

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM SISTEMAS DE
INFRAESTRUTURA URBANA**

LUIS FELIPE OLIVEIRA SANTOS

**ESTUDO DO EFEITO HIDROTÉRMICO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO
COM FIBRAS DE VIDRO**

**CAMPINAS
2024**

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM SISTEMAS DE
INFRAESTRUTURA URBANA

ESTUDO DO EFEITO HIDROTÉRMICO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS
DE CONCRETO ARMADO COM BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS
DE VIDRO

Texto apresentado ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Sistemas de Infraestrutura Urbana da Escola Politécnica, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como exigência para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Nádia Cazarim da Silva Forti

Coorientador: Prof. Dr. Daniel C. Taissum Cardoso

CAMPINAS
2024

Ficha catalográfica elaborada por Fabiana Rizziolli Pires CRB 8/6920
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

624.183423 Santos, Luis Felipe Oliveira
S237e

Estudo do efeito hidrotérmico no comportamento mecânico de vigas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras de vidro / Luis Felipe Oliveira Santos. - Campinas: PUC-Campinas, 2024.

143 f.: il.

Orientador: Nádía Cazarim da Silva Forti; Coorientador: Daniel C. Taissum Cardoso.

Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2024.

Inclui bibliografia.

1. Vigas de concreto. 2. Barras (Engenharia). 3. Fibras de vidro. I. Forti, Nádía Cazarim da Silva. II. Cardoso, Daniel C. Taissum III. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Escola Politécnica. Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. IV. Título.

23. ed. CDD 624.183423

LUIS FELIPE OLIVEIRA SANTOS

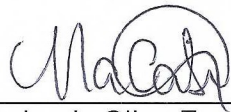
**ESTUDO DO EFEITO HIDROTÉRMICO NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO COM BARRAS DE POLÍMERO
REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Nádia Cazarim da Silva Forti

Dissertação defendida e aprovada em 27 de fevereiro de 2024 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Prof. Dr. Nádia Cazarim da Silva Forti
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila Jacintho
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

Documento assinado digitalmente

gov.br

RUAN CARLOS DE ARAUJO MOURA
Data: 11/03/2024 18:09:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ruan Carlos de Araújo Moura
Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC

AGRADECIMENTOS

A minha família, meus pais, Olivam e Jaiuza, meus irmãos, Maria Clara e Gabriel e minha noiva, Bruna, que sempre me incentivaram e apoiaram durante esse processo e continuam a incentivar e apoiar para os próximos.

A orientadora do meu trabalho, Prof^a. Dr^a. Nádia Cazarim da Silva Forti, pela orientação e por todo apoio, confiança e incentivo que foi dado durante a pesquisa.

Ao coorientador do meu trabalho, Prof. Dr. Daniel C. Taissum Cardoso, por todo apoio, suporte e incentivo dado a pesquisa.

A toda equipe dos laboratórios da PUC de Campinas e da PUC do Rio de Janeiro, por todo suporte e atenção durante a realização dos experimentos.

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

RESUMO

SANTOS, Luis Felipe Oliveira. Estudo do efeito hidrotérmico no comportamento mecânico de vigas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras de vidro. 2024. 143 f. Dissertação, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2024.

As barras de polímero reforçado com fibras (FRP do inglês *fiber-reinforced polymer*) são materiais compósitos formados pela união de fibras longas com uma matriz polimérica, encontradas no mercado brasileiro constituídas de resinas epóxi, poliéster ou vinil éster. Elas estão sendo utilizadas, nas últimas décadas, como reforço interno para estruturas de concreto, por apresentar boas propriedades mecânicas, um baixo peso específico, transparência eletromagnética e característica não corrosiva. Contudo, a matriz polimérica pode se degradar quando exposta a ambientes alcalinos, como a solução presente nos poros do concreto. Este trabalho abordou o uso de estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP do inglês *glass fiber-reinforced polymer*), que possuem matriz de poliéster. O foco foi o processo de degradação das barras devido a alcalinidade do concreto e os impactos no comportamento mecânico de vigas. Para isso, barras de GFRP foram submetidas a um processo de condicionamento acelerado por imersão em solução alcalina que simula a solução de poros do concreto à 30°C, 40°C e 60°C. Além disso, vigas armadas e barras de GFRP foram imersas em água à 60°C. Os processos de condicionamento acelerado foram realizados por até seis meses. Os resultados mostraram que barras de GFRP com resina poliéster apresentam uma alta absorção de água. Quanto aos ambientes de condicionamento, o ambiente alcalino foi mais severo para as barras em comparação ao ambiente aquoso, mas ambos com elevado nível de degradação. A retenção de resistência à tração das barras diminuiu com o incremento da temperatura, sendo de 46,92% em barras submetidas a uma temperatura de 60°C em ambiente alcalino por 90 dias. Um modelo preditivo baseado na relação de Arrhenius, mostraram que a resistência à tração reduz até um nível quase estável, independente da temperatura aplicada. As vigas reduziram sua capacidade de carga, 63,22% e 55,61% para vigas sem e com pré-fissura, respectivamente. O padrão de fissuração foi alterado após o condicionamento, indicando que a aderência barra-concreto foi afetada.

Palavras-Chave: Barras de GFRP, Condicionamento acelerado, Modelo preditivo baseado em Arrhenius, Fissuração, Ambiente alcalino.

ABSTRACT

SANTOS, Luis Felipe Oliveira. Study of the hydrothermal effect on the mechanical behavior of concrete beams reinforced with glass fiber-reinforced polymer bars. 2024. 143 f. Dissertation, Stricto Sensu Post-graduation Program in Urban Infrastructure Systems, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2024.

Fiber-reinforced polymer (FRP) bars are composite materials composed of long fibers impregnated in a polymeric matrix which can be epoxy, polyester, or vinyl ester. In recent decades they have been used as internal reinforcement for concrete structures due to their good mechanical properties, low specific weight, electromagnetic transparency, and non-corrosiveness. However, the polymer matrix may degrade when exposed to alkaline environments, such as the concrete pore solution. This work dealt with the application of concrete structures reinforced with glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars, which have a polyester matrix. The focus was on the degradation process of GFRP bars due to concrete alkalinity and the resulting impact on the mechanical behavior of concrete beams. To achieve this, GFRP bars underwent an accelerated conditioning process through immersion in a simulated alkaline solution of the concrete pore solution at 30°C, 40°C and 60°C. Additionally, concrete beams and GFRP bars were immersed in water at 60°C. The accelerated conditioning process lasted for a maximum of six months. The results exposed that GFRP bars with polyester matrix has a higher absorption rate. It is important to note that the alkaline environment is more severe to bar's behavior than the aqueous environment, however both with high degradation rate. The tensile strength retention decreases with the temperature increasing. The maximum tensile strength retention was 46,92% for bars in alkaline solution at 60°C for 90 days. A predictive model based on Arrhenius equation shows that the reduction in the tensile strength converges to a quasi-steady state, regardless of temperature. The load capacity and maximum deflection of reinforced-concrete beams decrease 63,22% and 55,61% for reinforced-beams without and with pre cracks, respectively. The cracking pattern changed after the conditioning procedure, suggesting that the concrete-bar adherence was affected.

Keywords: GFRP bars, Accelerated conditioning, Arrhenius-based predictive model, Cracking, Alkaline environment.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades mecânicas típicas de barras de FRP	20
Tabela 2: Propriedades de resinas poliéster, epóxi e vinil éster	25
Tabela 3: Propriedades de fibras de basalto, vidro e carbono	26
Tabela 4: Propriedades de fibras de vidro tipo A, C, E e S	27
Tabela 5: Teorias de adesão da interface fibra-matriz	28
Tabela 6: Resistência ao cisalhamento de barras de GFRP	32
Tabela 7: Redução de propriedades de barras de GFRP	38
Tabela 8: Redução de propriedades de diferentes barras de GFRP	40
Tabela 9: Degradação de barras de FRP em solução alcalina	41
Tabela 10: Referências de trabalhos de condicionamento acelerado	42
Tabela 11: Cenários de ensaios realizados por Yang et al. (2016)	52
Tabela 12: Redução de propriedades mecânicas de vigas	53
Tabela 13: Fatores de redução ambiental da ACI 440.1R (2015)	54
Tabela 14: Dimensionamento a flexão conforme a ACI 440.1R (2015)	55
Tabela 15: Fatores de minoração de resistência da barra (IBRACON/ABECE).....	56
Tabela 16: Fatores de redução ambiental (IBRACON/ABECE)	56
Tabela 17: Dimensionamento a flexão conforme a prática recomendada IBRACON/ABECE	57
Tabela 18: Traços de referência – método IPT/EPUSP	62
Tabela 19: Traços de referência para curvas de dosagem	62
Tabela 20: Resistência à compressão para curvas de dosagem	63
Tabela 21: Parâmetros de dimensionamento das vigas.....	68
Tabela 22: Resultados do ensaio de diâmetro efetivo das barras.....	71
Tabela 23: Resultados do ensaio de teor de fibra	71
Tabela 24: Detalhe dos corpos de prova para modelo preditivo de degradação	78
Tabela 25: Corpos de prova para condicionamento acelerado de barras de GFRP .	82
Tabela 26: Detalhe dos corpos de prova a serem ensaiados (vigas).....	83
Tabela 27: Resultados do ensaio de absorção de água à 50°C	86
Tabela 28: Resultados do ensaio de absorção de água à temperatura ambiente.....	86
Tabela 29: Resistência à tração - ambiente alcalino e aquoso	91
Tabela 30: Módulo de elasticidade - ambiente alcalino e aquoso	92
Tabela 31: Resultados do ensaio de cisalhamento por viga curta	94

Tabela 32: Resultados do ensaio de condicionamento acelerado à 30°C	95
Tabela 33: Resultados do ensaio de condicionamento acelerado à 40°C	95
Tabela 34: Resultados do ensaio de condicionamento acelerado à 60°C	95
Tabela 35: Coeficientes das curvas de retenção de resistência à tração.....	99
Tabela 36: Valores calculados de energia de ativação	102
Tabela 37: Resultados de energia de ativação de diferentes estudos	103
Tabela 38: Fatores de correção de tempo (TSF)	103
Tabela 39: Vida útil das barras de GFRP diretamente expostas à solução	105
Tabela 40: Resultados ensaios de caracterização - concreto de referência	105
Tabela 41: Resultados ensaios de caracterização – condicionadas	106
Tabela 42: Resultados do ensaio de flexão – vigas de referência	110
Tabela 43: Momentos de fissuração - DIC e cálculo analítico.....	115
Tabela 44: Estimativa de resistência à tração da armadura.....	118
Tabela 45: Resultados do ensaio de flexão após o condicionamento.....	123
Tabela 46: Estimativa de resistência à tração da armadura – vigas condicionadas	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Reforço de GFRP em barreiras de ponte.....	17
Figura 2: Esquema do processo de pultrusão	21
Figura 3: Processo de produção de fibras de vidro	26
Figura 4: Resposta típica tensão-deformação de uma barra de GFRP.....	30
Figura 5: Esquema do efeito "shear lag"	31
Figura 6: Curva típica de difusão em compósitos FRP	35
Figura 7: Efeito da temperatura no processo de degradação de barras de GFRP....	43
Figura 8: Efeito do ambiente alcalino nas barras de GFRP	43
Figura 9: Curvas de Arrhenius.....	48
Figura 10: Curvas de retenção de resistência à tração <i>versus</i> tempo.....	49
Figura 11: Curvas mestras	50
Figura 12: Esquema da metodologia de ensaios, objetivos e análises	61
Figura 13: Abatimento de tronco de cone: traço (a) pobre, (b) médio e (c) rico	63
Figura 14: Molde padrão utilizado para definir a massa específica do concreto	63
Figura 15: Relação água/cimento (x) <i>versus</i> logaritmo da resistência à compressão (y)	64
Figura 16: Relação água/cimento (x) <i>versus</i> massa de agregado (y)	64
Figura 17: Relação consumo de areia (C/1000) (x) <i>versus</i> massa de agregado (y) .	64
Figura 18: Curva granulométrica da areia	65
Figura 19: Curva granulométrica da brita	66
Figura 20: Corpo de prova em ensaio de compressão simples.....	67
Figura 21: Corpo de prova em ensaio de tração na flexão.....	67
Figura 22: Detalhamento das vigas (unidades em cm)	68
Figura 23: Procedimento de instrumentação das armaduras longitudinais das vigas	69
Figura 24: Vigas instrumentadas e concretagem	69
Figura 25: Processo de cura das amostras concretadas	70
Figura 26: Enrolamento helicoidal na superfície das barras de GFRP	70
Figura 27: Ensaio de diâmetro efetivo: (a) balança hidrostática e (b) corpos de prova	71
Figura 28: Ancoragem das barras de GFRP em aparato de madeira	72
Figura 29: Esquema de ensaio à tração (unidades em cm)	73

Figura 30: Ensaio de tração (a) corpo de prova e (b) extensômetro	73
Figura 31: Cisalhamento longitudinal – configuração de ensaio	74
Figura 32: Corpos de prova para ensaio de absorção (a) secos, (b) resfriados e (c) pesados.....	76
Figura 33: Ensaio de absorção (a) equipamento termorregulador e (b) corpos de prova	76
Figura 34: Proteção das extremidades das barras com resina epóxi.....	79
Figura 35: Tanque (a) barras imersas, (b) medição de pH e (c) medição de temperatura	79
Figura 36: Tanque de imersão e configuração de ensaio	80
Figura 37: Resistência e equipamento para medição do pH da solução.....	82
Figura 38: Tanques de imersão, configuração de ensaio e solução alcalina	83
Figura 39: Tanques de imersão, configuração de ensaio e vigas imersas.....	84
Figura 40: Ensaio de flexão à três pontos e região de interesse do DIC.....	84
Figura 41: Configuração para coleta de imagens para o DIC.....	85
Figura 42: Curva de absorção de água à temperatura ambiente	88
Figura 43: Curva de absorção de água à 50°C	89
Figura 44: Curvas médias de absorção e o efeito da imersão em água à 50°C	89
Figura 45: Ruptura de barras de GFRP e comportamento elástico-linear.....	91
Figura 46: Modo de falha devido ao cisalhamento longitudinal	93
Figura 47: Força <i>versus</i> Deslocamento – cisalhamento longitudinal.....	93
Figura 48: Curva tensão-deformação após condicionamento acelerado à 30°C	96
Figura 49: Curva tensão-deformação após condicionamento acelerado à 40°C	96
Figura 50: Curva tensão-deformação após condicionamento acelerado à 60°C	97
Figura 51: Perda da resina nas camadas de enrolamento da barra e alteração de cor	98
Figura 52: Curvas de retenção de resistência à tração <i>versus</i> tempo.....	99
Figura 53: Curva ajustada de retenção de resistência à tração <i>versus</i> tempo para 30°C	100
Figura 54: Curva ajustada de retenção de resistência à tração <i>versus</i> tempo para 40°C	100
Figura 55: Curva ajustada de retenção de resistência à tração <i>versus</i> tempo para 60°C	101
Figura 56: Curvas de Arrhenius.....	102

Figura 57: Curvas mestras para diferentes temperaturas	104
Figura 58: Ruptura da armadura após ensaio de flexão	106
Figura 59: Curvas Flecha <i>versus</i> Tempo – Viga V3-REF.....	107
Figura 60: Curvas Flecha <i>versus</i> Tempo – Viga V2-REF.....	107
Figura 61: Curvas Flecha <i>versus</i> Tempo – Viga V1-REF.....	108
Figura 62: Curvas Força <i>versus</i> Flecha (REF) – DIC e experimental	109
Figura 63: Ajuste inicial das curvas Força <i>versus</i> Flecha (REF)	109
Figura 64: Força <i>versus</i> Flecha - vigas de referência	110
Figura 65: Comportamento a flexão de quatro pontos de viga armada com GFRP.	111
Figura 66: Curvas de Aberturas de Fissura e Força <i>versus</i> Tempo – Viga V1-REF	112
Figura 67: Curvas de Aberturas de Fissura e Força <i>versus</i> Tempo – Viga V2-REF	112
Figura 68: Curvas de Aberturas de Fissura e Força <i>versus</i> Tempo – Viga V3-REF	113
Figura 69: Viga V1-REF - Início da fissuração e na ruptura	113
Figura 70: Viga V2-REF - Início da fissuração e na ruptura	113
Figura 71: Viga V3-REF - Início da fissuração e na ruptura	114
Figura 72: Curvas de Força <i>versus</i> Abertura de Fissura.....	114
Figura 73: Curvas Força <i>versus</i> Flecha – vigas referência	116
Figura 74: Curva Força <i>versus</i> Deformação das armaduras das vigas de referência	116
Figura 75: Curva Deformação da armadura <i>versus</i> Força	117
Figura 76: Comparativo do modo de ruptura das vigas.....	119
Figura 77: Curvas Flecha <i>versus</i> Tempo – Viga V1_NPF-3M.....	119
Figura 78: Curvas Flecha <i>versus</i> Tempo – Viga V2_NPF-3M.....	120
Figura 79: Curvas Flecha <i>versus</i> Tempo – Viga V3_PF-3M	120
Figura 80: Curvas Força <i>versus</i> Flecha (3M) – DIC e experimental.....	121
Figura 81: Ajuste inicial das curvas Força <i>versus</i> Flecha (3M)	121
Figura 82: Comparação das curvas Força <i>versus</i> Flecha	122
Figura 83: Curvas Força <i>versus</i> Flecha – vigas condicionadas	124
Figura 84: Comparação do início da fissuração das vigas	125
Figura 85: Comparação da fissuração das vigas na ruptura – vigas não pré-fissuras	125
Figura 86: Comparação da fissuração das vigas na ruptura – vigas pré-fissuras ...	126
Figura 87: Curva Força <i>versus</i> Deformação da armadura – comparação.....	127

Figura 88: Deformação da armadura <i>versus</i> Força – V1_NPF-3M	128
Figura 89: Curvas mestras e dados de imersão indireta	130

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Hipótese	15
1.2	Objetivo	16
1.2.1	Objetivo Principal	16
1.2.2	Objetivos Secundários	16
1.3	Justificativa	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO	19
2.1.1	Visão geral	19
2.1.2	Barras de GFRP	19
2.1.3	Degradação das barras de GFRP	33
2.1.4	Degradação de elementos de concreto armado com barras de GFRP	51
2.2	ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADOS COM GFRP SUBMETIDOS À ESFORÇOS DE FLEXÃO	53
2.2.1	Dimensionamento da armadura de flexão	53
2.2.2	Cálculo da flecha em vigas	57
3	METODOLOGIA	60
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL	60
3.1.1	Materiais e métodos de caracterização	61
3.1.2	Métodos de ensaio	75
3.2	ANÁLISE ESTATÍSTICA	85
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	86
4.1	Absorção de água pelas barras de GFRP	86
4.2	Condicionamento acelerado de barras de GFRP	90
4.2.1	Ensaio mecânicos: análise dos resultados	90
4.2.2	Modelo preditivo baseado na Lei de Arrhenius	98
4.3	Caracterização do comportamento mecânico do concreto	105
4.4	Comportamento a flexão das vigas armadas com barras de GFRP	106
4.4.1	Análise das vigas não submetidas ao condicionamento acelerado	106
4.4.2	Efeito hidrotérmico nas vigas armadas com barras de GFRP	118
5	CONCLUSÃO	131
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	132
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134

1 INTRODUÇÃO

Estruturas de concreto armado devem ser projetadas e construídas para que resistam a diferentes condições ambientais, de modo a garantir segurança e estabilidade durante toda sua vida útil (ABNT NBR 6118, 2014). A exposição a condições ambientais engloba, dentre outros: ciclos de molhagem e secagem, sais marinhos e congelamento e degelo (CHEN *et al.*, 2007; DONG *et al.*, 2020).

A dificuldade associada ao controle de durabilidade de estruturas aumenta proporcionalmente à agressividade do meio (LIBERATI; LEONEL; NOGUEIRA, 2014). Diferentes critérios para controle de durabilidade de estruturas de concreto armado com aço são estabelecidos pela ABNT NBR 6118 (2023). A norma estabelece classes de agressividade ambiental, restrições no fator água/cimento, resistência mínima à compressão do concreto e cobrimento mínimo de armadura.

Diversos levantamentos a respeito de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado são realizados ao redor do mundo. Uma causa comum de degradação é a corrosão das armaduras de aço. A alcalinidade do concreto cria uma fina camada de passivação na superfície das barras aço que as protege contra o processo corrosivo. Contudo, por exemplo, quando a concentração de cloretos está acima de um limite resistido, a camada de passivação é perdida, resultando na corrosão do material metálico (BASTIDAS-ARTEAGA *et al.*, 2011).

A corrosão das armaduras de aço, resulta em diferentes problemas estruturais. Por ser uma reação expansiva, ela provoca o aumento da fissuração no concreto e resulta em perdas na área de seção transversal do aço, diminuindo a capacidade de carga do elemento estrutural (LIBERATI; LEONEL; NOGUEIRA, 2014).

Neste cenário, a durabilidade de estruturas de concreto armado é uma grande preocupação para a infraestrutura urbana. A característica não corrosiva das barras de polímero reforçado com fibras (FRP, do inglês *fiber-reinforced polymer*) colocou esses materiais como uma alternativa ao reforço de aço em estruturas de concreto armado submetidas a ambientes agressivos (ESMAEILI *et al.*, 2020). Elas, têm sido utilizadas como um novo material de reforço para estruturas de concreto, substituindo ou substituindo parcialmente a armadura metálica (WU, Weiwei *et al.*, 2022).

As barras de FRP já foram aplicadas, com sucesso, em diferentes tipos de obras como: tubulações, tanques de armazenamento subterrâneos, fachadas de edifícios, componentes arquitetônicos, decks de pontes e estruturas de contenção a beira mar (ACI 440.9R, 2015). Entretanto, embora esses materiais se destaquem por não serem corrosivos, diferentes estudos mostram que suas propriedades mecânicas, como as resistências à tração e ao cisalhamento, podem reduzir significativamente quando expostos a condições como ambientes marinhos ou alcalinos (LU *et al.*, 2020).

Ambientes alcalinos possuem uma alta concentração de íons alcalinos e a degradação das barras de FRP nesses ambientes ocorre pela reação da matriz polimérica com a água. Essa reação resulta na formação de mais íons alcalinos no ambiente e, conseqüentemente, no aumento do pH no meio. Esses processos resultam em reações em cadeia, que podem, em certo nível de degradação, danificar as fibras. O resultado dessas reações são reduções de propriedades mecânicas das barras e dos elementos estruturais (WU, Weiwei *et al.*, 2022).

