activity index with lime (PAI), X-ray diffraction (XRD), thermogravimetry (TG/DTG) and modified Chapelle. **Revista Matéria**, v. 22, p. 1 – 18, 2017.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 1920** – Testing concrete – Part. 12: Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation method, Geneva, Switzerland, 2015.

ISIS, Canada. **Design 3: Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers**. Canada, 2007.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – **JSCE**: Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforced materials, 1997.

JIA, D.; GUO, Q.; MAO, J.; LV, J.; YANG, Z. Durability of glass fibre-reinforced Polymer (GFRP) bars embedded in concrete under various environments. I: Experiments and analysis. **Composite Structures**, v. 234, p. 1 – 12, 2020.

KAMAL, A. S. M.; BOULFIZA M. Durability of GFRP rebars in simulated concrete solutions under accelerated aging conditions. **Journal of Composites for Construction**, v. 15, p. 473 – 481, 2011.

KATZ, A.; BERMAN, N.; BANK, L. C. Effect of high temperature on bond strength of FRP rebars. **Journal of Composites for Construction**, v. 73, p. 73 – 81, 1999.

KOLLES, R.; CHANG, S.; XI, Y. Fiber-reinforced polymer bars under freeze-thaw cycles and different loading rates. **Journal of Composites Materials**, v. 41, p. 5 – 25, 2017.

KUTZ, M. **Handbook of Environmental Degradation of Materials**, William Andrew, 2 ed, p. 936, 2013.

LEAL, A. S. C.; SILVA, S. M. L.; ARAÚJO, C. J. Thermomechanical behaviour of active composites prepared with epoxy/organoclay nanocomposites and Ni-Ti shape memory alloy wires. **Polímeros**, v. 22, p. 134 – 141, 2012.

LEVY, F. N.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: Ciência e tecnologia**. 1 ed. Edgard Blucher, 2006.

LI, C.; XIAN, G.; LI, H. Water Absorption and Distribution in a Pultruded Unidirectional Carbon/Glass Hybrid Rod under Hydraulic Pressure and Elevated Temperatures. **Polymers**, v. 10, p. 76 – 92, 2018.

LOTTHENBACH, B.; DURDZINSKI, P.; DE WEERDT, K. Thermogravimetric analysis, in: Scrivener, K.; Snellings, R.; Lothenbach, B. (Eds.). **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. CRC Press, Boca Raton, p. 177 – 212, 2016.

LU, C.; YANG, Y.; HE, L. Mechanical, and durability properties of GFRP bars exposed to aggressive solution environments. **Science and Engineering of Composite Materials**, v. 28, p. 11 – 23. 2021.

MA, Q.; GUO, R.; ZHAO, Z.; LIN, Z.; HE, K. Mechanical properties of concrete at high temperature – A review. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 371 – 383, 2015.

MALUK, C.; BISBY, L.; TERRASI, G.; GREEN, M. Bond strength of CFRP and steel bars in concrete at elevated temperature. **American Concrete Institute**, v. 297, p. 1 – 36, 2011.

MALLICK, P. K. **Composites Engineering handbook**. Dearborne - Michigan: Marcel Dekker, Inc, 1997. ISBN 0-8247-9304-8.

MANALO, A.; MARANAN, G.; BENMOKRANE, B.; COUSIN, P.; ALAJARMEH, O.; FERDOUS, W.; LIANG, R.; HOTA, G. Comparative durability of GFRP composite reinforcing bars in concrete and in simulated concrete environments. **Cement and Concrete Composites**, v. 109, p. 1 – 14, 2020.

MARANAN, G. B. et al. Behavior of concentrically loaded geopolymer-concrete circular columns reinforced longitudinally and transversely with GFRP bars. **Engineering Structures**, v. 117, p. 422 – 436, 2016.

MARTIN, R. **Ageing of Composites**, Woodhead Publishing, 1 ed, 544 p, 2008.