Este trabalho estudou o efeito hidrotérmico no comportamento estrutural de vigas armadas com barras de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP, do inglês *glass fiber-reinforced polymer*), com matriz de poliéster. O termo efeito hidrotérmico está relacionado às conseqüências na resposta das vigas devido à imersão em água sob elevada temperatura. As propriedades mecânicas de barras de GFRP condicionadas em solução alcalina simulando o ambiente interno do concreto também foram avaliadas, buscando-se associar a degradação das barras de GFRP com o comportamento à flexão das vigas.

1.1 Hipótese

- Barras de GFRP se degradam quando submetidas a ação de álcalis, como os da solução presente nos poros do concreto, afetando as propriedades mecânicas dos elementos estruturais.
- O ambiente condicionante afeta a taxa de degradação das barras.
- É possível prever, por meio de equações analíticas, a taxa de degradação ao longo do tempo.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo Principal

Este trabalho tem como objetivo analisar o efeito hidrotérmico em vigas de concreto reforçadas com barras de GFRP, com matriz de poliéster, mediante ensaios de condicionamento acelerado de barras e vigas. Espera-se contribuir com o desenvolvimento de normatizações nacionais e de construções seguras, duráveis e econômicas.

1.2.2 Objetivos Secundários

- Analisar o comportamento de difusão de água em barras de GFRP;
- Estimar a representatividade do ensaio de condicionamento acelerado das barras de GFRP por meio de um modelo preditivo baseado na Lei de Arrhenius;
- Analisar o efeito hidrotérmico no comportamento mecânico do concreto e comparar com amostras não condicionadas;
- Analisar o efeito da alcalinidade do concreto no comportamento mecânico de barras de GFRP e comparar com amostras não condicionadas;
- Analisar o efeito hidrotérmico no comportamento de vigas armadas com barras de GFRP e comparar com amostras não condicionadas.

1.3 Justificativa

A aplicação das barras de FRP em condições de serviço, geralmente, é associada à busca por maior durabilidade das estruturas com menor manutenção. Como exemplo pode-se citar um projeto desenvolvido na Universidade de Ryerson, Canadá, que adotou barras de GFRP como reforço para barreiras de pontes, conforme mostrado Figura 1. Sennah et al. (2018), relataram que, em termos mecânicos, foi observada uma grande margem de segurança para as barreiras, comparando os resultados experimentais com os valores especificados no código canadense de projeto de ponte rodoviária (“*Canadian Highway Bridge Design Code*”).

Contudo, embora as barras de FRP não sejam propensas a corrosão, elas podem sofrer degradação em alguns cenários de exposição ambiental, afetando seu desempenho mecânico a longo prazo. Alguns exemplos de condições de exposição, que podem resultar na degradação das barras de FRP, são: exposição a raios UV, ciclos de congelamento e descongelamento, ação de agentes químicos ou a

combinações de variados ambientes (MICELLI; NANNI, 2004). Dentre os principais fatores que prejudicam o desempenho mecânico das barras, estão o ambiente alcalino do concreto e o efeito da umidade (AFGC, 2023).



Figura 1: Reforço de GFRP em barreiras de ponte

Fonte: Sennah et al. (2018) - adaptada

Devido à baixa mobilidade dos álcalis no concreto, a velocidade de degradação das barras, geralmente, é menor em condições normais de serviço, o que impossibilita o seu estudo em um curto prazo. Desta forma, estudos laboratoriais são realizados por meio de ensaios de condicionamento acelerado (AFGC, 2023). Esses procedimentos são realizados pela imersão de corpos de prova em uma solução representativa, neste caso uma solução alcalina, sob ação de alta temperatura para acelerar o processo de difusão (ROLLAND *et al.*, 2021).

Investigar a durabilidade de barras de GFRP em ambiente alcalino é de grande importância para as aplicações desse material em construções, dado o contato direto da barra com o concreto. Esse estudo, permite conhecer o comportamento tanto das barras quanto das estruturas e, com isso, controlar e/ou mitigar os efeitos de degradação e aumentar a vida útil. Além disso, associado a procedimentos de condicionamento acelerado é possível avaliar, em um menor tempo, o efeito a longo prazo do ambiente simulado.

O tipo de matriz polimérica utilizada tem grande influência na degradação das barras. As matrizes formadas por resinas de poliéster são mais sensíveis ao processo de hidrólise alcalina, quando comparada com resinas epóxi e vinil éster (ROLLAND *et al.*, 2021). Essa hidrólise alcalina ocorre devido à alta concentração de grupos éster na sua composição química (AFGC, 2023).

Desta forma, este trabalho se propôs a estudar a durabilidade de barras de GFRP com matriz de poliéster, buscando compreender o processo de degradação devido à alcalinidade do concreto e quantificar as alterações nas propriedades mecânicas do material: resistência à tração, módulo de elasticidade e cisalhamento longitudinal; pois, as duas primeiras tem influência direta na resposta a flexão das vigas e a última indica a resistência da interface fibra-matriz, quantificando sua degradação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO

O objetivo dessa seção é apresentar as barras de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP do inglês *Glass Fiber-Reinforced Polymer*), em termos de aplicabilidade, composição, características mecânicas e, mais detalhadamente, de degradação do material devido a ação da água e de álcalis.

2.1.1 Visão geral

Após a Segunda Guerra Mundial, na década de 1940, houve um aumento elevado do uso de compósitos de polímero reforçado com fibras pela indústria, principalmente a aeroespacial, aproveitando a sua alta resistência e leveza. Por volta de 1960, esses materiais compósitos foram empregados como reforço de estruturas de concreto (ACI 440.1R, 2015).

O uso dos compósitos de FRP na construção civil está atrelado às vantagens que eles apresentam. Seu desempenho mecânico associado ao baixo peso específico, fácil manuseio, alta durabilidade e característica não corrosiva favorecem sua utilização como reforço para elementos de concreto. Sua característica não corrosiva é favorável para sua utilização em estruturas expostas a condições como: píeres costeiros e estruturas em contato com água marinha (BLAZNOV *et al.*, 2017).

Apesar dessas vantagens, barras de FRP, como às de polímero reforçado com basalto (BFRP do inglês *Basalt Fiber-Reinforced Polymer*) e de vidro (GFRP), apresentam comportamento frágil, perda de resistência em regiões dobradas, resultam em consideráveis deformações devido ao baixo módulo de elasticidade (comparado com as barras de aço) e suas propriedades podem ser afetadas por condições de temperatura, umidade, exposição a raios ultravioletas e exposição a ambientes alcalinos (IBRACON, 2021).

2.1.2 Barras de GFRP

Barras de FRP são materiais anisotrópicos formados pela união de fibras e uma matriz polimérica (resultante do processo de cura de uma resina). Individualmente eles não apresentam propriedades estruturais, mas, quando combinados, adquirem propriedades físicas e mecânicas desejáveis (ACI 440.1R,

2015). O comportamento das barras depende da coesão entre esses materiais, pois a matriz atua unindo e distribuindo as cargas solicitantes entre as fibras e protegendo-as contra impactos e danos devido a condições ambientais (BENMOKRANE *et al.*, 2017).

Fatores como volume de fibra, tipo de fibra, tipo de resina e orientação das fibras na matriz polimérica exercem papel fundamental no comportamento e nas propriedades mecânicas das barras de FRP. A anisotropia promove uma alta resistência à tração na direção das fibras, contudo, afeta negativamente outras propriedades, como a resistência ao cisalhamento (ACI 440.1R, 2015; NETO; PARDINI, 2006).

A Tabela 1 apresenta algumas propriedades mecânicas de barras de polímero reforçado com fibras, como: vidro, carbono e basalto (GFRP, CFRP e BFRP, respectivamente). Nas próximas seções serão discutidas algumas propriedades desses materiais: temperatura de transição vítrea, resposta à tração e cisalhamento.

Tabela 1: Propriedades mecânicas típicas de barras de FRP

Fonte: IBRACON (2021) - adaptada

TIPO DE BARRA		GFRP	CFRP	BFRP
Resistência à tração	MPa	800	1400	800
Módulo de elasticidade	GPa	50	130	50
Deformação máxima	%	1,6	1,6	1,6

As barras de FRP são produzidas com fibras de alta resistência e rigidez, dispostas em posições e orientações predeterminadas, embebidas em uma matriz polimérica (ACI 440.1R, 2015). Segundo EL-FIKY *et al.* (2022), compósitos de FRP podem ser fabricados utilizando diferentes técnicas, como: enrolamento de filamentos, pultrusão e fundição centrífuga:

- O método de enrolamento de filamentos é mais comum para criar formas tubulares ocas, na qual fibras contínuas impregnadas com resina são enroladas em torno de um mandril giratório;
- A pultrusão é um método adequado para elementos de seção transversal uniforme, como tubos, barras, vigas e canais;
- A fundição centrífuga é um método adequado para formas cilíndricas, como tubos, postes e tubulações. Forças centrífugas

distribuem e compactam a resina e o reforço contra a parede de um molde giratório.

Barras de FRP são fabricadas pelo método de pultrusão, que consiste em impregnar um conjunto de fios contínuos de fibra em uma matriz polimérica, puxando-as através de um banho de resina líquida e por um molde aquecido, onde ocorre a cura. A Figura 2 apresenta o processo de pultrusão que é utilizado para fabricação das barras (AFGC, 2023; RUIZ EMPARANZA et al., 2022).

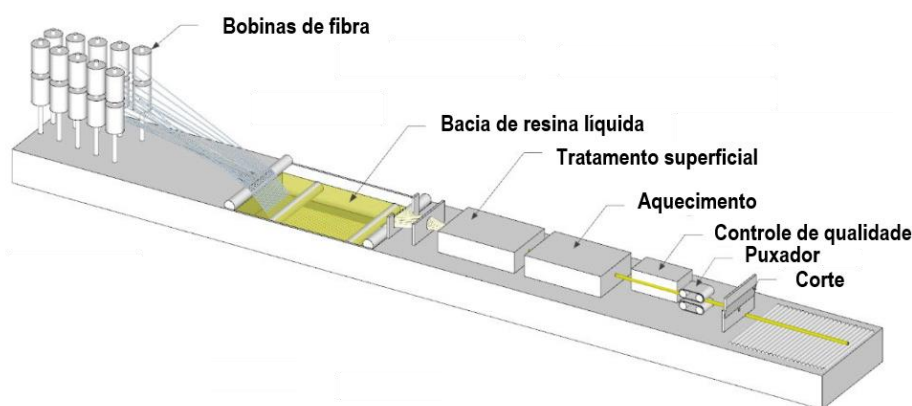


Figura 2: Esquema do processo de pultrusão

Fonte: AFGC (2023) – adaptada

Podem ser utilizados diferentes tipos de fibras e resinas para a fabricação das barras de GFRP, o que permite uma grande variedade de propriedades mecânicas e físicas. Esses materiais podem ser produzidos com resinas como o epóxi, poliéster e vinil éster e com fibras de vidros tipo E, ECR e AR (MOURA; RIBEIRO; LIMA, 2021).

A ASTM D7957/D7957M (2022) orienta que as barras de polímero reforçado com fibras, que apresentem matrizes de resina termofixa do tipo vinil éster, podem ser utilizadas quando atenderem aos requisitos físicos e de durabilidade indicados na mesma. Além disso, a norma restringe o tipo de resina, apontando que a matriz não pode conter poliéster. Benmokrane et al. (2017) citam que barras de GFRP fabricadas com resina de poliéster e fibras de vidro, geralmente, estão ligadas ao uso em estruturas temporárias, nas quais o custo do material é mais importante do que a durabilidade.

Resinas do tipo vinil éster apresentam menor quantidade de grupos éster em sua composição química em relação as resinas de poliéster, e apresentam, por

exemplo, menor degradação devido a hidrólise e a presença de íons hidroxila (OH^-) em comparação com matrizes de poliéster (BENMOKRANE *et al.*, 2017).

2.1.2.1 Composição das barras de GFRP

Barras de FRP são materiais compósitos, aqui definidos, como um material resultante da união de uma matriz polimérica com fibras contínuas (MARINUCCI, 2011). Quatro tipos principais de fibras podem ser utilizadas para a fabricação dessas barras: carbono, aramida, vidro e basalto. Essas fibras possuem contribuição significativa para as características mecânicas do material compósito (AFGC, 2023).

Essa seção é dividida em matriz polimérica, fibras de vidro e interface fibra-matriz, onde serão apresentadas definições e características sobre a composição das barras de GFRP.

2.1.2.1.1 Matriz polimérica

O termo “matriz polimérica” se refere à mistura de resinas e agentes de cura que, quando curados, formam um material sólido com boas propriedades mecânicas e químicas. As resinas são macromoléculas nomeadas de polímeros, ou seja, é uma substância formada pela união de pequenas moléculas, os monômeros (MARINUCCI, 2011).

A formação das macromoléculas acontece devido à presença de pontos de reatividade, onde ocorre união entre monômeros por ligação covalente. O processo de formação da macromolécula é chamada de polimerização (MARINUCCI, 2011). As matrizes poliméricas são de natureza orgânica e resultado da cura de resinas termofixas ou termoplásticas. As resinas termofixas são as mais utilizadas na fabricação de barras de polímero reforçados com fibras devido a diferentes fatores, como a sua melhor compatibilidade com o processo de pultrusão (AFGC, 2023).

Os polímeros classificados como termoplásticos são materiais que podem ser remodelados a altas temperaturas (AFGC, 2023), ou seja, eles se fundem em condições de elevada temperatura e pressão, mas endurecem quando resfriados. Alguns exemplos de polímeros termoplásticos são o poliestireno e o polipropileno. Em relação aos polímeros termofixos (ou termorrígidos), são materiais que, em geral, se apresentam no estado líquido em baixas temperaturas; quando combinados com agentes de cura, formam materiais sólidos com melhores propriedades mecânicas,

comparativamente aos polímeros termoplásticos. Alguns exemplos de polímero termofixos são as resinas epóxi, poliéster e vinil éster (MARINUCCI, 2011).

O processo de cura que envolve a formação da matriz polimérica pode ser dividido em quatro etapas: tempo de gel, pico exotérmico, tempo de desmoldagem e tempo de cura. O tempo de gel se refere a um período com baixa liberação de calor, onde a resina se encontra em estado líquido, o que permite a impregnação das fibras. Após esse período, há uma alta liberação de calor, onde o material altera seu estado físico. O tempo de desmoldagem e o tempo de cura diferem, pois, no primeiro, o material está em estado sólido podendo ser retirado do molde, mas ainda não completamente curado para atingir suas propriedades de resistência mecânica e química (MARINUCCI, 2011).

Benmokrane et al. (2017) citam que combinações de fibras de vidro do tipo E ou ECR e resinas do tipo epóxi ou vinil éster são as mais comuns para a fabricação de barras para a aplicação em estruturas de concreto, devido às boas propriedades mecânicas e características de durabilidade. Eles ainda descrevem que a norma canadense CSA S807-10 classifica as resinas epóxi e vinil éster como materiais de alta durabilidade, enquanto as resinas poliéster isoftálicas são classificadas como materiais de durabilidade moderada.

As resinas epóxi possuem uma grande variedade de formulações e de agentes de cura, o que permite obter matrizes poliméricas que possam atender a diferentes aplicações, como a fabricação de compósitos. A cura dessas resinas resulta em um material com boas propriedades mecânicas, alta temperatura de transição vítrea e alta resistência química. Contudo, possuem um elevado custo em relação as resinas poliéster e vinil éster (MARINUCCI, 2011).

As resinas poliéster fazem parte de uma família de polímeros originados de ácidos saturados, ácidos insaturados e glicóis ligados por grupos de éster. A classificação das resinas poliéster é baseada em seus constituintes, ou seja, se um dos constituintes for insaturado, a resina poliéster resultante será insaturada (NETO; PARDINI, 2006). Além disso, de acordo com o ácido saturado utilizado, tem-se a formação de resinas poliéster ortoftálica ou isoftálica. Elas apresentam boas propriedades mecânicas e físicas (MARINUCCI, 2011).

O uso do ácido isoftálico para a formação da resina poliéster permite estruturar polímeros com cadeias mais longas, em comparação com os polímeros formados com ácido ortoftálico. A maior cadeia molecular promove às resinas poliéster isoftálicas melhores resistências mecânica, química e térmica (MELO, 2013).

Uma característica importante para avaliar a durabilidade das barras de FRP é o seu comportamento quando imerso em água, que será aprofundado em seções posteriores. Carra e Carvelli (2015), a partir dos seus ensaios, verificaram que barras com resina poliéster isoftálico foram menos afetadas após imersão em água à 60°C, em comparação com barras com resina poliéster ortoftálico. Os autores descrevem que a temperatura elevada possibilitou observar a degradação do poliéster durante o período de imersão. Sendo essa degradação mais evidente no poliéster ortoftálico, que possui menor resistência química.

As resinas vinil éster são um tipo específico de resina poliéster insaturado (PAÇZKOWSKI; PUSZKA; GAWDZIK, 2022). São polímeros que combinam as propriedades químicas, mecânicas e térmicas das resinas epóxi com a cura rápida das resinas de poliéster insaturado (ALIA *et al.*, 2018). Elas apresentam resistência química elevada, podendo ser aplicadas em ambientes quimicamente desfavoráveis (MARINUCCI, 2011), além de demonstrarem maior resistência à ação da água, alta tenacidade, alto módulo de elasticidade e propriedades de isolamento térmico e elétrico (ALIA *et al.*, 2018).

Carra e Carvelli (2015) também verificaram o comportamento de barras com resina vinil éster imersas em água à 60°C, constando o melhor comportamento em comparação com as resinas poliéster. Os autores citam que resinas poliéster possuem maior permeabilidade em comparação com as resinas vinil éster.

Diferentemente das resinas poliéster, as insaturações presentes na composição química das resinas vinil éster estão localizadas somente nas extremidades da cadeia molecular, ou seja, apresentando menos pontos reativos, o que as torna quimicamente mais resistentes. A menor quantidade de pontos reativos na cadeia molecular das resinas vinil éster confere a esses materiais uma maior resistência a hidrólise durante a difusão de água, em comparação com as resinas poliéster (PAÇZKOWSKI; PUSZKA; GAWDZIK, 2022).

A Tabela 2 apresenta algumas propriedades físicas e mecânicas das resinas do tipo poliéster, vinil éster e epóxi, comparando as diferentes matrizes poliméricas que podem ser utilizadas para a fabricação das barras.

Tabela 2: Propriedades de resinas poliéster, epóxi e vinil éster

Fonte: AFGC (2023) - adaptada

Propriedade	Unidade	Poliéster	Vinil éster	Epóxi
Densidade	kg/m ³	1200 – 1400	1150 – 1350	1200 – 1400
Resistência à tração	MPa	34,5 – 104	73 – 81	55 – 130
Módulo de elasticidade na tração	GPa	2,1 – 3,45	3,0 – 3,5	2,75 – 4,10
Coeficiente de Poisson	%	0,35 – 0,39	0,36 – 0,39	0,38 – 0,40
Coeficiente de expansão térmica	(10 ⁻⁵ /°C)	55 – 100	50 – 75	45 – 65

2.1.2.1.2 Fibras de vidro

Fibras são materiais que apresentam pequeno diâmetro e grande comprimento. Elas são produzidas a partir de um processo de fiação por fusão, fiação úmida ou fiação a seco, podendo ser utilizadas como fibras contínuas, picadas ou na forma de partículas em uma matriz (NETO; PARDINI, 2006).

A formação dos fios de fibra de vidro envolve uma combinação de extrusão e atenuação do vidro fundido. O vidro flui por meio da gravidade para um forno de fusão para, posteriormente, ser transformado em fibras (THOMASON, 2019). A Figura 3 mostra o processo de formação dos fios de fibra, que tem início com a mistura das matérias primas em um forno de fusão e finalização com a produção das fibras. Após o processo de formação dos fios, as fibras recebem um acabamento superficial pelo processo de encimagem (NETO; PARDINI, 2006).

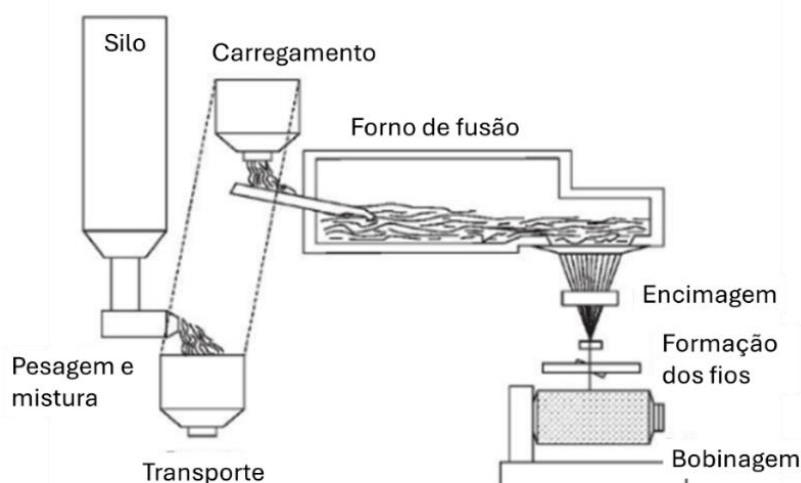


Figura 3: Processo de produção de fibras de vidro

Fonte: Neto e Pardini (2006) – adaptada

A encimagem ocorre com o uso de materiais lubrificantes ou agentes ligantes aplicados na superfície da fibra, que garante ao material a compatibilidade com a matriz polimérica (NETO; PARDINI, 2006).

As fibras de vidro como reforço para materiais compósitos poliméricos apresentam alta utilização na indústria de compósitos (THOMASON, 2019). Elas possuem propriedades mecânicas inferiores a outras fibras, mas sua boa relação custo-benefício as torna atraentes, sendo utilizadas na fabricação de barcos, automóveis, tanques de água e no reforço para materiais compósitos (RAMESH; PALANIKUMAR; REDDY, 2013).

A Tabela 3 apresenta algumas características físicas e mecânicas de fibras de basalto, vidro e carbono.

Tabela 3: Propriedades de fibras de basalto, vidro e carbono

Fonte: Colombo; Vergani; Burman (2012) – adaptada

Características	Fibra de basalto	Fibra de vidro		Fibra de carbono	
		E	S	Alta resistência	Alto módulo
Resistência à tração (MPa)	4840	3450	4580	3500	2500-4000
Módulo de elasticidade (MPa)	89000	72400	85500	240000	35000-650000
Alongamento na ruptura (%)	3,1	4,7	5,6	1,25	0,5
Densidade (g/cm ³)	2,8	2,6	2,5	1,75	1,95

Podem ser encontrados diferentes tipos de fibras de vidro, como fibras resistentes a químicos e a ambientes alcalinos, com elevada resistência mecânica e

resistente a altas temperaturas (MARINUCCI, 2011). Elas são designadas por fibras de vidro tipo A, que apresentam boa resistência química, C, que apresentam alta resistência a corrosão química, E, que apresentam bom isolamento elétrico e alta resistência a ambientes ácidos (E-CR) ou alcalinos (E-AR), e S, que apresentam alta resistência mecânica (MARINUCCI, 2011; MELO, 2013).

A AFGC (2023) descreve que as normatizações americanas ASTM D7957 e ASTM D8505 e canadense CSA S807-19 limitam a utilização de fibras de vidro, destinadas ao reforço de compósitos poliméricos para aplicação em estruturas de concreto, ao E-CR, que possuem resistência alcalina superior à da fibra de vidro E.

A Tabela 4 apresenta algumas propriedades físicas e mecânicas dos diferentes tipos de fibras de vidro.

Tabela 4: Propriedades de fibras de vidro tipo A, C, E e S

Fonte: Marinucci (2011) - adaptada

Propriedade	Tipo de fibra de vidro			
	A	C	E	S
Densidade (g/cm ³)	2,54	2,49	2,54	2,48
Resistencia à tração à 25°C (MPa)	3033,00	3033,00	3448,00	4585,00
Resistencia à tração à 370°C (MPa)	-	-	2620,00	3758,00
Módulo de elasticidade à 25°C (GPa)	-	69,00	72,40	85,50
Deformação à 25°C (%)	-	4,80	4,80	5,70

2.1.2.1.3 Interface fibra-matriz

A boa adesão na interface fibra-matriz é essencial para garantir propriedades mecânicas adequadas e as características de durabilidade desejadas para o material compósito (BENMOKRANE *et al.*, 2017).

A adesão da interface fibra-matriz pode ocorrer por processos mecânicos ou químicos. A interação química entre as superfícies da fibra e da matriz permite que os esforços mecânicos sejam melhor transferidos para o reforço (MELO, 2013). Os tratamentos superficiais dado as fibras favorecem a produção de fortes ligações químicas com os grupos reativos presentes na matriz (MARINUCCI, 2011).

Neto e Pardini (2006) citam que a adesão da interface em compósitos poliméricos está associada à presença de grupos funcionais na superfície da fibra, à orientação das fibras, ao arranjo atômico, à cristalinidade, às propriedades químicas

do reforço, à constituição química da matriz e à difusividade. Na Tabela 5 são apresentadas algumas teorias de adesão expostas pelos autores.

Tabela 5: Teorias de adesão da interface fibra-matriz

Fonte: Neto e Pardini (2006) - adaptada

Teoria de adesão	Explicação
Interdifusão	Adesão ocorre devido a interdifusão de átomos ou moléculas, que depende do entrelaçamento molecular, do número de moléculas envolvidas e da resistência da ligação molecular.
Atração eletrostática	Adesão ocorre devido a força de atração entre cargas, que acontece devido a diferença de carga eletrostática entre os constituintes da interface. A intensidade da adesão por atração eletrostática depende da densidade de carga e apresenta contribuição pouco significativa para a resistência da interface.
Ligação química	Adesão ocorre devido a formação de ligações entre um agrupamento químico na superfície da fibra e um agrupamento compatível na matriz. Esse meio de adesão depende do número e do tipo de ligações que são formadas por meio de reações químicas termicamente ativadas.
Adesão mecânica	Adesão ocorre devido ao ancoramento mecânico da interface.

A interface fibra-matriz é uma região vulnerável à deterioração, geralmente relacionada a fissuração osmótica da matriz, descolamento interfacial e delaminação. A degradação da interface fibra-matriz é mais propícia a afetar a resistência aos esforços axiais, em comparação, por exemplo, com a resistência aos esforços cisalhantes na direção transversal da barra, pois a primeira está diretamente ligada a interface e a sua capacidade de transferir esforços para as fibras. A resistência aos esforços de cisalhamento transversal está, em maior parte, relacionada a capacidade da resina (BENMOKRANE *et al.*, 2017).

Benmokrane *et al.* (2017), estudaram a durabilidade de barras com diferentes combinações fibra-matriz, sendo fibras de vidro com matrizes de resina poliéster, vinil éster e epóxi. Os autores constataram que as barras com resina vinil éster, utilizadas em seus estudos, apresentaram forte ligação na interface fibra-matriz, obtendo maior retenção de resistência à tração após o condicionamento acelerado, seguida pelas barras com epóxi e poliéster, respectivamente.

2.1.2.2 Propriedades das barras de GFRP

2.1.2.2.1 Temperatura de transição vítrea

Elevadas temperaturas têm um efeito negativo sobre o comportamento de barras de FRP. Quando a temperatura de exposição supera a temperatura de transição vítrea (T_g) das barras, propriedades mecânicas são reduzidas significativamente (ALSAYED, Saleh *et al.*, 2012). Entender o comportamento das barras de GFRP sob efeito de elevada temperatura é uma questão importante quando se espera o uso desses compósitos como reforço para estruturas de concreto (OU *et al.*, 2016).

A temperatura de transição vítrea pode ser descrita como uma temperatura característica na qual o comportamento da matriz muda de um estado “vítreo” ou sólido para um estado “borrachoso” (AFGC, 2023). Quando exposto a uma temperatura próxima ou superior à T_g , o material ganha maior mobilidade, sendo prejudicial para a aplicação em estruturas de concreto (IBRACON, 2021).

A T_g está relacionada com o tipo de resina utilizada na fabricação do compósito (ALSAYED, Saleh *et al.*, 2012). Ou *et al.* (2016) citam diferentes estudos que discutem o efeito da variação de temperatura em compósitos de FRP. A temperatura elevada reduz propriedades como módulo de elasticidade e resistência à tração, verificando que as propriedades mecânicas relacionadas a rigidez e a resistência dos compósitos diminuem significativamente em temperaturas em torno da T_g .

Alsayed *et al.* (2012) realizaram ensaios para verificar o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas de barras de GFRP (fabricadas com resina vinil éster). Os autores submeteram amostras de barras diretamente expostas e cobertas por concreto em condicionamento à temperatura elevada, observando redução de resistência à tração, para 3 horas de exposição, de 11,3%, 20,8% e 35,1%, para amostras cobertas por concreto, e 21,3%, 29,2% e 41,9%, para amostras diretamente expostas, à 100°C, 200°C e 300°C, respectivamente.

As amostras apresentaram alteração de cor (variando entre amarelo e preto), conforme o aumento da temperatura e o tempo de exposição, devido à decomposição da resina. Além disso, propriedades de resistência à tração e deformação máxima

apresentaram redução, enquanto o módulo de elasticidade apresentou baixa redução. Amostras cobertas pelo concreto apresentaram menor degradação, independente da temperatura ou tempo de exposição (ALSAYED, Saleh *et al.*, 2012).

2.1.2.2.2 Resistência à tração

Barras de GFRP possuem resistência à tração variável conforme seu diâmetro, teor de fibra e resina utilizada na produção (ACI 440.1R, 2015). Elas apresentam desempenho elástico-linear no diagrama tensão-deformação, caracterizando uma ruptura frágil do material (JABBAR; FARID, 2018). A Figura 4 mostra uma resposta típica de barras GFRP com diferentes teores de fibra em um ensaio direto de tração.

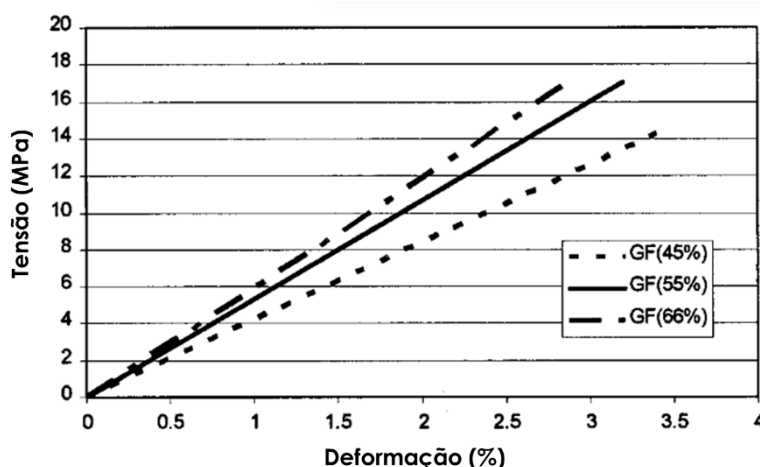


Figura 4: Resposta típica tensão-deformação de uma barra de GFRP

Fonte: Uomoto et al. (2002) – adaptada

A solicitação no compósito polimérico resulta em distorções na matriz devido à diferença nas propriedades mecânicas na interação fibra-matriz, permitindo a transferência de esforços para as fibras (MARINUCCI, 2011).

A solicitação das barras de FRP à tração resulta em um deslizamento relativo das camadas de fibra na matriz polimérica, caracterizando uma distribuição não uniforme de tensão. Esse comportamento é conhecido como efeito “*shear lag*” e é mostrado na Figura 5. Esse efeito é resultante da baixa resistência ao deslizamento dentro da matriz (na interface fibra-matriz), sob a ação de forças axiais de tração (BAŞARAN *et al.*, 2022). A influência do “*shear lag*” é menor em barras de FRP com resina e fibras de alta resistência e rigidez (BAŞARAN *et al.*, 2022).

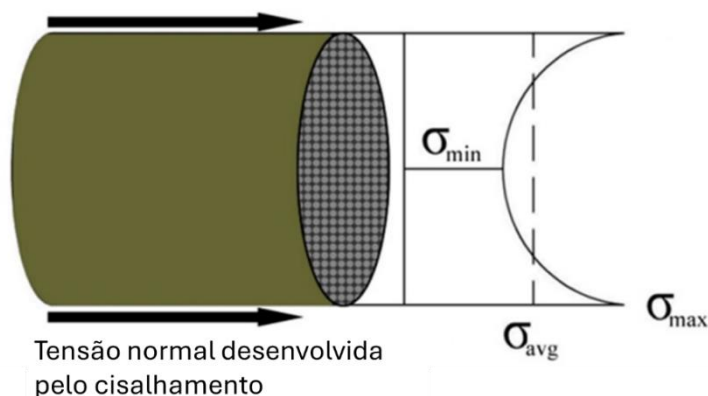


Figura 5: Esquema do efeito "shear lag"

Fonte: Başaran et al. (2022) – adaptada

Santos (2022) realizou ensaios de tração com barras de GFRP. A autora observou que barras de 6 mm e 8 mm apresentaram valores crescente de resistência à tração, não observando o efeito “*shear lag*”. Contudo para barras de 8 mm, 10 mm, 12 mm e 16 mm, foi observado valor decrescente de resistência a tração conforme o aumento do diâmetro.

You et al. (2017) citam em seu trabalho um modelo que relaciona os volumes de fibra e resina presentes na barra e suas respectivas resistências à tração com a resistência à tração final do compósito. O modelo matemático é exposto na Equação 1 e tem como princípio um modelo de dano em que a variação de resistência é afetada pelo espalhamento não homogêneo das fibras.

$$\sigma_{FRP} = \sigma_f \times (V_f \times (1 - P)) + \sigma_m \times (1 - V_f) \quad \text{Equação 1}$$

onde:

- σ_{FRP} é a resistência à tração do FRP;
- σ_f é a resistência à tração da fibra;
- V_f é o volume de fibra;
- P é o parâmetro de dano;
- σ_m é a resistência à tração da matriz.

A parcela $V_f \times (1 - P)$ presente na equação representa o volume efetivo de fibra que reforça o compósito.

2.1.2.2.3 Resistência ao cisalhamento

Forças cisalhantes são aplicadas na direção perpendicular à orientação das fibras presentes na matriz polimérica, o que resulta em uma baixa resistência ao cisalhamento (ACI 440.1R, 2015). A fibra e a interface fibra-matriz contribuem para a resistência aos esforços cisalhantes, contudo a maior parte da resistência é fornecida pela resina (BENMOKRANE *et al.*, 2017).

Para a aplicação em estruturas de concreto armado sujeitas à flexão, a resistência ao cisalhamento das barras não se mostra de extrema importância. Contudo, quando essa propriedade é necessária e for desejada maior resistência, fibras fora do eixo, enroladas transversalmente ou em ângulo diferente as fibras principais, podem ser utilizadas durante a fabricação para melhorar o desempenho da barra ao cisalhamento (ACI 440.1R, 2015).

Nos estudos de Benmokrane *et al.* (2017) foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas de barras de GFRP fabricadas com resinas poliéster, vinil éster e epóxi. Os autores observaram a importância do tipo de resina na composição da matriz. A barra impregnada com resina epóxi apresentou maior resistência ao cisalhamento transversal e ao cisalhamento longitudinal, seguida pelas resinas vinil éster e poliéster, respectivamente. A Tabela 6 mostra os resultados obtidos pelos autores.

A resistência ao cisalhamento transversal é o parâmetro utilizado para o dimensionamento, por exemplo, dos estribos utilizados em vigas. A resistência ao cisalhamento longitudinal reflete a resistência da interface fibra-matriz e é um parâmetro importante para o controle de qualidade do material (BENMOKRANE *et al.*, 2017).

Tabela 6: Resistência ao cisalhamento de barras de GFRP

Fonte: Benmokrane *et al.* (2017) – adaptada

Resina	Resistencia ao cisalhamento transversal (MPa)	Resistência ao cisalhamento interlaminar (MPa)
Poliéster	250,00	47,20
Vinil Ester	258,00	64,80
Epóxi	270,00	77,40

2.1.3 Degradação das barras de GFRP

O desempenho a longo prazo das barras de FRP pode estar relacionado a diferentes fatores que levam a degradação ou alteram a taxa de degradação. Agentes externos, como a umidade e ambientes alcalinos, são alguns mecanismos que levam à degradação das barras. Também podem ser citados efeitos térmicos, como ciclos de congelamento e descongelamento e altas temperaturas (MICELLI; NANNI, 2004).

A degradação dos compósitos de GFRP devido à alcalinidade e à difusão de umidade, pode levar a dissociação entre as fibras e a matriz e, conseqüentemente, a perdas rápidas de resistência na interface fibra-matriz (ROBERT; BENMOKRANE, 2010).

Quando inseridas no concreto, onde o pH se encontra na faixa de 12,5 a 13,5, as barras de GFRP podem ser deterioradas, reduzindo sua vida útil. Essa alcalinidade causa alterações na matriz da barra, como a plastificação do polímero e a redução da temperatura de transição vítrea, da resistência mecânica e da rigidez (MOURA; RIBEIRO; LIMA, 2021).

O meio poroso do concreto é rico em álcalis, o que permite com que a umidade e os íons hidroxila, existentes nesse ambiente, se difundam através das barras e, conseqüentemente, degradem a matriz e as fibras. Ambientes alcalinos resultam na concentração e no surgimento de produtos de hidratação, como o hidróxido de cálcio, entre os filamentos de vidro, contribuindo para enfraquecer a interface fibra-matriz (ROLLAND *et al.*, 2021).

Os principais mecanismos de deterioração de barras de FRP são a delaminação e o descolamento na interface fibra-matriz devido à difusão de íons hidroxila (OH^-) pela matriz polimérica (MOURA; RIBEIRO; LIMA, 2021; RIFAI *et al.*, 2020). A difusibilidade dos compósitos FRP depende do teor de fibra e de resina utilizada na fabricação do material, sendo a resina o principal componente responsável pelo processo de difusão (BENMOKRANE *et al.*, 2002).

2.1.3.1 Difusão em barras de GFRP

A difusão é um processo de transporte de matéria, dado um gradiente de concentração, resultante de uma movimentação aleatória de moléculas (GAO; ZHOU, 2019). O processo de difusão é importante para compreender a degradação dos

materiais compósitos de GFRP. Ele resulta em fenômenos não desejáveis, como o inchamento do polímero, a reação química entre água e o compósito e danos causados na interface fibra-matriz (XIN *et al.*, 2021).

A absorção de água é um fator chave para avaliar e entender a retenção de propriedades mecânicas das barras de GFRP. O comportamento inicial de absorção é caracterizado pela difusão de moléculas de água através da matriz polimérica, causando um relaxamento da resina. Com o aumento no tempo de exposição ao meio de imersão, a hidrólise, a fissuração da matriz e o deslocamento na interface fibra-matriz ocorrem gradativamente (YU *et al.*, 2021).

A absorção de água pode ser dividida em três estágios: absorção dominada por difusão, absorção dominada por relaxamento de polímero e absorção dominada por dano composto (XIN *et al.*, 2021).

Na primeira fase de absorção, esse processo segue a primeira Lei de Fick, onde a quantidade de fluido absorvido aumenta linearmente com a raiz quadrada do tempo até a saturação do compósito, e em seguida apresenta um equilíbrio, onde a quantidade de fluido praticamente se mantém constante. Quando existe a presença de fissuras ou degradação da resina, o comportamento de difusão/absorção pode continuar, mas seguindo um processo não-Fickiano (MOURA; RIBEIRO; LIMA, 2021).

A Figura 6 mostra uma curva típica de absorção *versus* a raiz quadrada do tempo de imersão, que descreve o comportamento difusivo em barras de FRP. A equação presente na Figura 6 representa o coeficiente de difusão (D), onde h é a espessura do compósito (para as barras é o diâmetro).

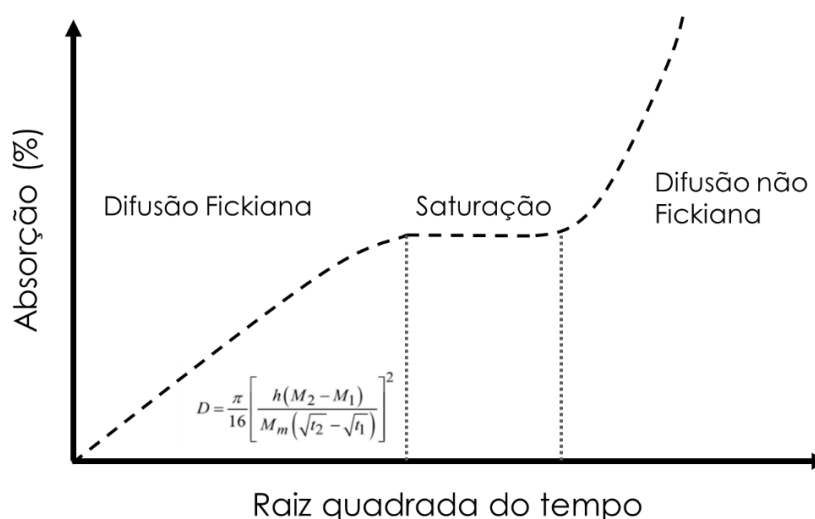


Figura 6: Curva típica de difusão em compósitos FRP

Fonte: Moura, Ribeiro e Lima (2021) – adaptada

A primeira Lei de Fick determina que, para um processo unidimensional de difusão, o fluxo de massa é proporcional ao gradiente de concentração (BARBOSA JÚNIOR *et al.*, 2005). Ela descreve, na forma de uma equação diferencial, Equação 2, a difusão de matéria de um meio mais concentrado para um meio menos concentrado. É estabelecido um gradiente de concentração e produzido um fluxo de massa para uniformizar a concentração (COLAÇO *et al.*, 2012).

$$j = -D \times \frac{\partial C}{\partial x} \quad \text{Equação 2}$$

onde:

- j é a taxa de transporte de massa por unidade de área;
- D é o coeficiente de difusão;
- C é a concentração;
- x é a direção que se move o processo de difusão.

Moura, Ribeiro e Lima (2021) estudaram o comportamento de difusão em barras de GFRP com matrizes de poliéster e vinil éster imersas em solução à 23°C e 60°C. Os autores fizeram diferentes observações: nos tempos iniciais de ensaio, independente da temperatura e da resina, as curvas apresentam o formato de uma curva típica de difusão Fickiana. O aumento da temperatura alterou o comportamento após o período inicial, fazendo com que os materiais continuassem ganhando massa

após uma aparente pausa, o que destaca o papel da temperatura na cinética de absorção das matrizes poliméricas.

Moura, Ribeiro e Lima (2021) citam que o comportamento não-Fickiano, caracterizado pelo ganho de massa das amostras após saturação, pode ter ocorrido por dois motivos: devido à penetração da umidade nas fissuras desenvolvidas na matriz degradada e/ou devido ao transporte capilar de água através da interface fibra-matriz. Além disso, a temperatura causa maior movimentação das moléculas de água e do polímero, facilitando e acelerando a penetração na matriz.

Ruiz Emparanza et al. (2022) inferiram uma correlação entre o nível de absorção e a retenção de resistência à tração. Os autores realizaram experimentos com diferentes tipos de barras de GFRP com resina vinil éster de diferentes fornecedores, variando o tipo de fibra ou de superfície da barra. Os níveis de absorção das barras utilizadas pelos autores se mostraram semelhantes, em torno de 0,20%, contudo, dentre os cinco tipos ensaiados, dois apresentaram níveis superiores de absorção, atingindo 0,76% e 1,16%. Diante dos resultados, os autores concluíram que quanto maior a absorção de umidade menor será a retenção da resistência à tração após a exposição.

A ASTM D7957/D7957M (2022) especifica o limite de absorção de 0,25% para imersão em água destilada à 50°C por 24 horas, para controle de qualidade e certificação das barras de polímero reforçados com fibra. Além disso, limita a absorção de água destilada na saturação do material a 1,00%.

A norma canadense CSA S807-19 especifica critérios semelhantes aos da norma americana, contudo com variações dependendo do diâmetro da barra e da sua classe de durabilidade. Zhang et al. (2021) destacaram em seu estudo o efeito do diâmetro no comportamento de absorção de barras de GFRP recobertas por areia com matriz composta por resina vinil éster. Os autores citam que, por meio de um Microscópio Eletrônico de Varredura, foi verificado que barras com menores diâmetros apresentam mudanças mais visíveis na morfologia de sua microestrutura, o que justifica os maiores valores de absorção.

Moura, Ribeiro e Lima (2021) observaram maior absorção das barras com matriz de resina poliéster, em comparação com as barras de matriz vinil éster. Em solução alcalina à 23°C e 60°C as barras de matrizes poliéster apresentaram absorção

de 1,5% e 1,7% e as barra com matriz vinil éster apresentaram absorção de 1,3% e 1,4%, respectivamente. A maior absorção de barras com matriz de poliéster, também, foi observada por outros autores, como Benmokrane et al. (2017), que verificaram absorção de 0,23%, 0,63% e 1,15% em barras compostas por matrizes de resina epóxi, vinil éster e poliéster, respectivamente.

2.1.3.2 Degradação da matriz polimérica

A matriz polimérica da barra tende a absorver a umidade presente no ambiente na qual ela está sendo submetida. Essa umidade pode alterar a microestrutura da matriz por meio de mecanismos físicos e químicos. Esses processos são acelerados devido ao incremento de temperatura, que causa o aumento na cinética das moléculas (AFGC, 2023).