MARTINS, M. P.; RANGEL, C. S.; AMARIO, M.; LIMA, J. M. F.; LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D. Modelling of tension stiffening in reinforced recycled concrete. **Ibracon Structures and Material Journal**, v. 13, p. 1 – 21, 2020.

MARTYNOVA, E.; CEBULLA, H. Glass Fibers. In: MAHLTIG, B.; KYOSEV, Y. **Inorganic and Composite Fibers**, Elsevier, p. 131 – 163, 2018.

MAXWELL, A. S.; BROUGHTON, W. R.; DEAN, G.; SIMS, G. D. Review of accelerated ageing methods and lifetime prediction techniques for polymeric materials. **NPL Report DEPC MPR**, n.16, p.1 – 84, 2005.

MEET, S; CHOUDHURY, T.; NAVEEN, K. Investigating the nonlinear performance of corroded reinforced concrete beams. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 1 – 13, 2021.



MEMON, S. A.; SHAH, S.F.A.; KHUSHNOOD, R. A.; BALOCH, W. L. Durability of sustainable concrete subjected to elevated temperature – A review. **Construction and Building Materials**, v. 199, p. 435 – 455, 2019.

MICELLI, F.; NANNI, A. Durability of FRP rods for concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 18, p. 491 – 503, 2004.

MICELLI, F.; AIELLO, M. A. Residual tensile strength of dry and impregnated fibres after exposure to alkaline environments. **Composites Part B**, v. 159: p. 490 – 501, 2019.

MICELLI, F.; CORRADI, M.; AIELLO, M. A.; BORRI, A. Properties of Aged GFRP Reinforcement Grids Related to Fatigue Life and Alkaline Environment. **Applied Sciences**, v. 7, p. 1 – 13, 2017.

MOHAMED, O. A.; AL HAWAT, W.; KESHAWARZ, M. Durability and mechanical properties of concrete reinforced with basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars: Towards sustainable infrastructure. **Polymers**, v. 13, p. 1 – 23, 2021.

MOURA, R. C. A.; RIBEIRO, D. V.; LIMA, P. R. L. Mechanical damage assessment of GFRP rebars with different resins due to hydrothermal aging, **Materials Research**, v. 24, p. 1 – 13, 2021.

MOON, D. Y.; OU Y. C.; ROH, H. Interlaminar shear capacity of thermally damaged GFRP under alkaline concrete environment. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 105 – 114, 2017.

MOREIRA, W. **Compósitos 5 - Alto desempenho** - Capítulo 1. Almaco, 2013.

MONTAIGU, M.; ROBERT, M.; AHMED, E. A.; ASCE, M.; BENMOKRANE, B. 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, p. 176 – 187, 2013.

MONTEIRO, P. J. M.; GJORV, O. E.; MEHTA, P. K. Effect of condensed silica fume on the steel-concrete bond. **ACI Materials Journal**, v. 19, p. 114 – 123, 1989.

NAJAFABADI, E. P.; OSKOUEI, A. V.; KHANEGHAHI, M. H.; SHOAEI, P.; OZBAK-KALOGLU, T. The tensile performance of FRP bars embedded in concrete under elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 1138 – 1152, 2019.

NANNI, A.; DE LUCA, A.; ZADEH, H. J. **Reinforced concrete with FRP bars: Mechanics and Design**, CRC Press, 2014.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL – **DT 203**: Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-reinforced Polymer Bars, Rome, Italy, 2006.

NASER, M. Z.; HAWILEH, R. A.; ABDALLA, J. A. Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review. **Engineering Structures**, v. 198, p. 2419 – 2445, 2019.

NAYAL, R.; RASHEED, H. A. Tension stiffening model for concrete beams reinforced with steel and FRP bars. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 18, p. 831 – 841, 2006.

PADMAVATHI, S. V.; KARBHARI, M. **Hygrothermal Effects on Durability and Moisture Kinetics of Fiber-Reinforced Polymer Composites**. (No. FHWA/CA/ES-07/01). California. Dept. of Transportation. Division of Engineering Services, 2006.