A absorção de umidade resulta em um processo físico reversível chamado de plastificação do polímero, onde moléculas de água quebram ligações fracas da matriz e criam ligações secundárias entre as moléculas de água e a cadeia polimérica. Esse fenômeno resulta na diminuição da coesão da cadeia polimérica, um aumento na mobilidade das moléculas da matriz e diminuição da temperatura de transição vítrea (AFGC, 2023).

Devido à difusão de umidade pela matriz polimérica, também, pode ser desencadeada a reação de hidrólise, por exemplo, dos grupos de ésteres da matriz polimérica, que danifica a matriz e pode provocar a dissolução das fibras de vidro (RIFAI *et al.*, 2020). Pode ocorrer a hidrólise de outras funções químicas da matriz, além dos grupos de éster. A hidrólise da matriz leva à uma queda substancial das propriedades mecânicas do compósito (AFGC, 2023).

Esses mecanismos foram observados por Yu et al. (2021). Os autores realizaram experimentos em barras de GFRP com resina epóxi, avaliando o comportamento de absorção em água destilada, em temperaturas de 21°C, 40°C e 60°C. Os autores destacam que a taxa absorção é diretamente proporcional ao aumento da temperatura, citando que o aumento de temperatura causa o relaxamento da estrutura do polímero e um aumento na energia das moléculas de água, acelerando a difusão. Eles realizaram, também, o mesmo experimento para imersão em solução simulada de poros do concreto, observando taxas de absorção muito superiores e

justificando que a presença de OH^- causou a hidrólise da resina, levando à formação de fissuras na matriz e o descolamento na interface.

Lu et al. (2020) verificou que a imersão em ambiente alcalino é mais severa em comparação com a imersão em água. Os autores realizaram ensaios de condicionamento à temperatura ambiente com barras de GFRP (matriz de vinil éster), verificando retenção de resistência à tração após 180 dias de imersão de 78%, 69,2% e 81,8% para imersão em água, solução alcalina e água do mar artificial, respectivamente.

A absorção de umidade também afeta a interface fibra-matriz, levando a danos e, conseqüentemente, reduções na capacidade de transferência de cargas. Os principais mecanismos que levam a esse dano são a redução das propriedades coesivas das fibras, devido à danificação da camada de encimagem, e o surgimento de microfissuras, resultante do inchamento da matriz (AFGC, 2023).

Moura, Ribeiro e Lima (2021) destacam que o grau de degradação das barras de FRP ocorre em função da temperatura, do tempo de exposição, da alcalinidade e do tipo de matriz polimérica. Os autores estudaram o efeito hidrotérmico em barras de GFRP fabricadas com resina poliéster isoftálica e vinil éster, sob condicionamento em solução alcalina durante 1000 horas a temperaturas de 23°C e 60°C. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 7 e demonstram a influência da resina e da temperatura na degradação das barras.

Tabela 7: Redução de propriedades de barras de GFRP

Fonte: Moura, Ribeiro e Lima (2021) – adaptada

Barras de GFRP	Temperatura (°C)	Redução da resistência à tração (%)	Redução do módulo de Elasticidade (%)	Redução da temperatura de transição vítrea (%)
Vidro + Poliéster	23	5,7	1,0	7,5
	60	6,4	1,2	11,0
Vidro + Vinil Éster	23	3,8	1,3	6,3
	60	5,5	2,3	8,0

Moura, Ribeiro e Lima (2021) destacam que, por terem apresentado maior absorção de água, as barras com matriz de poliéster foram mais propícias a formação de microfissuras, facilitando a entrada de solução na matriz e resultando no maior dano do material, o que decorreu na maior redução da resistência à tração e da temperatura de transição vítrea.

O dano na interface fibra-matriz permite que a umidade, ou qualquer outra solução que se difunda através da matriz, alcance as fibras. Em relação às fibras de vidro, a absorção de umidade pode levar a hidrólise e a lixiviação de componentes das fibras (AFGC, 2023). A degradação das fibras de vidro é responsável, por exemplo, pela redução no módulo de elasticidade e da resistência à tração das barras de GFRP (NKURUNZIZA *et al.*, 2005).

O ataque as fibras de vidro se dá pela dissolução da sílica por íons hidroxila (OH^-), o que justifica o fato do ambiente alcalino ser mais crítico do que a água no início da degradação. Ambos os ambientes se tornam semelhantemente agressivos devido à produção íons OH^- durante as reações químicas que envolvem a água e as fibras (NKURUNZIZA *et al.*, 2005).

A ação da água, primeiramente, leva a lixiviação de álcalis presentes nas fibras para a solução aquosa, ou seja, formando íons OH^- na solução. Devido a esse processo, tem-se a dissolução dos grupos de sílica das fibras pela ação dos íons alcalinos produzidos. A velocidade de reação de todas essas transformações químicas são diretamente dependentes da temperatura, pois elas estão ligadas ao processo de difusão, que, como citado anteriormente, é acelerado com o incremento da temperatura (NKURUNZIZA *et al.*, 2005).

A dissolução das fibras resulta na perda de peso e diâmetro da fibra e, conseqüentemente, na redução de resistência e de módulo de elasticidade. A degradação das fibras também depende do tipo de fibra de vidro, ou seja, a utilização de fibras resistentes a álcalis reduz esse efeito nocivo (NKURUNZIZA *et al.*, 2005).

Benmokrane *et al.* (2017) destacam a importância da resina e observam a influência do tempo de condicionamento na degradação das barras. Os autores avaliaram a retenção de propriedades mecânicas de barras de GFRP imersas em solução alcalina que simula a solução de poros do concreto a 60°C por até 5000h. A Tabela 8 expõe os resultados obtidos, onde pode-se observar a diminuição na retenção de propriedades mecânicas, como a resistência à tração e o módulo de elasticidade, conforme o aumento no tempo de exposição, e a variação desses resultados conforme o tipo de resina.

Tabela 8: Redução de propriedades de diferentes barras de GFRP

Fonte: Benmokrane et al. (2017) – adaptada

Barra de GFRP	Tempo (h)	Retenção (%)			
		τ_u	f_u	E	S_u
Vidro + Poliéster	1000	94,4	99,0	96,6	93,0
	3000	88,8	81,0	94,9	87,0
	5000	77,5	75,0	89,3	79,0
Vidro + Vinil Éster	1000	96,1	98,0	96,5	97,0
	3000	90,7	89,0	92,2	90,0
	5000	84,1	83,0	88,2	87,0
Vidro + Epóxi	1000	98,9	92,0	95,5	96,0
	3000	92,0	83,0	93,0	90,0
	5000	89,0	77,0	87,4	87,0
τ_u = Resistência ao cisalhamento transversal					
f_u = Resistência à tração					
E = Módulo de elasticidade					
ε_u = Deformação máxima					
S_u = Resistência ao cisalhamento longitudinal (fibra-matriz)					

Benmokrane et al. (2017) descrevem que as barras de GFRP fabricadas com resina poliéster foram altamente afetadas pelo condicionamento acelerado, com alta redução da resistência ao cisalhamento transversal, resistência à tração e resistência ao cisalhamento longitudinal em relação as outras barras. A maior degradação demonstra uma menor aderência entre as fibras de vidro e a resina de poliéster, o que facilita o descolamento na interface.

Benmokrane et al. (2015) investigaram três tipos de barras de FRP com diferentes composições fibra-matriz, sob condição de degradação em solução alcalina à 60°C por até 5000 horas. Os resultados obtidos pelos autores podem ser resumidos pela Tabela 9, na qual destaca-se a maior degradação da composição basalto e matriz de vinil éster. Os autores apontaram para o importante papel que a interface fibra-matriz desempenha, citando que a maior degradação nas barras de basalto se deu por uma fraca ligação entre a resina e as fibras. As barras de basalto com resinas epóxi e vinil éster apresentaram valores altos de absorção de água, em comparação com as amostras de GFRP, o que pode estar relacionado com a sua maior degradação.

Tabela 9: Degradação de barras de FRP em solução alcalina

Fonte: Benmokrane et al. (2015) - adaptada

Nomenclatura	Tipo de fibra	Tipo de matriz	Observações
B/V	Basalto	Vinil Éster	Apresentaram menor resistência ao cisalhamento transversal, resistência à flexão e resistência ao cisalhamento interlaminar. Reduziram em 33% da sua resistência ao cisalhamento transversal, 37% da resistência a flexão e 22% da resistência ao cisalhamento interlaminar, após ensaio de degradação.
B/E	Basalto	Epóxi	Reduziram 9%, 39% e 14% da resistência ao cisalhamento transversal, resistência à flexão e resistência ao cisalhamento interlaminar, respectivamente, após ensaio de degradação.
G/V	Vidro	Vinil Éster	Apresentaram, em geral, maior resistência a degradação. Reduziram 10%, 7% e 5% da resistência ao cisalhamento transversal, resistência à flexão e resistência ao cisalhamento interlaminar, respectivamente, após ensaio de degradação.

2.1.3.3 Métodos para a avaliação da degradação das barras

Ensaio realizados para avaliar a degradação de compósitos estão ligados a condicionamentos acelerados, onde amostras são submetidas a imersão em solução representativa, sob condição de temperatura elevada. A temperatura da solução, geralmente, não supera 60°C, devido à temperatura de transição vítrea, para evitar reações indesejadas e comprometimento dos parâmetros analisados (ROLLAND *et al.*, 2021).

Esses ensaios geralmente são realizados por imersão direta de barras nuas em solução representativa ou por imersão indireta de barras recobertas por concreto em solução representativa, com posterior retirada da camada de concreto para realização de ensaios mecânicos nas barras. A Tabela 10 expõe alguns autores que realizaram ensaios de condicionamento acelerado de amostras por imersão direta ou indireta.

Tabela 10: Referências de trabalhos de condicionamento acelerado

Fonte	Resumo
(YANG <i>et al.</i> , 2016)	Estudo experimental de degradação de barras de GFRP embutidas em um corpo de concreto analisando diferentes cenários: ambientes de imersão em solução alcalina e água de torneira, à temperatura de 60°C, durante 9 meses.
(WANG <i>et al.</i> , 2021)	Estudo do comportamento mecânico de vigas por imersão em ambiente marinho simulado, por até 6 meses à temperatura de 60°C.
(ROLLAND <i>et al.</i> , 2021)	Estudo da durabilidade de barras de GFRP e da aderência com o concreto, imergindo amostras diretamente e indiretamente (barras embutidas em concreto) em solução alcalina à 20°C, 40°C e 60°C por 240 dias.

O uso de procedimentos de condicionamento acelerado tem como objetivo, por meio da imersão de amostras em uma solução aquecida, representar a degradação que ocorreria a longo prazo, em um menor tempo. Segundo Yang et al. (2016), períodos de condicionamento de barras de GFRP durante 3,65; 18; 36,5; 92 e 183 dias em ambiente alcalino à 60°C representam exposição equivalente a 1, 5, 10, 25 e 50 anos em serviço, respectivamente.

O aumento da temperatura acelera o processo de difusão e, conseqüentemente, facilita com que os íons hidroxila e a água penetrem a matriz, degradando o compósito e quebrando a proteção das fibras (MOURA; RIBEIRO; LIMA, 2021). A Figura 7 esquematiza a aceleração da difusão de íons hidroxila e de água através matriz polimérica em função do aumento da temperatura, acarretando maior degradação das fibras e da matriz.

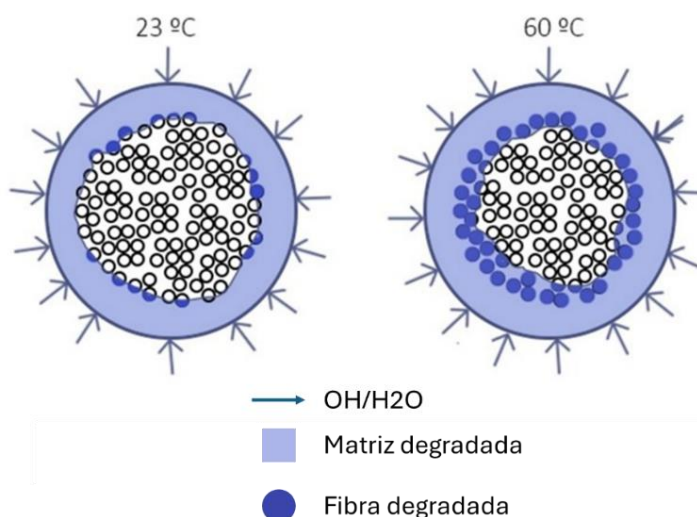


Figura 7: Efeito da temperatura no processo de degradação de barras de GFRP

FONTE: Moura, Ribeiro e Lima (2021) – adaptada

Segundo Wu et al. (2022), em ensaios de durabilidade com barras diretamente expostas a solução alcalina ocorrem maiores degradações em comparação com ensaios realizados com barras embutidas em elementos de concreto. A Figura 8 apresenta uma amostra exposta ao processo de degradação por imersão em solução alcalina, onde parte da barra foi exposta diretamente a solução e parte foi circundada por um corpo de concreto.



Figura 8: Efeito do ambiente alcalino nas barras de GFRP

FONTE: Wu et al. (2022) – adaptada

A imersão direta em soluções alcalinas geralmente resulta em redução significativa da resistência à tração em um tempo relativamente baixo de exposição, o que, em um ensaio de condicionamento acelerado, pode ser considerado como um ambiente severo (ROLLAND *et al.*, 2021).

Esse fenômeno foi analisado por Rifai et al. (2020), que avaliou o comportamento de barras de BFRP condicionadas em temperaturas de até 60°C e por imersão direta e indireta (corpo de prova de concreto circundando a barra). Os autores observaram que os valores de retenção de resistência à tração foram semelhantes durante os seis primeiros meses de ensaio para os dois cenários de imersão. Após seis meses de ensaio, o condicionamento por imersão direta das barras apresentou valor de 5% a 14% menor na resistência à tração retida em comparação com barras expostas indiretamente.

A exposição direta das barras em solução alcalina permite uma total área de contato entre solução de imersão e a barra, contudo, em condições reais, ou de exposição indireta, a solução não estaria compreendida totalmente sobre a superfície da barra, permanecendo nos poros do concreto e assim cobrindo uma menor área na superfície de contato (RIFAI *et al.*, 2020).

Investigações de campo relatam degradações mais baixas nas armaduras de GFRP extraídas de estruturas reais de concreto após 5 a 20 anos de serviço. O condicionamento acelerado das barras de GFRP embutidas em corpos de concreto resulta em perdas de propriedades mecânicas menores, quando comparadas com a exposição direta, devido a menor capacidade de locomoção dos íons alcalinos (ROLLAND *et al.*, 2021).

Com base nas exposições acima, a taxa de degradação das barras pode ser influenciada pelo método de avaliação utilizado, tendo em vista que, uma maior exposição a solução representativa utilizada causa maior degradação nas propriedades das barras. Lu et al. (2020) descrevem que os resultados obtidos nesse tipo de estudo podem variar, também, com diferentes ambientes experimentais adotados.

Wu et al. (2021) adicionam uma variável ao estudo da degradação por meio do condicionamento acelerado, destacando a influência da fissuração do concreto na taxa de degradação das barras. Em condições reais, estruturas de concreto estão sujeitas a fissuração, pois elas são submetidas a diferentes condições de carregamento. As forças externas geram um estado de tensões nas estruturas que resultam na fissuração do corpo de concreto, promovendo a presença de mais canais

por onde a solução externa pode penetrar o elemento estrutural e, conseqüentemente, causar a degradação da barra de FRP.

Wu et al. (2022) imergiram barras de GFRP (compostas por fibras de vidro tipo E e resina vinil éster) recobertas com uma camada concreto em solução alcalina e, após o período de exposição, retiraram o concreto para realização de ensaios mecânicos na barra. Algumas amostras foram submetidas ao condicionamento sob ação de carga constante aplicada na viga.

Wu et al. (2022) verificaram que a presença de pré-fissuras nas vigas resultou em menor retenção na resistência à tração das barras de GFRP, em comparação com as barras embutidas em vigas não pré-fissuradas, sendo 63,1% e 82,6%, respectivamente, após 300 dias de imersão. Os autores verificaram, também, que a presença de carga constante aplicada a viga resulta em retenções inferiores, sendo 54,4%, com pré-fissuras, e 73,6%, sem pré-fissuras, para o mesmo período de imersão. Segundo a AFGC (2023), a carga constante aplicada provoca a formação de fissuras na matriz das barras, resultando em um aumento da permeabilidade do material.

2.1.3.4 Modelo preditivo de retenção de resistência à tração baseado na Lei de Arrhenius

Svante Arrhenius propôs, em 1889, um modelo que representa a taxa de reação de processos químicos em função da temperatura. Os dados obtidos por meio de ensaios de condicionamento acelerado podem ser utilizados para definição dos coeficientes da equação de Arrhenius, o que permite prever o comportamento a longo prazo de barras de FRP (RUIZ EMPARANZA *et al.*, 2022a).

O modelo preditivo baseado na Lei proposta por Svante Arrhenius tem como pressuposto que um único mecanismo de deterioração será dominante durante o período de degradação do material, não podendo mudar com o tempo ou com a temperatura (LU *et al.*, 2020).

A temperatura deve ser responsável, somente, por acelerar a taxa de degradação resultante do mecanismo de degradação predominante (LU *et al.*, 2020). Em barras de FRP isso se torna um limitante em temperaturas próximas à temperatura de transição vítrea, devido a alterações que ocorrem na matriz (SILVA; DA FONSECA;

BISCAIA, 2014). Por esse motivo, ensaios de condicionamento acelerado são geralmente realizados em temperaturas inferiores a transição vítrea.

A Lei de Arrhenius é utilizada para correlacionar a degradação acelerada com a degradação real. O objetivo é estimar os efeitos a longo prazo das exposições de polímeros a diferentes ambientes (SILVA; DA FONSECA; BISCAIA, 2014). Ela tem como princípio a relação entre a temperatura e a taxa de degradação da barra por meio da energia de ativação. A expressão é mostrada na Equação 3 (TU *et al.*, 2019).

$$k = A \times e^{-\frac{Ea}{R \times T}} \rightarrow \ln(k) = \ln(A) - \frac{Ea}{R \times T} \quad \text{Equação 3}$$

onde:

- k é a taxa de reação ou taxa de degradação;
- A é uma constante relacionada ao material e ao ambiente;
- Ea é a energia de ativação;
- R é a constante universal do gás (8,3143 J/mol K) e;
- T é a temperatura em Kelvin.

A energia de ativação (Ea) define a energia mínima necessária para que uma reação química ocorra. Sendo assim, se o mecanismo de degradação não mudar com a temperatura e a taxa de degradação for corretamente modelada, a energia necessária para atingir um certo nível de degradação deve ser a mesma para todas as temperaturas. Neste sentido, o tempo é a única variável, ou seja, o tempo para atingir esse nível de degradação mudará (RUIZ EMPARANZA *et al.*, 2022a).

Segundo Silva, Fonseca e Biscaia (2014), com a definição da energia de ativação, é possível prever o tempo necessário para atingir um certo nível retenção de resistência, nas condições ambientais ensaiadas, para diferentes faixas de temperatura. A relação entre as temperaturas em que os ensaios de condicionamento acelerado foram realizados e a temperatura em que se deseja conhecer o valor de resistência retida é feita por um fator de correção de tempo (TSF, do inglês *Time-Shift Factor*), mostrado na Equação 4.

O TSF estabelece a relação entre o tempo t_1 necessário para a diminuição de uma propriedade na temperatura T_1 , e o tempo t_2 necessário para a mesma diminuição na temperatura T_2 .

$$TSF = \frac{k_2}{k_1} = \frac{t_1}{t_2} = e^{\frac{Ea}{R}(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2})}$$
Equação 4

A definição do valor da energia de ativação é feita por meio de dados experimentais, como, por exemplo, da resistência à tração retida. Diferentes autores conduziram ensaios de condicionamento acelerado, seja por imersão direta ou indireta de barras, e desenvolveram o modelo preditivo baseado no modelo de Arrhenius. Tu et al. (2019), Chen, Davalos e Ray (2006) e Rolland et al. (2021) são alguns exemplos.

A relação entre a retenção de resistência à tração das barras de GFRP e a equação de Arrhenius pode ser feita por diferentes modelos matemáticos que relacionam a retenção de resistência à tração e o tempo de exposição ao condicionamento acelerado. Ruiz Emparanza et al. (2022) expõem alguns desses modelos, como: modelo logarítmico único, modelo logarítmico duplo e modelo exponencial.

Autores como Davalos, Chen e Ray (2012), Ruiz Emparanza et al. (2022) e Zhu et al. (2023), desenvolveram modelos preditivos utilizando e comparando as diferentes equações propostas para a relação retenção de resistência à tração *versus* tempo de condicionamento. Os autores demonstram que o modelo exponencial é o mais adequado para a previsão da retenção de resistência à tração à longo prazo.

Davalos, Chen e Ray (2012) expõem que o modelo logarítmico único possui algumas limitações, como:

- não é adotada uma hipótese sobre o mecanismo de degradação e;
- sua aplicação resulta em “curvas de Arrhenius” não paralelas, o que indica que o mecanismo de degradação mudou durante o condicionamento, invalidando o princípio fundamental da relação de Arrhenius.

Ruiz Emparanza et al. (2022) descrevem que o modelo logarítmico duplo se mostra comparável ou ligeiramente superior ao modelo de logaritmo único, mas, também, não possui boa representação do fenômeno físico. Esse modelo altera o modelo logarítmico único adicionando uma escala logarítmica ao eixo y da curva retenção de resistência à tração *versus* tempo de condicionamento.

O termo “curvas de Arrhenius” é a nomenclatura adotada pela literatura para curvas que relacionam o inverso da temperatura ($1/T$) e o logaritmo natural do tempo de exposição ao condicionamento acelerado ($\ln(t)$). Essas curvas são plotadas para diferentes níveis de retenção de resistência. O objetivo é definir a energia de ativação e verificar se o mecanismo de degradação mudou durante o condicionamento. A Figura 9 ilustra um exemplo das curvas de Arrhenius.