PAN, Y.; YAN, D. Study on the durability of GFRP bars and carbon/glass hybrid fiber reinforced polymer (HFRP) bars aged in alkaline solution. **Composites Structures**, v. 261, p. 1 – 14, 2021.

PANSART, S. **Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications: 6**. Prepreg processing of advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites. Elsevier Inc, 2013.

PAPE, P. G. Adhesion Promoters: Silane Coupling Agents. **Applied Plastics Engineering Handbook**, Elsevier, 2011.

PORTNOV, G.; BAKIS, C. E.; LACKEY, E.; KULAKOV, V. FRP reinforced bars – designs and methods of manufacture. **Mechanics of Composite Materials**, v. 49, p. 381 – 400, 2013.

RAY, B. C.; RATHORE, D. 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, 2014.

RIBEIRO, D. V. Estrutura dos poros e mecanismos de transporte no concreto. In: RIBEIRO, D. V. **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto Armado**: Teoria, Controle e Técnicas de Análise e Intervenção, Cap. 3, p.33-95, 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

ROBERT, M.; BENMOKRANE, B. Behaviour of GFRP reinforcing bars subjected to extreme temperatures. **Journal Composites for Construction**, v. 14, p. 353–360, 2010.

ROBERT, M.; BENMOKRANE, B. 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, 2013.

ROSA, I. C., FIRMO, J. P., CORREIA, J. R., BARROS, J. A. O. Bond behaviour of sand coated GFRP bars to concrete at elevated temperature – Definition of bond vs. slip relations. **Composites Part B: Engineering**, v. 160, p. 329 – 340, 2019.

ROSA, I.; SANTOS, P.; FIRMO, J. P.; CORREIA, J. R. Fire behaviour of concrete slab strip s reinforced with sand coated GFRP bars. **Composites Structures**, v. 244, p. 1 – 15, 2020.

ROSA, I. C.; FIRMO, J. P.; CORREIA, J. R.; MAZZUCA, P. Influence of elevated temperatures on the bond behaviour of ribbed GFRP bars in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 122, p. 1 – 14, 2021.

SAAFI, M. Effect of fire on FRP reinforced concrete members. **Concrete Structures**, v. 58, p. 11 – 20, 2002.

SANTOS, B. S.; ALBUQUERQUE, D. D. M.; RIBEIRO, D. V. Effect of the addition of metakaolin on the carbonation of Portland cement concretes. **Ibracon Structures and Materials journal**, v. 13, p. 1 – 18, 2020.

SAWPAN, M. A.; MAMUN, A. A.; HOLDSWORTH, P. G. Long term durability of pultruded polymer composite rebar in concrete environment. **Materials and Design**, v. 57, p. 616 – 624, 2014.

SAWPAN, M.A. Effect of Alkaline Conditioning and Temperature on the Properties of Glass Fiber Polymer Composite Rebar. **Polymer Composites**, v. 38, p. 96 – 104, 2016.

SAWPAN, M.A. Shear properties and durability of GFRP reinforcement bar aged in seawater. **Polymer Testing**, v. 75, p. 312 – 320, 2019.

SOLYON, S.; DI BENEDETTI, M.; GUADAGNINI, M.; BALAZS, G. L. Effect of temperature on the bond behaviour of GFRP bars in concrete. **Composites Part B**, v. 183, p. 1 – 10, 2019.

SCHLICKE, D.; DORFMANN, E. M.; Fehling, E.; Tue, N. V. Calculation of maximum crack width for practical design of reinforced concrete. **Civil Engineering Design**, v. 3, p. 45 – 61, 2021.

SPAGNUOLO, S.; MEDA, A.; RINALDI, Z.; NANNI, A. Residual behaviour of glass FRP bars subjected to high temperatures. **Composite Structures**, v. 203, p. 886 – 893, 2018.

SPRINGER, G. S. Effects of temperature and moisture on sheet moulding composites. **Environmental Effects on Composite Materials**, G. S. Springer, ed., Technomic, Lancaster, v. 2, 1984.

THOMASON, J. L. Glass fibre sizing: A review. **Composites Part A**, v. 127, p. 1 – 24, 2019.

TU, J.; XIE, H.; GAO, K. 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, p. 1 – 18, 2020.

UPADHYAY, P. C.; MISHRA, A. Modified one-dimensional Fickian solution for moisture absorption in composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 9, p. 335 – 345, 1990.

VEMUGANTI, S.; CHENNAREDDY, R.; RIAD, A.; TAHA, M. M. R. Pultruded GFRP reinforcing bars using nanomodified vinyl ester. **Materials**, v. 13, p. 1 – 21, 2020.

VILANOVA, I.; TORRES, L.; BAENA, M.; GRIBNIAK, V. Experimental study of tension stiffening in GFRP RC tensile members under sustained load. **Engineering Structures**, v. 79, p. 390 – 400, 2014.

WANG, Y. C., WONG, P. M. H., KODUR, V. An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures. **Composite Structures**, v. 80, p. 131 – 140, 2007.

WANG, X.; ZHA, X. Experimental research on mechanical behavior of GFRP bars under high temperature. **Applied Mechanics and Materials**, v. 71–78, p. 3591 – 3594, 2011.

WANG, J.; GANGARAO, H.; LIANG, R.; LIU, W. Durability, and prediction models of fiber-reinforced polymer composites under various environmental conditions: A critical review. **Journal of Reinforced Plastics & Composites**, v. 35, p. 1 – 33, 2016.

WANG, Z.; ZHAO, X. L.; XIAN, G.; WU, G.; RAMAN, R. K. S.; AL-SAAD, S.; HAQUE, A. Long-term durability of basalt and glass fiber reinforced polymer (BFRP/GFRP) bars in seawater and sea sand concrete environment. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 467 – 489, 2017.

WEITSMAN, Y. J. **Fluid effects in polymers and polymeric composites**, Mechanical engineering series, Springer, 2012.

WISNOM, M. R.; JONES, M. I. Size effects in interlaminar tensile and shear strength of unidirectional glass fibre/epoxy. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 15, p. 2 – 15, 1996.

WON, J. P.; YOON, Y. N.; HONG, B. T.; CHOI, T. J.; LEE, S. J. Durability characteristics of nano-GFRP composites reinforcing bars for concrete structures in moist and alkaline environments. **Composite Structures**, v. 94, p. 1236 – 1242, 2012.

YU, Y.; LIU, S.; PAN, Y.; MIU, X.; LIU, J. Durability of glass fiber-reinforced polymer bars in water and simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 299, p. 1 – 12, 2021.

YIN, X.; LIU, Y.; MIAO, Y.; XIAN, G. Water absorption, hydrothermal expansion, and thermomechanical properties of a vinyl ester resin for fiber-reinforced polymer composites subjected to water or alkaline solution immersion. **Polymers**, v. 11, p. 3 – 11, 2019.