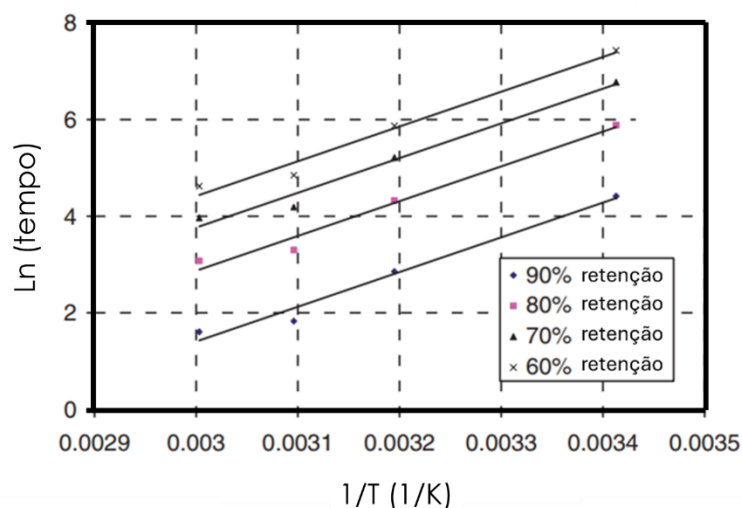


Figura 9: Curvas de Arrhenius

FONTE: Davalos; Chen; Ray (2012) - adaptada

O modelo exponencial foi primeiramente proposto por Phani e Bose (1987) para prever retenções de resistência à flexão utilizando técnicas acústico-ultrassônicas, mas foi modificado para prever a retenção da resistência à tração. Diferentemente dos modelos logarítmicos, o modelo exponencial assume que o mecanismo principal de degradação é o descolamento na interface fibra-matriz (RUIZ EMPARANZA et al., 2022). A Equação 5 mostra a expressão matemática que representa o modelo exponencial.

$$y = (100 - y_{\infty}) \times e^{-\frac{t}{\tau}} + y_{\infty}$$

Equação 5

$$y = (100 - y_{\infty}) \times e^{-t \cdot k} + y_{\infty}$$

onde:

- y é a retenção da propriedade analisada (%);
- y_{∞} é a retenção da propriedade analisada no tempo infinito (%);
- t é o tempo de exposição ao condicionamento acelerado;

- τ é o tempo de degradação característico ($\tau = \frac{1}{k}$).

A Figura 10 ilustra curvas de retenção de resistência à tração *versus* tempo de condicionamento. Os dados obtidos por meio dos ensaios de condicionamento acelerado são utilizados para definição dos parâmetros y_{∞} e τ , para posterior plotagem das curvas de Arrhenius e definição da energia de ativação.

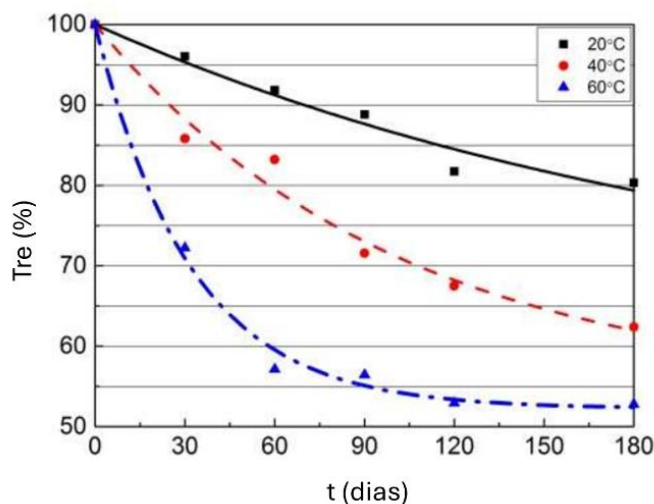


Figura 10: Curvas de retenção de resistência à tração *versus* tempo

Fonte: Zhu et al. (2023) – adaptada

As curvas de Arrhenius são plotadas por meio da combinação das Equações 3 e 5, mostrada na Equação 6. Por meio dessa expressão são definidos os logaritmos dos tempos necessários para retenção de um certo nível de resistência nas temperaturas ensaiadas. Davalos, Chen e Ray (2012) apontam que, para uma boa previsão utilizando a relação de Arrhenius, devem ser obtidos dados de pelo menos três tempos de exposição e três temperaturas diferentes.

$$\ln(t) = \ln\left(-\ln\left(\frac{y-y_{\infty}}{100-y_{\infty}}\right) \times \tau\right) \quad \text{Equação 6}$$

A energia de ativação é definida como inclinação das curvas de Arrhenius, ou seja, o coeficiente angular da curva linearizada (DAVALOS; CHEN; RAY, 2012).

Zhu et al. (2023) apontam que esse modelo lida com uma resistência à tração em um tempo “infinito” igual sob qualquer temperatura analisada, o que é válido desde que a condição física das barras de GFRP não seja alterada, por exemplo, não excedendo a temperatura de transição vítrea. Davalos, Chen e Ray (2012)

complementam citando que existe a possibilidade de que outros mecanismos de degradação, como a hidrólise das fibras de vidro, comecem a dominar o processo de degradação das barras de GFRP após essa convergência ao estado estável de retenção de resistência, resultando em maiores perdas. A possibilidade apontada por Davalos, Chen e Ray (2012), reforça a recomendação das normatizações internacionais, expressas na Seção 2.1.2.1.2, da utilização de fibras de vidro álcali resistentes.

Além disso, Zhu et al. (2023) citam que a energia de ativação pode ser utilizada como um parâmetro de comparação de durabilidade somente se as condições de ensaio forem semelhantes e o modelo matemático utilizado for o mesmo. O fato de a energia de ativação estar associada ao modelo matemático adotado pode resultar em diferentes valores de energia de ativação para os diferentes modelos.

Os resultados comuns do modelo preditivo de degradação (quantificado, normalmente, pela retenção da resistência à tração das barras) baseado na relação de Arrhenius são as “*curvas mestras*”. Essas curvas são o resultado da extrapolação dos dados experimentais para diferentes condições de temperatura por meio do TSF, o que permite observar a representatividade do condicionamento acelerado. A Figura 11 ilustra um exemplo das curvas mestras para diferentes temperaturas.

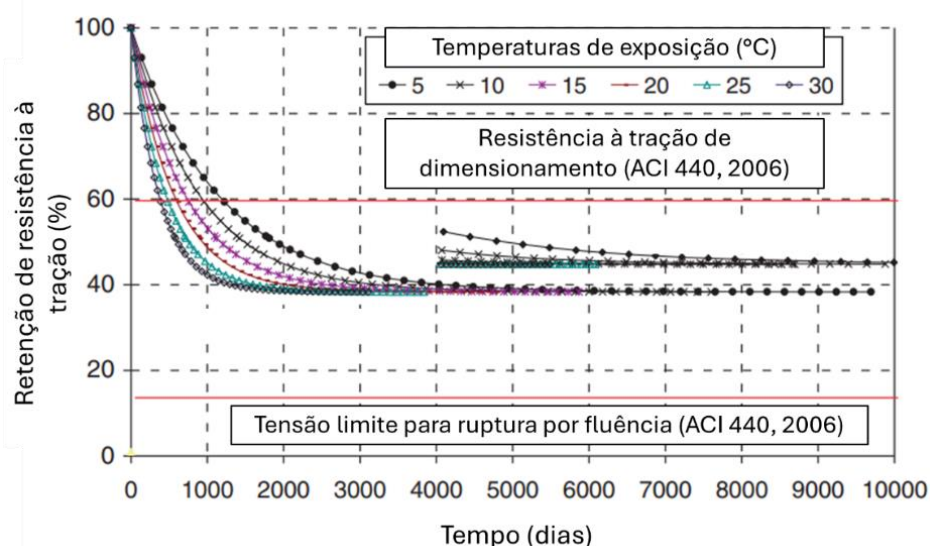


Figura 11: Curvas mestras

Fonte: Davalos, Chen e Ray (2012) – adaptada

2.1.4 Degradação de elementos de concreto armado com barras de GFRP

O cimento, utilizado na composição do concreto, quando misturado com água passa por um processo de hidratação, que resulta na produção de silicatos de cálcio hidratado e hidróxidos de cálcio, responsáveis por garantir resistência e propiciar um ambiente alcalino ao concreto (WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011).

Os produtos de hidratação do concreto são de natureza alcalina e a presença de umidade nesse ambiente induz a lixiviação de álcalis e a formação de uma solução alcalina nos poros do concreto (YU *et al.*, 2021). Como discutido na Seção 2.1.3, a presença de umidade resulta em um processo de difusão através da matriz polimérica da barra, causando consequências reversíveis e podendo resultar em danos irreversíveis à matriz e às fibras, sendo esses processos agravados pela presença de íons alcalinos.

A degradação das barras de GFRP utilizadas como armadura para estruturas de concreto tem como consequência a redução em propriedades mecânicas da viga. A degradação das barras pode resultar em diminuição do momento resistido por vigas submetidas a flexão e alteração no modo de falha (por exemplo, de ruptura por esmagamento do concreto para ruptura por tração da barra), o que pode resultar em falhas mais frágeis e fissuras maiores.

Diferentes fatores na qual uma estrutura é exposta podem influenciar o grau de dano da barra. Jin *et al.* (2020) citam que quando as tensões atuantes na estrutura superam as tensões resistidas pelas barras, as fibras presentes nos compósitos podem romper e intensificar o efeito do ambiente degradante na interface fibra-matriz.

Além disso, He, Dai e Yang (2017) descrevem que as estruturas em serviço estão sujeitas ao surgimento de microfissuras, criando concentrações de tensão e acelerando o surgimento e propagação de maiores fissuras. A presença dessas fissuras fornece canais adicionais onde o meio ambiente externo pode adentrar o concreto e causar a degradação das barras, prejudicando sua durabilidade.

O comportamento mecânico de estruturas armadas com barras de GFRP foi estudado por diferentes autores. Yang *et al.* (2016) realizou ensaios de condicionamento acelerado de vigas por imersão em água e em solução saturada de Ca(OH)_2 a 60°C durante 9 meses. Wu *et al.* (2021) estudaram o efeito do

condicionamento durante 8 anos, avaliando vigas imersas em solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, em condições naturais de temperatura.

Yang et al. (2016) estudaram diferentes cenários de ensaio para dois tipos de amostragens, um com o concreto pré-fissurado e outro sem pré-fissura. As combinações adotadas pelos autores são mostradas na Tabela 11. Os ensaios realizados foram feitos na cidade Wuhan na China, a qual se refere o ambiente externo.

Tabela 11: Cenários de ensaios realizados por Yang et al. (2016)

Fonte: Yang et al. (2016) - adaptada

Nomenclatura	Condição
APS	Pré fissuração + Carga constante aplicada + Solução alcalina a 60°C
AS	Carga constante aplicada + Solução alcalina a 60°C
OPS	Pré fissuração + Carga constante aplicada + Ambiente externo
OS	Carga constante aplicada + Ambiente externo
RE	Não condicionadas ambientalmente
WPS	Pré fissuração + Carga constante aplicada + Água de torneira a 60°C
WS	Carga constante aplicada + Água de torneira a 60°C

Segundo Yang et al. (2016), o efeito da pré-fissuração simula as condições reais de serviço das vigas. Os autores observaram que as combinações APS e AS foram as mais agressivas para as vigas ensaiadas, confirmando o efeito mais agressivo da alcalinidade e da combinação de um ambiente alcalino com a aplicação constante de carga. A combinação APS foi a mais agressiva. Foi observado, também, que as amostras submetidas ao ambiente externo (OPS) e amostras imersas em água (WPS) foram semelhantemente afetadas pelo condicionamento.

Wu et al. (2021) estudaram dois tipos de amostras imersas em solução alcalina, formada pela mistura de hidróxido de cálcio e água, durante oito anos (AS para solução alcalina + carga constante aplicada e APS para solução alcalina + carga constante aplicada + pré-fissuração). Os autores avaliaram a redução na força máxima resistida, flecha e energia de fratura, calculada como a área do gráfico P-CMOD. Na Tabela 12 são expressos alguns resultados obtidos pelos autores.

Tabela 12: Redução de propriedades mecânicas de vigas

Fonte: Wu et al. (2021) - adaptada

Tempo de condicionamento (dias)	30		270		2880	
Amostra	AS	APS	AS	APS	AS	APS
Força máxima (kN)	12,60	10,60	9,10	7,50	7,60	6,19
Energia de Fratura (N/m)	928,60	650,40	411,50	379,10	343,50	252,90
Flecha (mm)	1,33	1,14	0,96	0,96	0,92	0,88

Wu et al. (2021) destacam que a presença de fissuras no concreto promove canais pelos quais a solução externa penetra o concreto, o que justificou a menor capacidade de carga das vigas pré-fissuras.

Esmaeili et al. (2020), estudaram o comportamento a flexão de vigas submetidas a um processo de condicionamento durante 10 anos. Os autores descrevem o mesmo comportamento de Yang et al. (2016) e Wu et al. (2021), onde as vigas submetidas ao condicionamento reduziram sua capacidade de carga devido a degradação das armaduras de FRP. Além disso, Esmaeili et al. (2020) complementam as observações citando que a quantidade de fissuras foi idêntica para antes e depois do condicionamento, apontando para uma aderência adequada entre a barra de GFRP e o concreto, ou seja, a aderência barra-concreto não foi afetada pelo condicionamento.

2.2 ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADOS COM GFRP SUBMETIDOS À ESFORÇOS DE FLEXÃO

2.2.1 Dimensionamento da armadura de flexão

Elementos estruturais reforçados com barras de FRP geralmente são projetados para falhar por esmagamento da região comprimida do concreto, permitindo o desenvolvimento de flechas para sinalizar a necessidade de reparo antes da ruptura (ABDELKARIM *et al.*, 2019).

Entretanto, o dimensionamento por ambos os modos de falha, por compressão no concreto ou tração da barra, são aceitos, desde que atendam aos critérios de resistência e serviço (ACI 440.1R, 2015).

2.2.1.1 ACI 440.1R (2015)

A ACI 440.1R (2015) define a resistência à flexão de um elemento de concreto armado com FRP com base na compatibilidade de deformação, equilíbrio de força interna e no modo de falha (esmagamento do concreto ou ruptura de FRP).

A definição da armadura resistente aos esforços de flexão depende do modo de ruptura adotado para o dimensionamento, onde:

- se a taxa de armadura for menor que a taxa balanceada ($\rho_f < \rho_{fb}$), a ruptura ocorre por tração da barra;
- caso contrário ($\rho_f > \rho_{fb}$), a ruptura é controlada pelo esmagamento do concreto em sua região comprimida.

A taxa de armadura balanceada é a taxa na qual ocorreriam, simultaneamente, a ruptura da barra e o esmagamento do concreto. As taxas de armadura entre ρ_{fb} e $1,4 \times \rho_{fb}$ são descritas como uma região de transição entre os modos de ruptura, devido a variabilidade de resistência à compressão média do concreto (ACI 440.1R, 2015).

A previsão de redução de resistência à tração da barra devido a exposição ambiental é prevista na ACI 440.1R (2015) em função do tipo de fibra, não considerando o tipo de matriz. Vale destacar, novamente, que a norma americana ASTM D7957/D7957M (2022) especifica que a matriz deve ser de epóxi, podendo ser utilizado o vinil éster, desde que atenda aos critérios estabelecidos na mesma

A Tabela 13 mostra os fatores de redução de resistência à tração devido as condições ambientais.

Tabela 13: Fatores de redução ambiental da ACI 440.1R (2015)

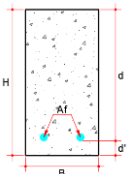
Fonte: ACI 440.1R (2015) - adaptada

Condição de exposição	Tipo de fibra	Fator (C_E)
Concreto não exposto ao solo ou água	Carbono	1,0
	Vidro	0,8
	Aramida	0,9
Concreto exposto ao solo ou água	Carbono	0,9
	Vidro	0,7
	Aramida	0,8

O dimensionamento das estruturas seguindo as normativas estabelecidas pela ACI 440.1R (2015) segue a metodologia de cálculo mostrada na Tabela 14.

Tabela 14: Dimensionamento a flexão conforme a ACI 440.1R (2015)

Fonte: ACI 440.1R (2015) - adaptada

TABELA DE DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO – ACI 440.1R - 15		
	CASO 1: RUPTURA POR COMPRESSÃO DO CONCRETO	$\rho > \rho_{fb}$
	CASO 2: RUPTURA POR TRAÇÃO DA BARRA	$\rho < \rho_{fb}$
DEFINIÇÕES GERAIS		
Área mínima de armadura ($A_{f,m}$)	Taxa de armadura balanceada	Taxa de armadura
$A_{f,m} = \frac{0,41 \times \sqrt{f'_c} \times B \times d}{f_{fu}}$ $A_{f,m} \geq \frac{2,3 \times B \times d}{f_{fu}}$	$\rho_{fb} = \frac{0,85 \times \beta_1 \times f'_c \times E_f \times \varepsilon_{cu}}{f_{fu} \times E_f \times \varepsilon_{cu} + f_{fu}}$	$\rho = \frac{A_f}{B \times d}$
Deformação última da barra	Fator de redução	Resistencia à tração da barra
$\varepsilon_{fu} = CE \times \varepsilon_{fu}^*$	$\varphi = \begin{cases} 0,55 (\rho \leq \rho_{fb}) \\ 0,3 + 0,25 \times \frac{\rho}{\rho_{fb}} (\rho_{fb} < \rho < 1,4\rho_{fb}) \\ 0,65 (\rho \geq 1,4\rho_{fb}) \end{cases}$	$f_{fu} = CE \times f_{fu}^*$
CASO DE DIMENSIONAMENTO 1		
Armadura necessária	$\rho \geq 1,4 \times \rho_{fb}$	
	$A_f \geq 1,4 \times \rho_{fb} \times B \times d$	
Verificação da armadura mínima	$A_{f,min} \leq A_f$	
Verificação à tração na barra	$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \times \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \times \beta_1 \times f'_c}{\rho} \times E_f \times \varepsilon_{cu}} - 0,5 \times E_f \times \varepsilon_{cu} \leq f_{fu}$	
Cálculo do momento nominal	$M_n = \rho \times f_f \times \left(1 - 0,59 \times \frac{\rho \times f_f}{f'_c}\right) \times B \times d^2$	
CASO DE DIMENSIONAMENTO 2		
Armadura necessária	$\rho < \rho_{fb}$	
	$A_f < \rho_{fb} \times B \times d$	
Verificação da armadura mínima	$A_{f,min} \leq A_f$	
Cálculo da linha neutra	$c_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}}\right) \times d$	
Cálculo do momento nominal	$M_n = A_f \times f_{fu} \times \left(d - \frac{\beta_1 \times c_b}{2}\right)$	
VERIFICAÇÃO DO MOMENTO DE SERVIÇO (M_u)		
$\varphi M_n < M_u$		

2.2.1.2 Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021)

O dimensionamento de elementos de concreto armados com barras de FRP submetidos à esforços de flexão proposto pela Prática Recomendada IBRACON/ABECE (2021) segue metodologia semelhante à da ACI 440.1R (2015), utilizando uma taxa de armadura balanceada para definir o critério de ruptura.

As resistências (concreto e barra) de cálculo são minorados conforme fatores de segurança e de efeitos ambientais. O concreto é reduzido utilizando um fator divisor de 1,40. As barras são minoradas conforme o Estado Limite analisado (Tabela 15) e a condição ambiental em que a estrutura está exposta (

Tabela 16).

Tabela 15: Fatores de minoração de resistência da barra (IBRACON/ABECE)

Fonte: IBRACON (2021) - adaptada

Combinação	γ_m
ELU Normal	1,30
ELU Especial ou de construção	1,20
ELU Excepcional	1,20
ELU Fadiga	1,20
ELS	1,00

Tabela 16: Fatores de redução ambiental (IBRACON/ABECE)

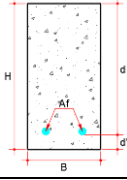
Fonte: IBRACON (2021) - adaptada

Condição de exposição	Tipo de fibra	Fator (C_E)
Interior e não exposto ao solo	Carbono	1,0
	Vidro / Basalto	0,8
	Aramida	0,9
Exterior e exposto ao solo	Carbono	0,9
	Vidro / Basalto	0,7
	Aramida	0,8

O dimensionamento das estruturas seguindo as orientações estabelecidas pela prática recomendada segue a metodologia de cálculo mostrada na Tabela 17.

Tabela 17: Dimensionamento a flexão conforme a prática recomendada IBRACON/ABECE

Fonte: IBRACON (2021) - adaptada

TABELA DE DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO – IBRACON/ABECE		
	CASO 1: RUPTURA POR COMPRESSÃO DO CONCRETO	$\rho > \rho_{fb}$
	CASO 2: RUPTURA POR TRAÇÃO DA BARRA	$\rho < \rho_{fb}$
DEFINIÇÕES GERAIS		
Resistencia de dimensionamento	Taxa de armadura balanceada	Taxa de armadura
$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ e $f_{fd} = C_E \times \frac{f_{tk}}{\gamma_m}$	$\rho_{fb} = \lambda \times \alpha_c \times \frac{f_{cd}}{f_{fd}} \times E_f \times \frac{\epsilon_{cu}}{E_f \times \epsilon_{cu} + f_{fd}}$	$\rho = \frac{A_f}{B \times d}$
Coeficientes		
$\lambda = 0,80$ $\alpha_c = 0,85$ Para concretos de resistência normal e seções transversais retangulares		
DIMENSIONAMENTO		
Linha neutra	$\rho < \rho_{fb} - x = f_{fd} \times \frac{A_f}{\lambda \times \alpha_c \times f_{cd} \times b}$	
	$\rho > \rho_{fb} - x = \frac{1}{2 \times b} \times \frac{\epsilon_{cu} \times A_f \times E_f}{\lambda \times \alpha_c \times f_{cd}} \times \left(\sqrt{1 + 4 \times \frac{\lambda \times \alpha_c \times f_{cd} \times b \times d}{\epsilon_{cu} \times A_f \times E_f}} - 1 \right)$	
Tensão na armadura	$\rho < \rho_{fb} \dots \sigma_{fd} = f_{fd}$	
	$\rho > \rho_{fb} \dots \sigma_{fd} = \frac{x \times b \times \alpha_c \times \lambda \times f_{cd}}{A_f}$	
Momento resistente	$M_{RD} = \sigma_{fd} \times A_f \times \left(d - \lambda \times \frac{x}{2} \right)$	

2.2.2 Cálculo da flecha em vigas

O cálculo de flecha proposto na ACI 440.1R (2015) sugere o uso de uma inércia efetiva, modificada da equação presente em Bischoff (2005), quando o momento supera o momento de fissuração da viga.

A equação modificada proposta pela recomendação da ACI inclui um fator que busca incluir a variação de rigidez ao longo do comprimento da viga (γ). O fator γ indicado na normatização é para uma viga simplesmente apoiada e com carregamento distribuído ao longo do seu comprimento. A Equação 7 apresenta a formulação de inércia efetiva (I_e) proposta pela norma.

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right)} \leq I_g, \text{ onde } M_a \geq M_{cr}$$

Equação 7

$$\gamma = 1,72 - 0,72 \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)$$

onde:

- I_{cr} é o momento de inércia da seção fissurada;
- I_g é o momento de inércia da seção bruta;
- M_{cr} é o momento de fissuração;
- M_a é o momento atuante.

Goldston et al. (2017) indicam para uma viga bi apoiada com um carregamento centralizado um fator gama obtido pela expressão: $\gamma = 3 - 2 \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)$. O uso da expressão mostrada na Equação 7 é mais conservadora, resultando em flechas superiores. Deste modo, para análise das flechas calculadas a partir das expressões normatizadas foi considerado a expressão de gama que resulta em valor mais conservador de flecha.