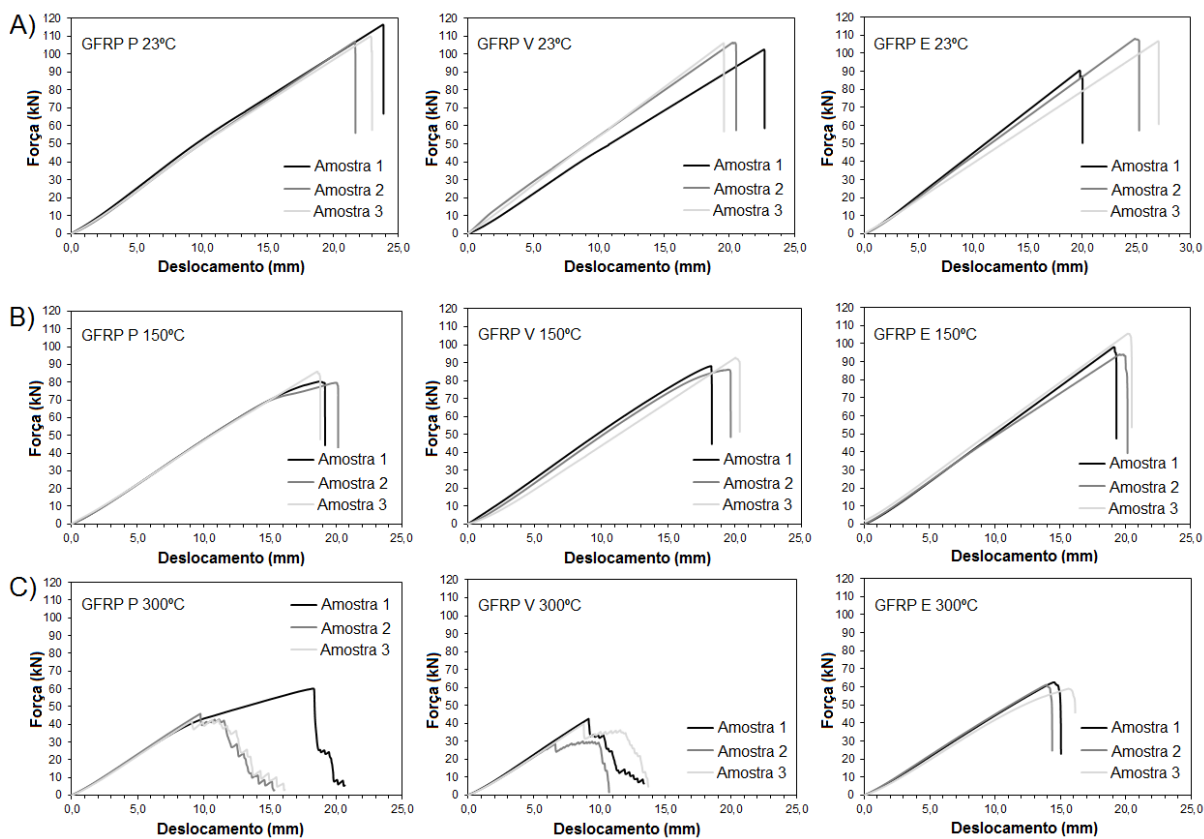
YOU, Y. J.; KIM, J. H. J.; KIM, S. J.; PARK, Y. H. Methods to enhance the guaranteed tensile strength of GFRP rebar to 900 MPa with general fiber volume fraction. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 54 – 62, 2015.

ZHU, H.G., LEUNG, C.K.L., KIM, J.K., LIU, M.Y. Degradation of glass fiber-reinforced plastic composites containing nano clay in alkaline environment. **Journal of Composite Materials**, v. 45, p. 2147 – 2156, 2011.

ZHU, H. G.; LIU, M. Y.; YUEN, R. K. K.; LEUNG, C. K. Y.; KIM, J. K. Thermal performance, and flame retardancy studies of vinyl ester and glass fiber reinforced plastic composites containing nano clay. **Journal of Composite Materials**, v. 48, p. 165 – 177, 2014.