A ACI 440.11 (2022) incluiu as equações da inércia efetiva e γ um coeficiente de 0,80 que multiplica a relação M_{cr}/M_a . Além disso, orienta o uso da inércia efetiva quando o 80% do momento supera o momento de fissuração da viga. A expressão é mostrada na Equação 8.

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \cdot \left(0,80 \cdot \frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right)} \leq I_g, \text{ onde } M_a \geq 0,8 \cdot M_{cr}$$

Equação 8

$$\gamma = 1,72 - 0,72 \cdot \left(0,80 \cdot \frac{M_{cr}}{M_a}\right)$$

As flechas foram calculadas conforme a Equação 9, para uma viga bi apoiada e com um ponto de carga no centro da viga.

$$\Delta = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E_c \cdot I_e}$$

Equação 9

onde:

- P é a força aplicada;
- L é o vão livre da viga;
- E_c é o módulo de elasticidade do concreto.

3 METODOLOGIA

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A presente dissertação contempla uma pesquisa experimental que buscou investigar o comportamento físico e mecânico de barras de GFRP expostas a um ambiente alcalino, simulando o ambiente do concreto de cimento Portland e o comportamento global de vigas de concreto armado com estas barras. Buscou-se avaliar os resultados com uma abordagem qualitativa e quantitativa, articulando-os com estudos de revisão bibliográfica.

A análise foi feita a partir de ensaios de condicionamento acelerado a 60 °C por imersão de amostras em água e em solução alcalina. A solução é composta por 118,5 g de Ca(OH)_2 , 0,9 g de NaOH e 4,2 g de KOH em 1 l de água ($\text{pH} \cong 13$), conforme descrito na ASTM D7705/D7705M (2019). O objetivo do condicionamento acelerado foi representar, em um menor tempo, a degradação que ocorre à longo prazo. Foram analisadas propriedades mecânicas de barras de GFRP: resistência à tração, módulo de elasticidade e cisalhamento longitudinal (ensaio de viga curta). Para as vigas armadas com barras de GFRP, em condição biapoiada, foram analisados os seguintes parâmetros: resistência à flexão, fissuração e flecha máxima no meio do vão.

O programa experimental deste trabalho foi dividido em quatro etapas principais, que seguem após a caracterização dos materiais (barra e concreto). A Figura 12 apresenta as etapas de ensaio: absorção de água, modelo preditivo de degradação, degradação acelerada de barras de GFRP e degradação acelerada de vigas armadas com barras de GFRP; organizadas em: ensaios PUC-Campinas e ensaios PUC-Rio; o objetivo de cada etapa e as perguntas que se espera responder.

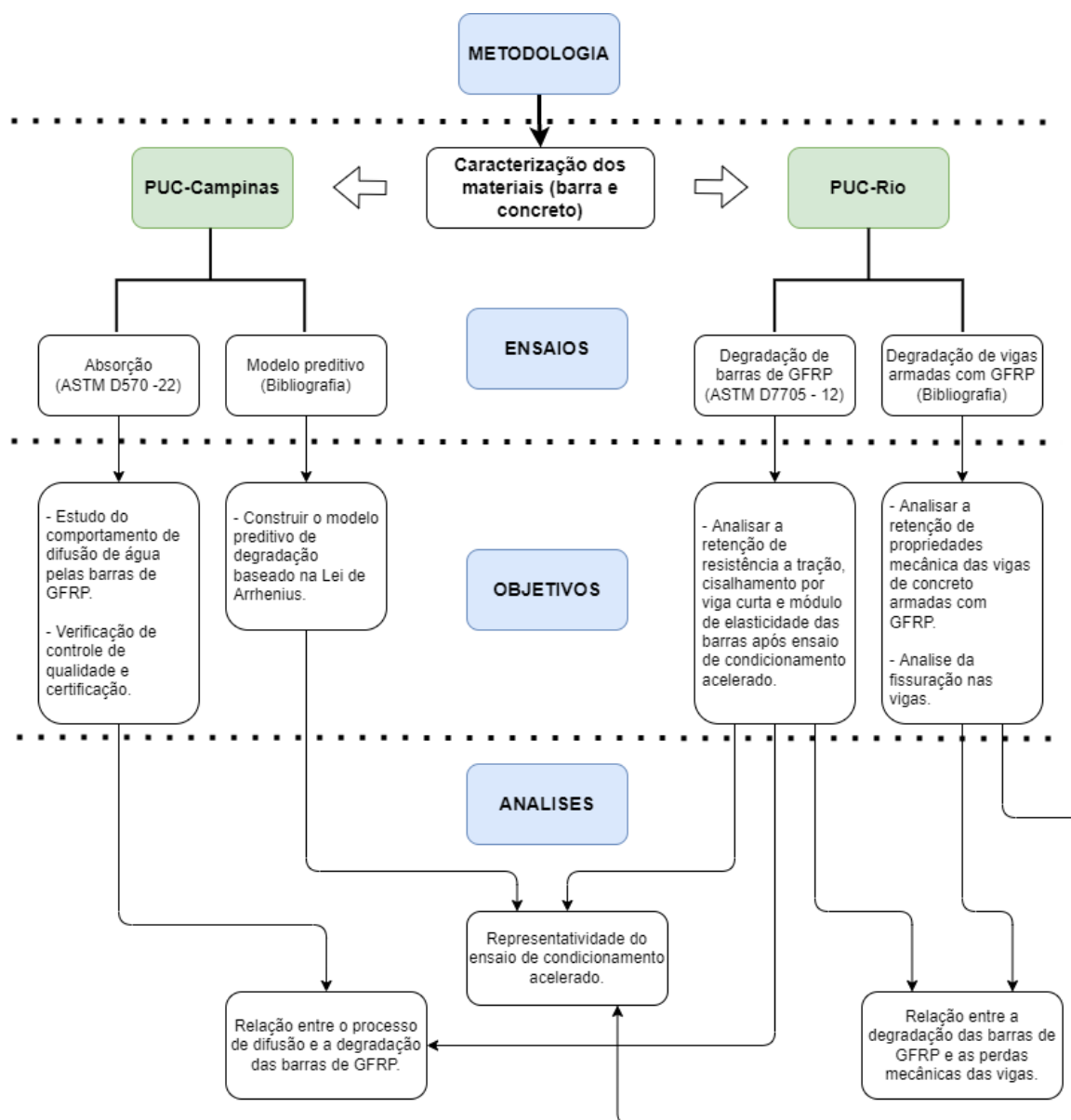


Figura 12: Esquema da metodologia de ensaios, objetivos e análises

3.1.1 Materiais e métodos de caracterização

Essa seção é destinada a apresentar as características e os métodos de ensaio para caracterização do concreto utilizado para confecção das vigas e das barras de GFRP.

3.1.1.1 Concreto

O concreto foi moldado *in loco* para uma resistência à compressão média à 28 dias de 35 MPa. Foi utilizado cimento Portland de alta resistência inicial, CP V-ARI, para amenizar ganhos de resistências devido a efeitos de pós cura do concreto.

3.1.1.1.1 Definição do traço

A definição do traço utilizado para confecção das vigas foi realizada pelo método IPT/EPUSP. A partir de três traços de referência são modelados diagramas de dosagem que permitem obter o traço para a resistência à compressão desejada.

O método utiliza três traços bases, nomeados como pobre, médio e rico, que relaciona a massa de cimento e a quantidade de areia (a) e brita (b) utilizadas. Os traços citados são expostos abaixo, considerando a relação $1:m$, onde $m = a + b$.

- Traço pobre – 1:6,5;
- Traço médio – 1:5,0;
- Traço rico – 1:3,5.

A massa de areia e brita foi definida por meio do teor de argamassa ($\alpha = (1 + a)/(1 + m)$). Foi adotado $\alpha = 0,54$ e um abatimento desejado de $11,0 \pm 1,0$ cm. A Tabela 18 resume os traços (cimento: areia: brita) utilizados para modelagem das curvas de dosagem.

Tabela 18: Traços de referência – método IPT/EPUSP

Traço	Cimento: areia: brita
Pobre	1:3,05:3,45
Médio	1:2,24:2,46
Rico	1:1,43:2,07

Os traços pobre, médio e rico são resumidos na Tabela 19, com a relação água/cimento ajustada.

Tabela 19: Traços de referência para curvas de dosagem

Tipo	Cimento	$m = a + b$	α	a	b	a/c
Pobre	1	6,5	0,54	3,05	3,45	0,76
Médio	1	5,0	0,54	2,24	2,76	0,62
Rico	1	3,5	0,54	1,43	2,07	0,48

O abatimento obtido, conforme a NBR 16889 (2020), para os traços pobre, médio e rico foram de 11 cm, 11 cm e 10 cm, respectivamente, conforme mostrado na Figura 13.



Figura 13: Abatimento de tronco de cone: traço (a) pobre, (b) médio e (c) rico

A massa específica do concreto foi definida utilizando um molde padrão, Figura 14. Para os traços pobre, médio e rico, elas foram calculadas em 2421,88 kg/m³, 2484,38 kg/m³ e 2546,88 kg/m³, respectivamente.



Figura 14: Molde padrão utilizado para definir a massa específica do concreto

Os resultados do ensaio à compressão axial para 7 dias e 28 dias, realizado conforme a NBR 5739 (2018), são resumidos na Tabela 20.

Tabela 20: Resistência à compressão para curvas de dosagem

Traço	fc, 7dias	fc, 28 dias	fc, 7dias	fc, 28 dias	fc, 7dias	fc, 28 dias
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
	Pobre		Médio		Rico	
Média	17,66	21,47	30,42	40,84	46,22	59,93
COV (%)	3,82%	2,32%	14,95%	0,93%	5,15%	3,22%

As curvas de dosagem são mostradas nas Figuras 15 a 17. A partir das curvas de dosagem, foi definido o traço unitário em massa que foi utilizado para a confecção do concreto. Para cura de 28 dias, o traço calculado é 1:2,35:2,85:0,64 com consumo de cimento de 360,57 kg/m³.

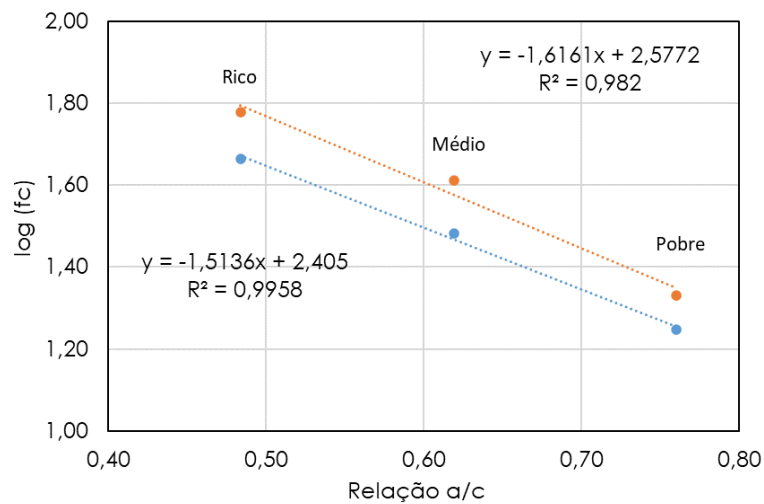


Figura 15: Relação água/cimento (x) versus logaritmo da resistência à compressão (y)

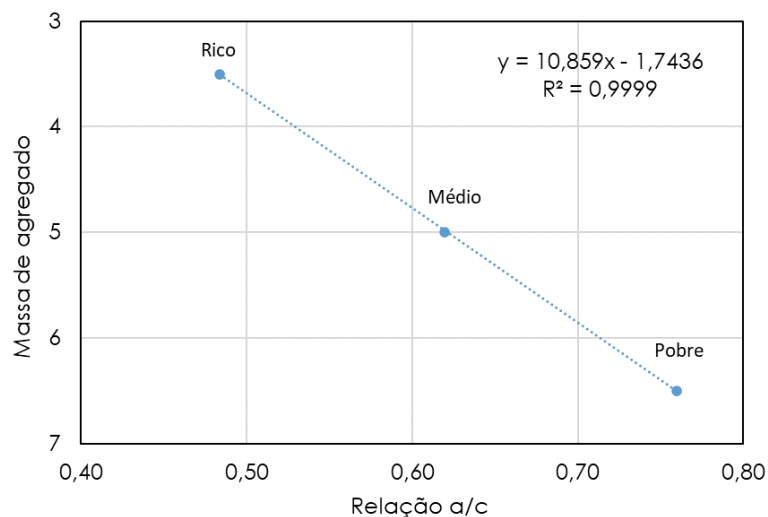


Figura 16: Relação água/cimento (x) versus massa de agregado (y)

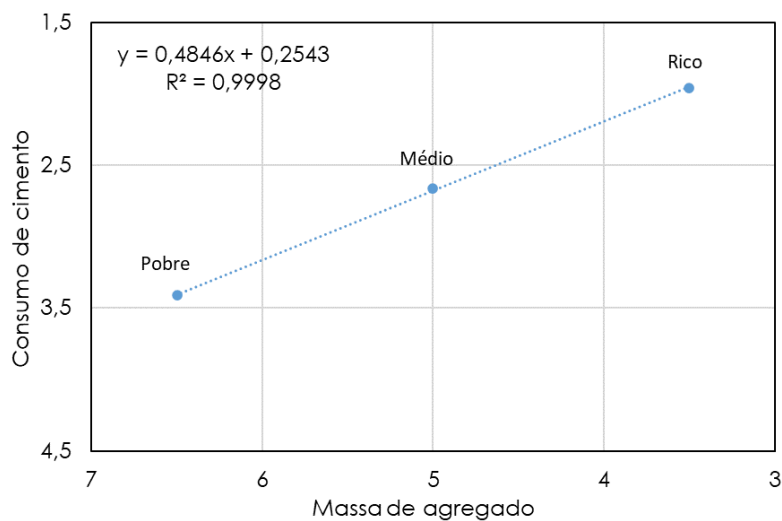


Figura 17: Relação consumo de areia (C/1000) (x) versus massa de agregado (y)

3.1.1.1.2 Granulometria

A granulometria dos agregados miúdos e graúdos utilizados para determinação do traço pelo método IPT/EPUSP foi obtida conforme as normatizações nacionais NBR 7211 (2022) e NBR 17054 (2022).

O agregado miúdo utilizado possui dimensão máxima de 2,36 mm e seu módulo de finura é de 2,68. Os resultados obtidos com o ensaio de granulometria são mostrados na Figura 18.

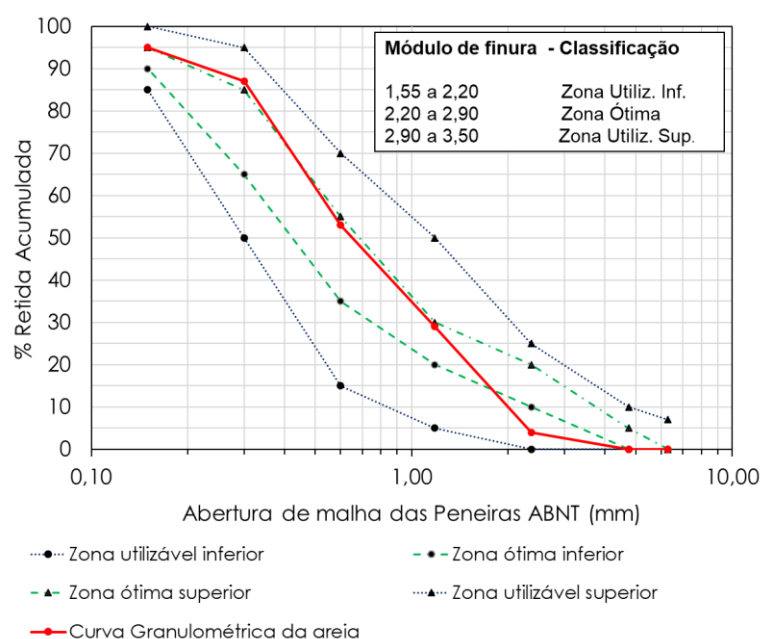


Figura 18: Curva granulométrica da areia

O agregado graúdo utilizado possui dimensão máxima de 19 mm e seu módulo de finura é de 6,41. O agregado graúdo está entre os limites especificados por norma para brita 0 e brita 1, como mostrado na Figura 19.

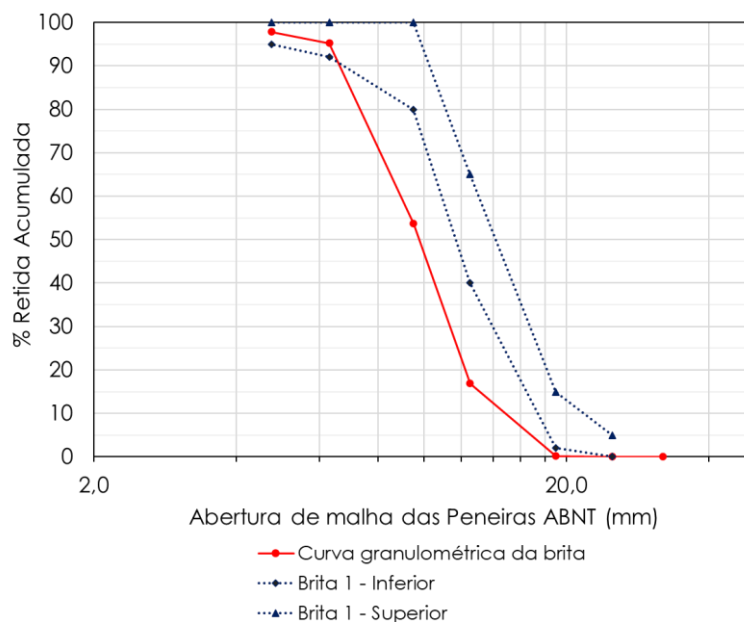


Figura 19: Curva granulométrica da brita

3.1.1.1.3 Caracterização do concreto no estado endurecido

O concreto no estado endurecido foi caracterizado por ensaios de módulo de elasticidade, resistência à compressão simples e tração na flexão, conforme as normas NBR 8522-1 (2021), NBR 5739 (2018) e NBR 12142 (2010), respectivamente.

Cada amostra é composta por cinco corpos de prova para avaliar a resistência à compressão e quatro corpos de prova para módulo de elasticidade e tração na flexão, para referência (não condicionada) e submetidas ao condicionamento acelerado (3 meses).

Os ensaios para definição da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto foram realizados em máquina de ensaio de compressão da Controls, modelo 50-C46Z00, com capacidade de carga de 2000 kN a uma taxa de 0,3 MPa/s. A Figura 20 mostra o equipamento utilizado e um corpo de prova posicionado para ensaio de compressão.



Figura 20: Corpo de prova em ensaio de compressão simples

Os ensaios de tração na flexão foram realizados em equipamento de flexão com atuador hidráulico MTS modelo 204.63 com capacidade de carga de 100 kN. Todos os corpos de prova romperam no terço médio, como mostrado na Figura 21.

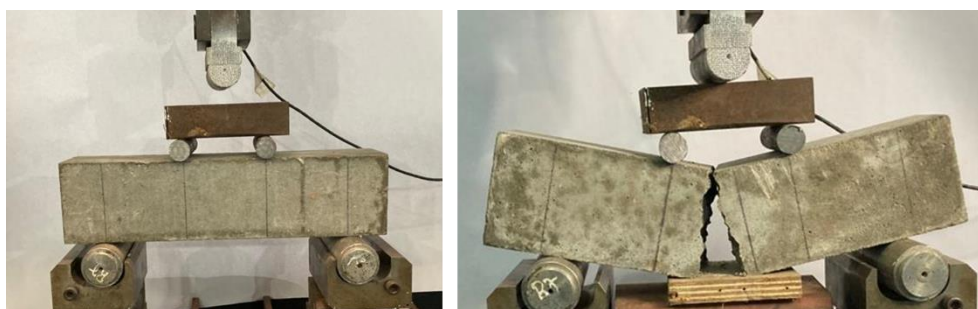


Figura 21: Corpo de prova em ensaio de tração na flexão

3.1.1.1.4 Confeção das vigas

A dimensão das vigas foi de 11x20x110 cm (base/altura/comprimento), com 2 cm de cobrimento e armadas longitudinalmente com duas barras de GFRP de 6 mm de diâmetro nominal e transversalmente com barras de aço de 6,3 mm de diâmetro a cada 10 cm, como mostra a Figura 22. O dimensionamento das vigas foi realizado conforme a ACI 440.1R (2015), desconsiderando qualquer fator de majoração ou minoração de carga e resistência.

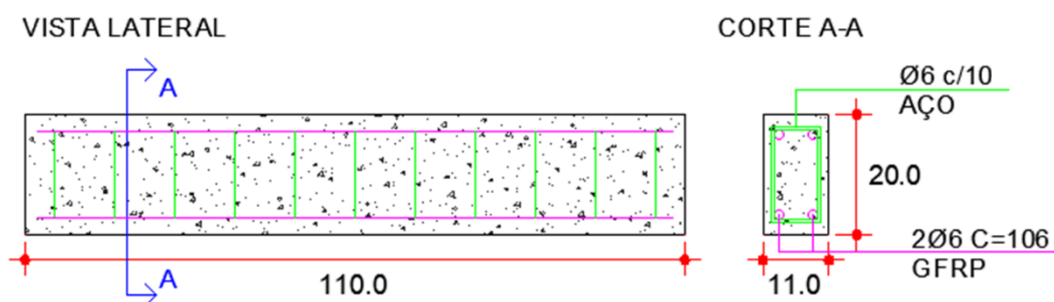


Figura 22: Detalhamento das vigas (unidades em cm)

O dimensionamento das vigas foi realizado utilizando como pressuposto o cálculo com uma taxa de armadura menor que a taxa balanceada ($\rho_f < \rho_{fb}$). A taxa de armadura balanceada é a taxa na qual poderia ocorrer, simultaneamente, a ruptura da barra e o esmagamento do concreto. Foi escolhido esse tipo de dimensionamento para analisar o efeito da degradação da barra no comportamento mecânico da viga, tendo em vista que o comportamento esperado é dominado pela ruptura barra. O dimensionamento da viga resultou em um momento nominal calculado de 10,58 kNm.

Os parâmetros utilizados no dimensionamento estão expostos na Tabela 21. O dimensionamento realizado resultou em taxa de armadura inferior à taxa balanceada, $\rho_f = 0,2855\%$ e $\rho_{fb} = 0,2446\%$. O modo de ruptura da viga foi verificado durante os ensaios de flexão.