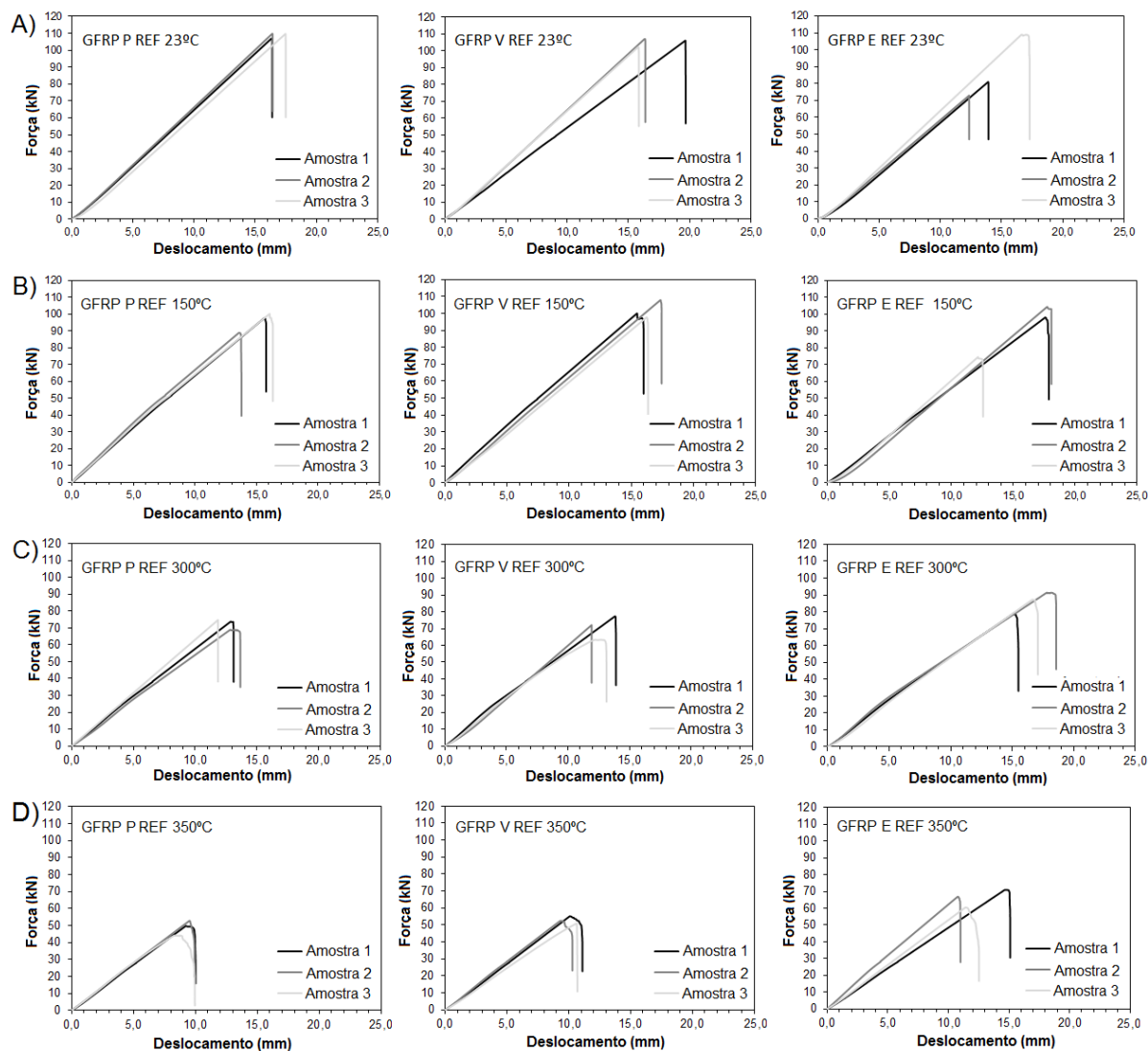
## APÊNDICE

Figura A1. Curvas de força em função do deslocamento para os vergalhões de GFRP submetidos a diferentes temperaturas: (A) 23°C, (B) 150°C e (C) 300°C.