Tabela 21: Parâmetros de dimensionamento das vigas

f_c	E_{cs}	f_{fu}	E_f	A_f	ρ_{fb}	ρ_f
(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(m ²)	(%)	(%)
35,49	35790,00	1126,51	48650,00	0,55	0,2446	0,2855
f_c - Resistência a compressão do concreto						
E_{cs} -Módulo de elasticidade do concreto						
f_{fu} - Resistência à tração característica da barra						
E_f - Módulo de elasticidade da barra						
A_f - Área de armadura utilizada						
ρ_{fb} - Taxa de armadura balanceada						
ρ_f - Taxa de armadura						

Antes da concretagem, as armaduras longitudinais das vigas foram instrumentadas (Figura 23) utilizando extensômetro do tipo PA-06-125BA-120-L, com resistência de 120 Ω , para análise das deformações. As regiões instrumentadas foram lixadas com lixa N^o0, para retirar toda resina presente na superfície da barra, e todos

os resíduos foram retirados com álcool isopropílico e uma gaze. A colagem dos extensômetros foi feita com cola instantânea de alta resistência e secagem rápida.

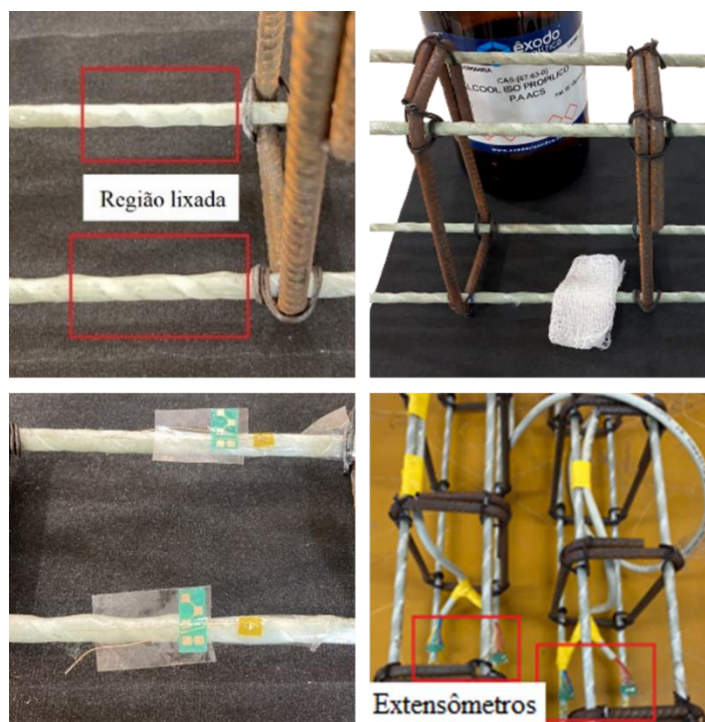


Figura 23: Procedimento de instrumentação das armaduras longitudinais das vigas

As armaduras foram colocadas nas formas e posteriormente concretadas, utilizando o traço 1:2,35:2,85:0,64 (cimento:areia:brita:água). A concretagem foi realizada em um único dia, sendo concretadas: 9 vigas, 15 corpos de prova para a determinação da resistência à compressão, 12 corpos de prova para determinação do módulo de elasticidade e 12 corpos de prova para determinação da resistência à tração por flexão. A Figura 24 mostra as armaduras posicionadas e a concretagem realizada.

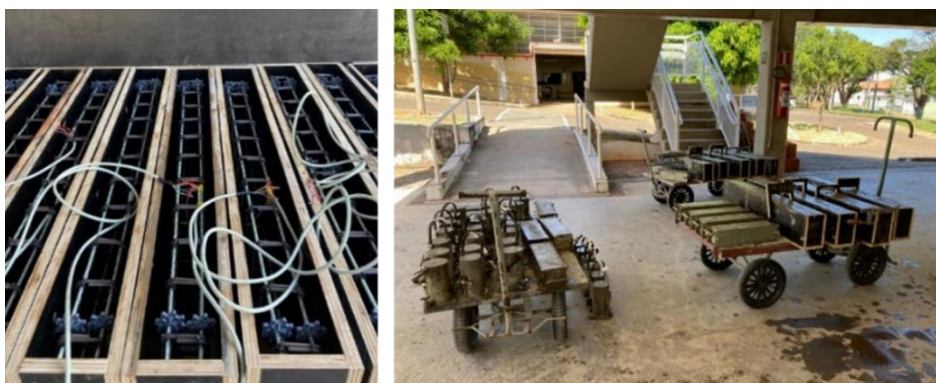


Figura 24: Vigas instrumentadas e concretagem

O processo de cura foi realizado em câmara úmida, mostrada na Figura 25. Os corpos de prova e as vigas foram curados durante 28 dias e, em seguida, transportados para o Laboratório de Materiais Compósitos da PUC-Rio, onde foi realizado o condicionamento acelerado.



Figura 25: Processo de cura das amostras concretadas

3.1.1.2 Barras de GFRP

As barras utilizadas no estudo foram comerciais, produzidas pelo processo de pultrusão de fibras de vidro em resina poliéster. O diâmetro e a área nominal da seção transversal das barras era de 6 mm e 28 mm², respectivamente. Elas apresentavam acabamento superficial externo com enrolamento helicoidal em sua superfície, como mostrado na Figura 26.



Figura 26: Enrolamento helicoidal na superfície das barras de GFRP

3.1.1.2.1 Ensaios de diâmetro efetivo e teor de fibra das barras de GFRP

O diâmetro efetivo é utilizado para calcular a força máxima de tração e o módulo de elasticidade das barras de GFRP. O ensaio foi realizado pela imersão de amostras em uma balança hidrostática, mostrada na Figura 27. Foram feitas as medições do comprimento médio dos corpos de prova utilizando um paquímetro, para

posterior definição do volume médio das barras, da área da seção transversal e do diâmetro efetivo, conforme a ASTM D7205/D7205M (2021).

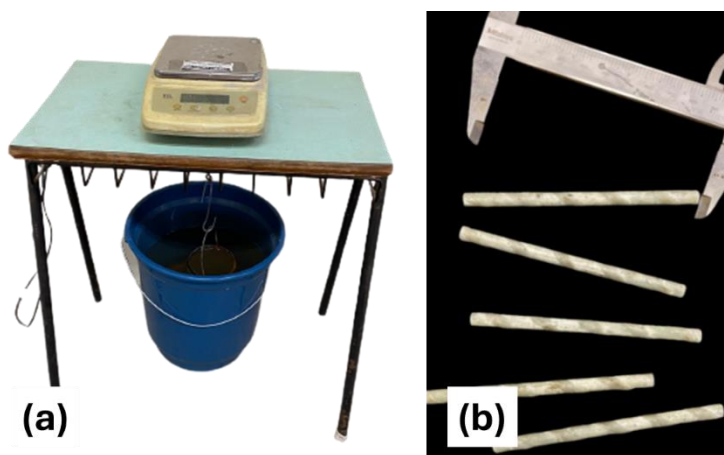


Figura 27: Ensaio de diâmetro efetivo: (a) balança hidrostática e (b) corpos de prova

A Tabela 22 mostra os resultados obtidos no ensaio de determinação do diâmetro efetivo. Foram obtidos um diâmetro de 5,95 mm e uma área de seção transversal de 27,8 mm², atendendo aos limites indicados na Prática Recomendada IBRACON/ABECE de 2021.

Tabela 22: Resultados do ensaio de diâmetro efetivo das barras

	Diâmetro efetivo	Área mínima	Área efetiva	Área máxima
		IBRACON/ABECE		IBRACON/ABECE
	mm	mm ²	mm ²	mm ²
Média	5,95	26,5	27,8	48,6

O teor de fibra (W_r) das barras de GFRP foi determinado conforme a ASTM D3171 (2022) anexo A7, a partir da queima da matriz polimérica. Cinco corpos de prova, secos em estufas e pré pesados (M_i), foram queimados em um forno à $565 \pm 30^\circ\text{C}$ durante 6 horas, resfriados em dessecador e pesados novamente (M_f). O teor de fibra médio é mostrado na Tabela 23.

Tabela 23: Resultados do ensaio de teor de fibra

Ensaio de teor de fibra	
Média	79,29%
Desv. P	5,91%
COV	7,46%

A Equação 10 foi utilizada para o cálculo do teor de fibra.

$$W_r = \frac{M_f}{M_i} \times 100 \quad \text{Equação 10}$$

3.1.1.2.2 Ensaio de tração e módulo de elasticidade das barras de GFRP

Os ensaios de tração foram realizados com os corpos de prova antes e após o condicionamento acelerado para caracterizar o comportamento mecânico, determinando a resistência à tração e o módulo de elasticidade das barras. As barras foram ancoradas com tubos de aço Schedule 40, para evitar seu esmagamento durante o ensaio, sendo mantido o alinhamento da barra dentro do tubo por meio de um gabarito de madeira, mostrado na Figura 28.

Os tubos de aço foram preenchidos com argamassa expansiva na proporção de 1500 g de água para 5000 g do material. Foi necessário utilizar gelo ao redor dos tubos devido à cura exotérmica da argamassa. As barras expostas ao condicionamento acelerado foram ancoradas após o período de condicionamento.



Figura 28: Ancoragem das barras de GFRP em aparato de madeira

A dimensão livre dos corpos de prova foi definida conforme a ASTM D7205/D7205M (2021). A normatização especifica que o comprimento livre (L) do corpo de prova deve ser de no mínimo 380 mm ou 40 vezes o diâmetro, o que for maior. A Figura 29 mostra a configuração dos corpos de prova, na qual foi utilizado comprimento livre de 500 mm, superior ao indicado em norma. O comprimento de ancoragem foi de 250 mm.

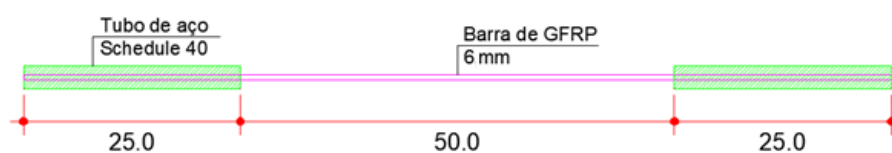


Figura 29: Esquema de ensaio à tração (unidades em cm)

As barras foram instrumentadas utilizando um extensômetro, modelo EEG-10 N.203201 de base variável e deslocamento de 12,5 mm, posicionado no centro do comprimento livre da barra. A Figura 30 mostra um corpo de prova instrumentado e posicionado para ensaio de tração na prensa hidráulica, modelo EMIC DL 30000F, e o extensômetro utilizado. O extensômetro foi retirado antes da ruptura da barra para evitar danos ao equipamento. Os cálculos de resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação máxima da barra de GFRP foram realizados conforme as forças máximas e os alongamentos obtidos.

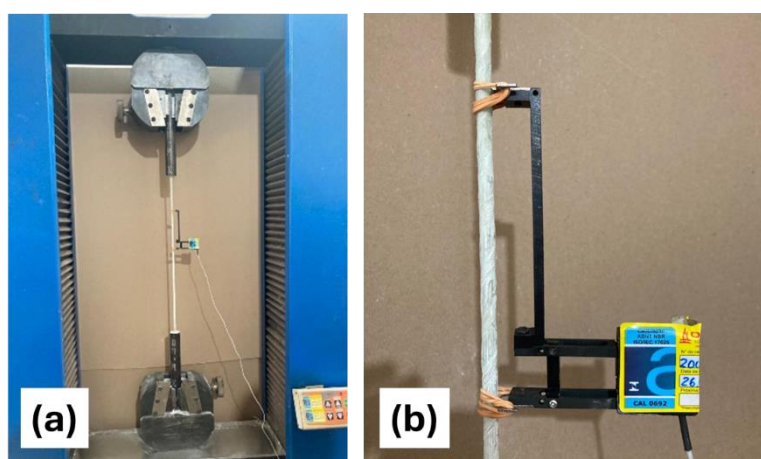


Figura 30: Ensaio de tração (a) corpo de prova e (b) extensômetro

Para o cálculo da resistência à tração das barras foi utilizada a Equação 11.

$$f_{tu} = \frac{P_{max}}{A} \quad \text{Equação 11}$$

onde:

- σ_u é a resistência à tração da barra (MPa);
- P_{max} é a força máxima aplicada pela prensa (N);
- A é a área da seção transversal (mm^2), calculada com o diâmetro efetivo definido na Seção 3.1.1.2.1.

Para o cálculo do módulo de elasticidade foi utilizada a Equação 12. A faixa para determinação do módulo de elasticidade foi definida entre deformações da ordem de 0,001 mm/mm e 0,003 mm/mm, aproximadamente.

$$E = \frac{\Delta f_{tu}}{\Delta \varepsilon} \quad \text{Equação 12}$$

onde:

- E é o módulo de elasticidade da barra (MPa);
- Δf_{tu} é a diferença da tensão de tração aplicada entre os pontos de deformação definidos (MPa);
- $\Delta \varepsilon$ é a diferença na deformação obtida entre os pontos de deformação inicial e final da faixa definida.

3.1.1.2.3 Ensaio de cisalhamento longitudinal por viga curta das barras de GFRP

O ensaio de cisalhamento por viga curta foi realizado com os corpos de prova antes e após o condicionamento acelerado, buscando calcular a resistência ao cisalhamento longitudinal para caracterização do comportamento da interface fibra-matriz.

Para realização do experimento foi desenvolvido um dispositivo de ensaio conforme as orientações ASTM D4475 (2021). Ela foi composta por dois apoios em formato radial e um para aplicação de carga, conforme mostrado na Figura 31. O comprimento total dos corpos de prova foi igual a 24 mm, quatro vezes o seu diâmetro.

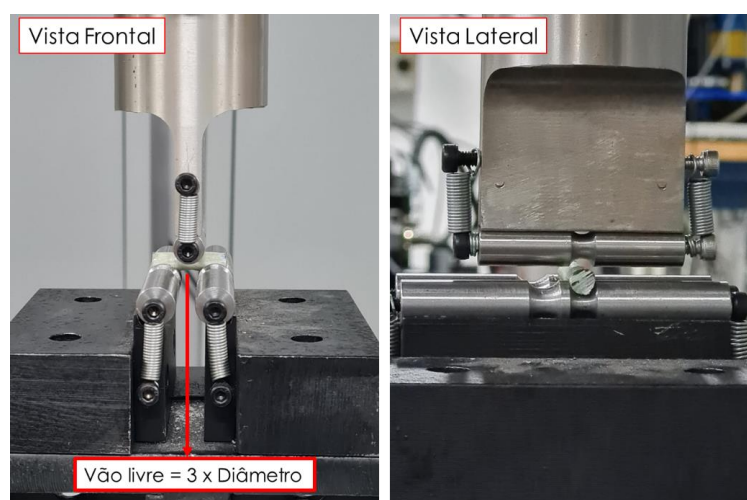


Figura 31: Cisalhamento longitudinal – configuração de ensaio

Os ensaios foram realizados em equipamento MTS modelo 810 com capacidade de carga de 250 kN. O ensaio foi realizado a uma taxa de 1,3 mm/min. A resistência ao cisalhamento por viga curta foi calculada pela Equação 13.

$$S = 0,849 \times \frac{P}{d^2} \quad \text{Equação 13}$$

onde:

- S é a resistência ao cisalhamento interlaminar (MPa);
- P é a força de cisalhamento aplicada (N);
- d é o diâmetro da barra (mm²).

3.1.2 Métodos de ensaio

Essa seção é destinada a apresentar os métodos de ensaio para condicionamento acelerado e absorção de água de barras de GFRP e ensaio de condicionamento acelerado de vigas armadas com GFRP.

3.1.2.1 Absorção de água em barras de GFRP

O ensaio de absorção de água em barras de GFRP foi realizado conforme orientações da norma internacional ASTM D570 (2022). O ensaio tem como objetivo entender o processo de difusão de água em compósitos de GFRP, para posteriores análises do efeito do condicionamento acelerado nas barras. Este resultado é comparado com os requisitos de qualificação e controle de qualidade da ASTM D7957/D7957M (2022).

Cinco corpos de prova com dimensão de, aproximadamente, 25 mm foram imersos em água destilada a 50°C até sua saturação e cinco corpos de prova à temperatura ambiente. Os corpos de prova foram previamente secos em estufa por 24 horas a temperatura de 50°C, resfriados em dessecador e pesados, definindo assim sua massa seca (M_s), conforme ilustrado na Figura 32.

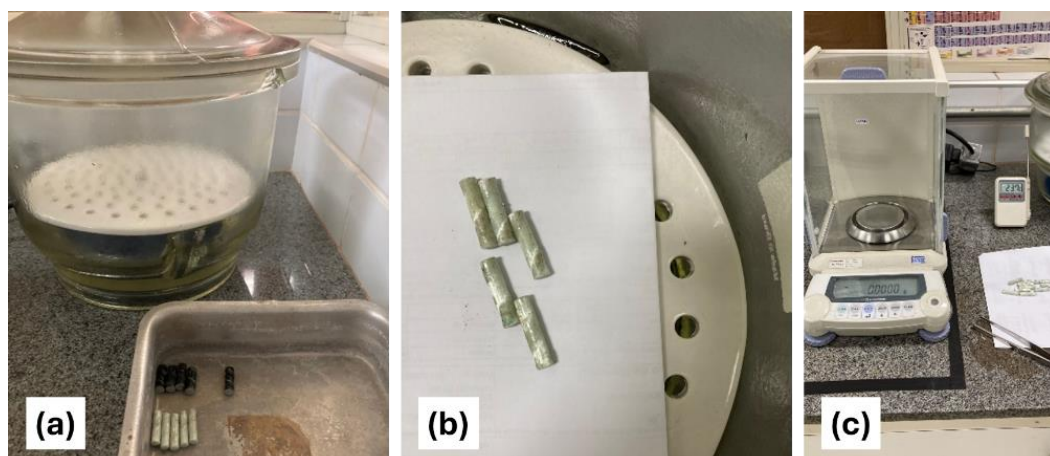


Figura 32: Corpos de prova para ensaio de absorção (a) secos, (b) resfriados e (c) pesados

A temperatura ambiente compreende a variação térmica do ambiente na qual as barras foram condicionadas, sendo este, o Laboratório de Materiais da PUC-Campinas. A temperatura máxima e mínima média da cidade de Campinas variou entre, aproximadamente, 17°C e 29°C no período de realização do ensaio.

Para proporcionar o ambiente aquecido (50°C), durante o ensaio foi utilizado um equipamento de banho termostático, mostrado na Figura 33. A temperatura foi verificada periodicamente.



Figura 33: Ensaio de absorção (a) equipamento termostático e (b) corpos de prova

Após a imersão, os corpos de prova foram pesados com frequência variável, contudo seguindo os critérios estabelecidos em norma. A ASTM D570 (2022) especifica que as pesagens devem ser realizadas em uma balança com precisão de 0,001 g na primeira 24 horas de ensaio (m_{24h}), na primeira semana (m_{1s}) e depois a cada duas semanas (m_{2s}^i) até a saturação do material.

As pesagens foram realizadas nesses períodos, contudo adicionando pesagens intermediárias para melhor caracterizar a curva de absorção, tendo em vista observações da literatura de maior e mais rápida absorção de água em barras compostas por resina poliéster.

Segundo a ASTM D570 (2022), os corpos de prova são considerados como saturados quando o aumento de massa para duas semanas, conforme demonstrado por três pesagens consecutivas, é inferior a 1% do aumento total ou 5 mg, o que for maior (Equação 14). Esse mesmo critério foi adotado para barras imersas à temperatura ambiente.

$$(m_{2s}^{i+1} - m_{2s}^i) < \{5 \text{ mg}\} \text{ e } \{(m_{2s}^{i+1} - m_{seca}) \times 1\%\} \quad \text{Equação 14}$$

A absorção de água pelas barras de GFRP foi calcula seguindo as expressões mostradas na Equação 15.

$$W_s = \frac{M_c - M_s}{M_s} \times 100$$

$$M_s = \frac{M_c - M_{s,f}}{M_c} \times 100 \quad \text{Equação 15}$$

$$A_s = W_s + M_s$$

onde:

- W_s é o ganho de massa devido a absorção;
- M_s é a massa do corpo de prova condicionado;
- A_s é a absorção na saturação;
- M_s é a massa do corpo de prova seco.
- $M_{s,f}$ é a massa do corpo de prova seco após o condicionamento.

3.1.2.2 Condicionamento acelerado de barras para desenvolvimento do modelo preditivo de degradação

O desenvolvimento do modelo preditivo de degradação das barras é realizado conforme diferentes autores da bibliografia. Rolland et al. (2021), Chen; Davalos; Ray (2006) e Tu et al. (2019), baseados em resultados de retenção da resistência à tração obtidos em ensaios de condicionamento acelerado, utilizaram a Lei de Arrhenius para

propor um modelo de previsão do comportamento à longo prazo de barras de GFRP, conforme discutido na Seção 2.1.3.4.

Para modelagem das curvas de retenção de resistência à tração e desenvolvimento do modelo preditivo baseado na Lei de Arrhenius, foi analisada a resistência à tração das barras de GFRP. Foram realizados ensaios de condicionamento acelerado, na PUC-Campinas, por imersão em solução alcalina (composição descrita anteriormente), ensaiando as barras para tempos de condicionamento de 1, 2, 3 e 6 meses a temperaturas de 30°C e 40°C, e de 1, 2 e 3 meses a 60°C. As temperaturas e os tempos de condicionamento foram escolhidos com base em observações da bibliografia, como Benmokrane et al. (2017).

Foram utilizados 60 corpos de prova com diâmetro nominal de 6 mm e 1000 mm de comprimento, sendo cada amostragem composta por 5 corpos de prova, conforme quantificado na Tabela 24. As barras submetidas ao condicionamento acelerado foram cortadas e suas extremidades protegidas com resina epóxi de alta resistência e durabilidade (Figura 34) para evitar um processo de difusão acelerada pelas extremidades desprotegidas.

Tabela 24: Detalhe dos corpos de prova para modelo preditivo de degradação

TIPO DE BARRA	DIÂMETRO	QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA	AMBIENTE DE CONDICIONAMENTO	TEMPERATURA
	(mm)			(°C)
GFRP	6	5	A	-
GFRP	6	20	B	30
GFRP	6	20	B	40
GFRP	6	15	B	60
<i>A - Corpos de prova não condicionados</i>				
<i>B - Corpos de prova condicionados por imersão em solução alcalina</i>				



Figura 34: Proteção das extremidades das barras com resina epóxi

Os corpos de prova foram imersos em tanques de imersão equipados com uma resistência de 2000W x 220V e um termostato Rainbow, RST – 0/120° de 30A. A temperatura e o pH da solução foram verificados semanalmente com auxílio de papel fita de pH e um termômetro digital, sendo o pH ajustado com a adição de hidróxidos ou de água, para aumentá-lo ou diminuí-lo, respectivamente. A Figura 35 mostra o tanque, o procedimento de medição de temperatura e a fita de pH.