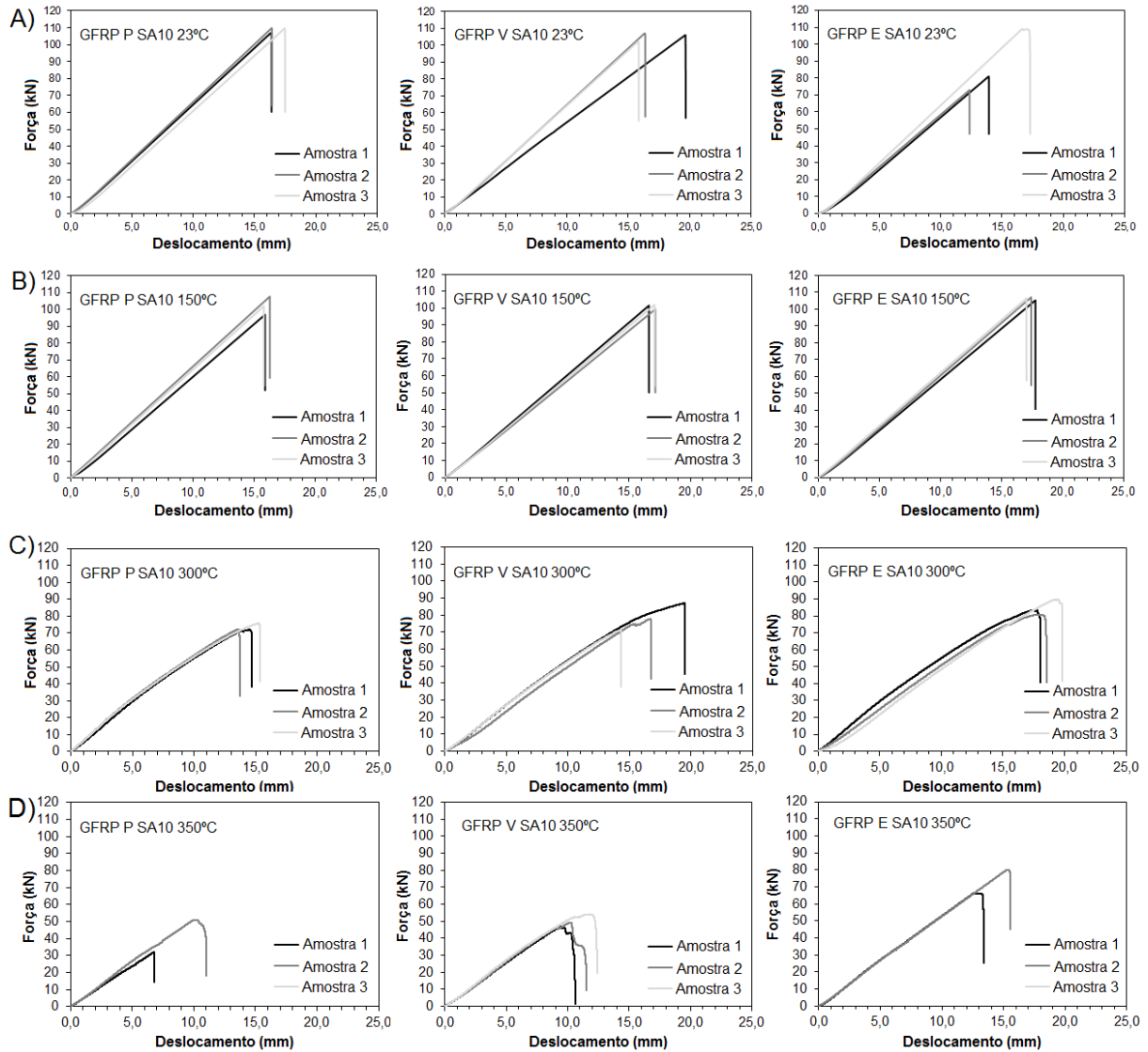
Fonte: O autor.

Figura A2. Relação entre a força aplicada e o deslocamento dos corpos de prova GFRP-C, com concreto de referência, REF, submetidos a diferentes temperaturas: (A) 23°C, (B) 150°C, (C) 300°C e (D) 350°C.



Fonte: O autor.

Figura A3. Relação entre a força média aplicada e o deslocamento dos corpos de prova GFRP-C, com concreto contendo 10% de sílica ativa, SA-10, submetidos a diferentes temperaturas: (A) 23°C, (B) 150°C, (C) 300°C e (D) 350°C.



Fonte: O autor.