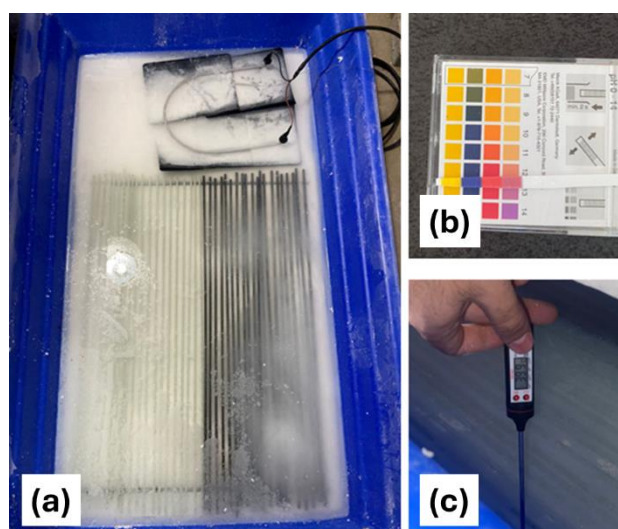


Figura 35: Tanque (a) barras imersas, (b) medição de pH e (c) medição de temperatura

Para mitigar a evaporação durante o ensaio, o tanque foi tampado e constantemente foi verificado o nível d'água, repondo quando necessário. A tampa foi revestida internamente com placas de EPS, para dificultar a dissipação de calor e facilitar o controle da temperatura da solução. Foram utilizadas chapas de poliestireno

para apoiar as resistências e evitar o contato direto com o tanque. A Figura 36 mostra um dos tanques desenvolvidos.

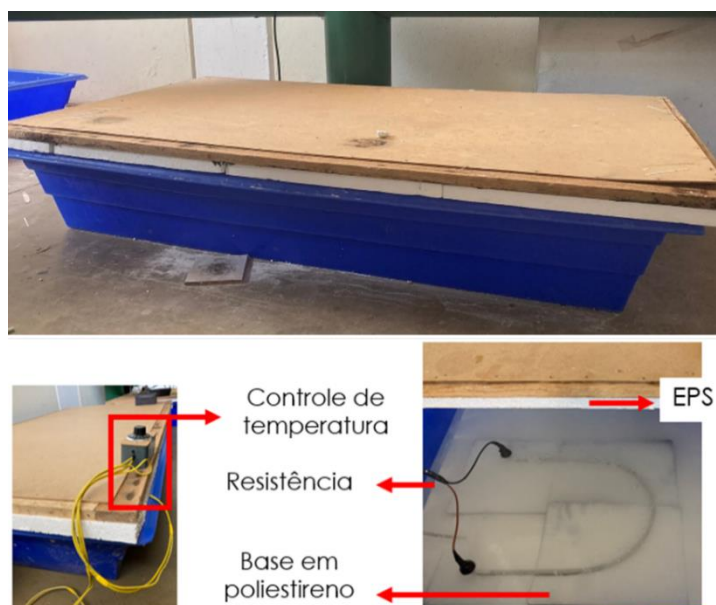


Figura 36: Tanque de imersão e configuração de ensaio

Após cada período de condicionamento, as amostras foram retiradas dos seus respectivos tanques e ensaiadas à tração, conforme descrito na Seção 3.1.1.2.2, no Laboratório de Materiais de Construção da PUC-Campinas.

É descrito na bibliografia modelos que representam o comportamento de retenção da resistência à tração em função do tempo de condicionamento. Foi observado, por meio da imersão à 60°C, um comportamento exponencial com redução da taxa de degradação conforme o tempo de condicionamento aumenta. Outros autores como Zhu et al. (2023) e Ruiz Emparanza et al. (2022) citam que há uma rápida redução na resistência à tração em tempos iniciais, mas que converge a um estado estável.

Deste modo, foi utilizado um modelo matemático que representa a retenção da resistência à tração *versus* o tempo de condicionamento de modo exponencial, convergindo a um valor estável. O equacionamento utilizado foi proposto inicialmente por Phani e Bose (1987) e é mostrado na Equação 16 (a).

Para correlacionar os resultados obtidos nos ensaios experimentais com outros cenários de imersão (diferentes temperaturas), a Lei de Arrhenius foi utilizada. Ela pode ser escrita por uma equação linearizada pelo logaritmo natural, permitindo modelar as curvas de Arrhenius e definir a relação Energia de Ativação sobre a

Constante Universal dos Gases $\left(\frac{E_a}{R}\right)$ por regressão linear. A Equação 16 (b) mostra a relação de Arrhenius linearizada pelo logaritmo natural.

$$y = (100 - y_\infty) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + y_\infty \quad (a)$$

Equação 16

$$\ln\left(\frac{1}{\tau}\right) = \ln(A) - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (b)$$

onde:

- y é a retenção de resistência à tração em função do tempo de condicionamento;
- y_∞ é a retenção de resistência à tração estável;
- t é o tempo condicionamento;
- τ é o tempo de degradação característico ($\tau = \frac{1}{k}$).
- T é a temperatura na qual o ensaio foi realizado (K).

Após a definição da energia de ativação, curvas mestras foram plotadas para diferentes temperaturas, sendo 5°C, 10°C, 15°C, 20°C e 30°C. A criação dessas curvas tem por objetivo verificar a representatividade do ensaio. Essas curvas foram definidas por meio dos dados obtidos experimentalmente multiplicado pelo fator de mudança de tempo (TSF), calculado pela expressão mostrada na Equação 4 (Seção 2.1.3.4). O TSF é definido para cada relação de temperatura na qual se deseja realizar a conversão, por exemplo, o valor de TSF para conversão de tempo de 30°C para 20°C é diferente de 60°C para 20°C.

3.1.2.3 Condicionamento acelerado de barras em solução alcalina (duplicidade) e solução aquosa

Com a mesma metodologia adotada no item 3.1.2.2, corpos de prova foram submetidos a um condicionamento acelerado em solução alcalina e em água destilada, ambas a 60°C, durante 3 meses na PUC-Rio. Foram analisadas a resistência à tração, módulo de elasticidade e resistência longitudinal (por ensaio de viga curta). O ensaio de condicionamento em solução alcalina de barras para avaliação da resistência à tração foram duplicados, ou seja, o condicionamento acelerado em solução alcalina a 60°C durante 3 meses realizado na PUC-Campinas foi repetido na PUC-Rio, para verificação da semelhança dos ambientes condicionantes.

Foram utilizados 15 corpos de prova com diâmetro nominal de 6 mm e 1000 mm de comprimento, para ensaio de tração e módulo de elasticidade, e 10 corpos de prova com diâmetro nominal de 6 mm e 225 mm de comprimento, para ensaio de cisalhamento por viga curta, conforme quantificado na Tabela 25.

As barras foram cortadas e suas extremidades protegidas com resina epóxi de alta resistência e durabilidade para evitar um processo de difusão acelerado pelas extremidades.

Tabela 25: Corpos de prova para condicionamento acelerado de barras de GFRP

TIPO DE BARRA	ENSAIO	QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA	AMBIENTE DE CONDICIONAMENTO	TEMPO DE EXPOSIÇÃO
				(meses)
GFRP	Tração	5	A	-
GFRP	Tração	10	B/C	3
GFRP	Viga curta	5	A	-
GFRP	Viga curta	5	B	3
<i>A - Corpos de prova não condicionados</i>				
<i>B - Corpos de prova condicionados por imersão em solução alcalina</i>				
<i>C - Corpos de prova condicionados por imersão em água</i>				

Os corpos de prova foram imersos em tanques de imersão montados com duas resistências elétrica de imersão revestidas com teflon de 3000W x 220V, para elevar a temperatura. O pH da solução alcalina foi verificado periodicamente. Amostras da solução foram coletadas e testadas utilizando um pHmetro, modelo Gehaka PG2000. O pH da solução alcalina foi ajustado com a adição de hidróxidos ou de água, para aumentá-lo ou diminuí-lo, respectivamente, quando necessário. A Figura 37 mostra a resistência utilizada e o equipamento para medir o pH.



Figura 37: Resistência e equipamento para medição do pH da solução

Os tanques de polietileno foram tampados e constantemente verificado o nível da lâmina de solução e de água. A Figura 38 mostra a configuração de um dos tanques e o mesmo com a solução alcalina.



Figura 38: Tanques de imersão, configuração de ensaio e solução alcalina

Após cada período de condicionamento as amostras foram retiradas dos seus respectivos tanques, transportadas e ensaiadas à tração, conforme descrito na Seção 3.1.1.2.2, em equipamento EMIC DL30000F, no Laboratório de Materiais de Construção da PUC-Campinas. O ensaio de cisalhamento por viga curta foi realizado conforme descrito na Seção 3.1.1.2.3.

3.1.2.4 Condicionamento acelerado de vigas armadas com barras de GFRP

Vigas armadas com barras de GFRP foram submetidas a um processo de condicionamento acelerado, por imersão em água destilada a 60°C, durante 3 meses, para analisar sua resistência à flexão, flecha máxima no meio do vão e distribuição de fissuras. Foram utilizadas 6 vigas armadas à flexão com barras de GFRP e com estribos de aço para o cisalhamento (ver Seção 3.1.1.1.4), conforme quantificado na Tabela 26.

Uma viga foi pré-fissurada até uma carga de 14 kN. O objetivo da pré-fissuração é facilitar a penetração de água no concreto para simular condições passíveis de acontecerem em situações reais.

Tabela 26: Detalhe dos corpos de prova a serem ensaiados (vigas)

TIPO DE BARRA	DIÂMETRO	QUANTIDADE DE VIGAS	AMBIENTE DE CONDICIONAMENTO	TEMPO DE EXPOSIÇÃO
	(mm)			(meses)
GFRP	6	3	A	-
GFRP	6	3*	B	3
<i>A - Corpos de prova não condicionados</i>				
<i>B - Corpos de prova condicionados por imersão em água destilada</i>				
<i>* 1 das vigas foi pré-fissurada</i>				

A Figura 39 mostra a configuração do tanque utilizado para condicionamento das vigas e as amostras imersas.



Figura 39: Tanques de imersão, configuração de ensaio e vigas imersas

Após cada período de condicionamento, as vigas foram retiradas dos seus respectivos tanques e ensaiadas à flexão de três pontos. Foram realizadas análises utilizando a Correlação de Imagens Digitais (DIC do inglês *Digital Image Correlation*). A Figura 40 apresenta o ensaio de flexão à três pontos e a região analisada com o DIC. Os corpos de prova de concreto, também, foram retirados do tanque e ensaiados, conforme descrito na Seção 3.1.1.1.3, no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio.

O ensaio de flexão a três pontos foi realizado para uma viga biapojada com vão livre de 1 metro e um transdutor de deslocamento (LVDT) de 50 mm posicionado no ponto médio da viga para medição da flecha. O ensaio foi conduzido em prensa hidráulica, modelo MTS 204.63 com capacidade para 100 kN, a uma velocidade de 0,04 mm/s.



Figura 40: Ensaio de flexão à três pontos e região de interesse do DIC

O método de correlação de imagens digitais foi utilizado para coleta de dados de abertura de fissuras. A configuração para coleta de imagens é feita a partir de um foco de iluminação e uma câmera (2D-DIC) direcionadas para uma região central

pintada de branco fosco e pontos pretos, como mostrado na Figura 41. As imagens foram adquiridas a uma velocidade de 1 foto por segundo utilizando o sistema VIC-2D da Correlated Solutions. O processamento das imagens foi realizado com o programa GOM Correlate (2022).

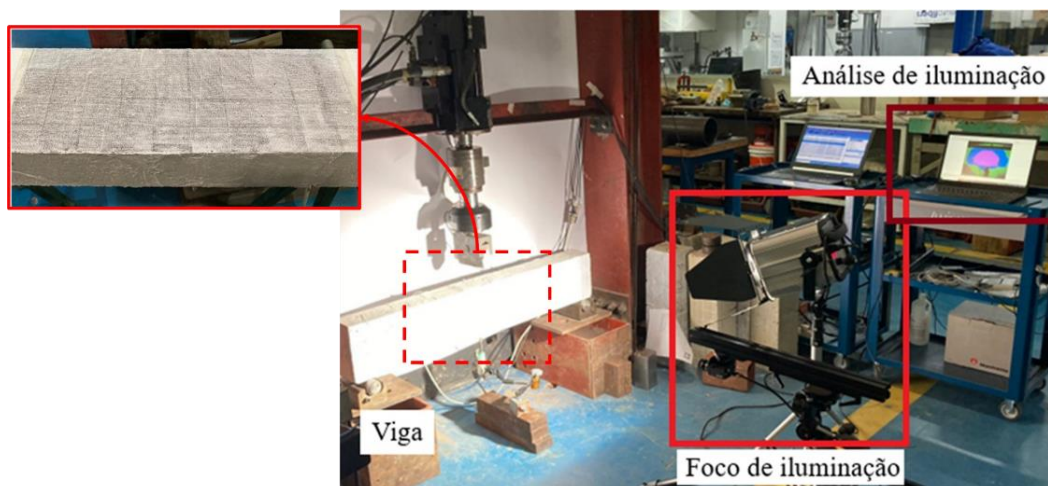


Figura 41: Configuração para coleta de imagens para o DIC

3.1.2.4.1 Análise teórica da retenção de resistência à tração das barras inseridas na viga

Os dados de momento máximo resistente, obtidos a partir do ensaio de flexão à três pontos, foram substituídos na Equação 17 para o cálculo da tensão de tração na barra no momento da ruptura da viga, o que permite estimar a resistência à tração da barra embutida no concreto ao final do condicionamento.

$$f_{fu} = \frac{M_n}{A_f} \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right)^{-1} \quad \text{Equação 17}$$

3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados obtidos a partir dos ensaios descritos na Seção 3.1 foram tratados estatisticamente com a eliminação de dados espúrios para análises e discussões com base nos resultados médios. Foi aplicado o método ANOVA com um fator com significância de 5% para comparar os resultados obtidos ao longo dos ensaios propostos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Absorção de água pelas barras de GFRP

Como descrito na bibliografia, a temperatura acelera o processo difusivo nas barras, desta forma, para um mesmo tempo de ensaio são observados valores de absorção superiores para amostras imersas em água destilada à 50°C. As Tabelas 27 e 28 apresentam os resultados dos ensaios de absorção, pela relação entre a massa condicionada e a massa inicial do material, como representado na Equação 15 (Seção 3.1.2.1).

Tabela 27: Resultados do ensaio de absorção de água à 50°C

CP	1	2	3	4	5
Tempo (dias)					
0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1	0,81%	1,07%	0,96%	1,15%	1,03%
2	0,97%	1,10%	1,11%	1,26%	1,13%
4	1,33%	1,59%	1,65%	1,75%	1,56%
7	1,69%	2,07%	2,08%	2,02%	1,80%
8	1,43%	1,55%	1,66%	1,55%	1,33%
10	1,31%	1,29%	1,56%	1,51%	1,29%
11	1,52%	1,45%	1,83%	1,84%	1,65%
14	1,91%	1,91%	2,37%	2,41%	2,19%
16	2,00%	2,14%	2,32%	2,48%	2,20%
21	2,79%	2,80%	3,14%	3,11%	2,51%
23	2,54%	2,62%	2,79%	2,33%	1,88%
24	2,17%	2,35%	2,31%	1,68%	1,81%
29	2,05%	2,53%	2,99%	2,15%	2,55%
37	2,77%	3,23%	4,67%	3,38%	3,97%
39	2,49%	2,47%	2,39%	2,55%	2,43%

Tabela 28: Resultados do ensaio de absorção de água à temperatura ambiente

CP	1	2	3	4	5
Tempo (dias)					
0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1	0,41%	0,40%	0,33%	0,48%	0,34%
8	0,95%	1,14%	0,94%	1,02%	1,02%
22	1,35%	1,48%	1,27%	1,50%	1,57%
36	1,56%	1,61%	1,41%	1,57%	1,77%
50	1,69%	1,81%	1,61%	1,64%	1,98%

O primeiro resultado avaliado é a taxa de absorção em 24 horas para imersão em água destilada à 50°C. A ASTM D7957/D7957M (2022) especifica o limite de

0,25% de absorção e, como pode ser observado na Tabela 27, os valores de absorção obtidos são superiores (média de 1,00%), não atendendo ao critério de controle de qualidade e certificação.

O guia da Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC, 2023) descreve que a norma canadense CSA S807-19 especifica alguns critérios para o limite de absorção das barras (para imersão em água à 50°C), sendo:

- 0,25%, 0,3% ou 0,35% após 24 horas, dependendo do diâmetro da barra e da classe de durabilidade;
- 0,45% após uma semana e;
- 0,55%, 0,90% ou 1,00% quando saturado, dependendo do diâmetro da barra e da classe de durabilidade.

Contudo, as barras utilizadas neste estudo não atendem nenhum dos critérios descritos.

Da mesma forma, o limite de 1,00% de absorção quando saturado, especificado pelas duas normas citadas, para amostras imersas em água a 50°C, não foi atendido.

Não foi possível atender ao critério de parada do ensaio de absorção em água destilada à 50°C devido às altas taxas de absorção observadas. Contudo, para imersão em temperatura ambiente, foi obtida absorção na saturação de 1,74%, demonstrando o não atendimento a norma. Mais a diante será discutido o valor de absorção na saturação por imersão a 50°C.

A Figura 42 mostra o comportamento de absorção pela raiz quadrada do tempo de imersão para absorção em água destilada à temperatura ambiente. Pode-se observar uma tendência linear na curva de absorção para as barras imersas à temperatura ambiente, demonstrando o comportamento Fickiano de absorção até a saturação do material. O ensaio de absorção à temperatura ambiente foi interrompido após o atendimento ao critério de parada.

Os corpos de prova imersos em água destilada à temperatura ambiente foram, após o ensaio de absorção, secos em estufa à 50°C, resfriados em dessecador e pesados, não sendo observada perda de massa devido a imersão.

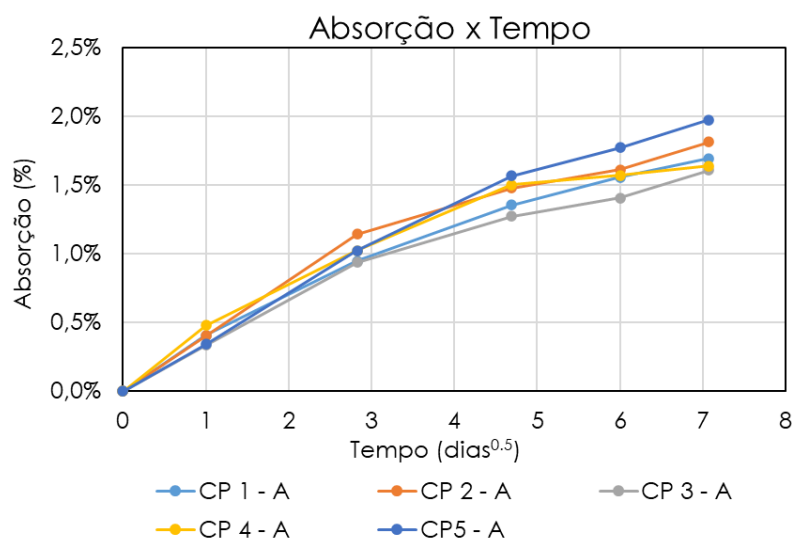


Figura 42: Curva de absorção de água à temperatura ambiente

Como pode-se observar na Figura 43, a curva de absorção a 50°C também apresentou uma tendência linear inicialmente, que segue para um período de ganho e perda de massa. Esse ganho e perda de massa pode estar associado a fatores como: absorção e dessorção de água ou a perda de matéria que compõe a barra, resultando no aumento de vazios, que posteriormente são preenchidos por água. A absorção média antes do início do período de ganho e perda de massa é de 1,93%, valor próximo à saturação à temperatura ambiente, sendo assim, interpretado como o nível de saturação do material. Esse valor é semelhante ao obtido por outros autores que também utilizaram barras com resina poliéster. Moura et al. (2021) atingiram absorção média de 1,5% e 1,7% para barras de GFRP (poliéster isoftálico) imersas em solução alcalina à 23°C e 60°C, respectivamente. Ali et al. (2018) obtiveram taxas de absorção na saturação de 1,15% para barras imersas em água à 50°C, e 1,36% para barras em solução alcalina à 60°C, respectivamente.

Após o período de ganho e perda de massa, foram observados um aumento e uma queda rápida na curva de absorção, sugerindo alterações na matriz polimérica. Para verificar perda de matéria do polímero, após o fim do ensaio, as amostras foram secas em estufa à 50°C, resfriadas em dessecador e pesadas, verificando redução média de 0,17% na massa dos corpos de prova imersos em água destilada à 50°C.

A redução da massa nos corpos de prova imersos à 50°C indica o aumento no índice de vazios, devido à redução de sólidos, o que consequentemente aumenta

o percentual total de massa de água absorvida. O total de água absorvida foi em média 2,64% (COV = 1,91%) em 39 dias de imersão à 50°C.

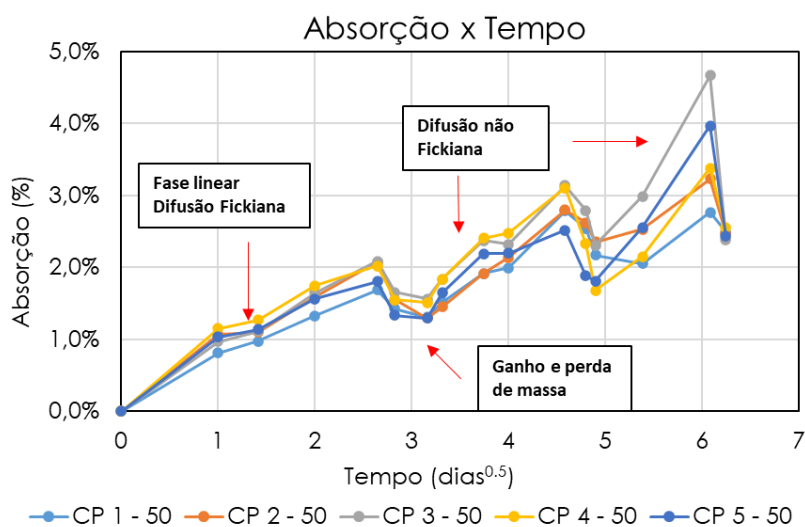


Figura 43: Curva de absorção de água à 50°C

A Figura 44 destaca o efeito da temperatura nos ensaios realizados neste estudo, mostrando o aumento na taxa de absorção para imersão à 50°C. Além disso, é mostrada a leve alteração de cor observada na superfície da barra (foi observada uma textura mais áspera após o ensaio) e a presença de ranhuras paralelas, na coloração branca, na seção transversal dos corpos de prova após o ensaio de absorção em água destilada à 50°C.

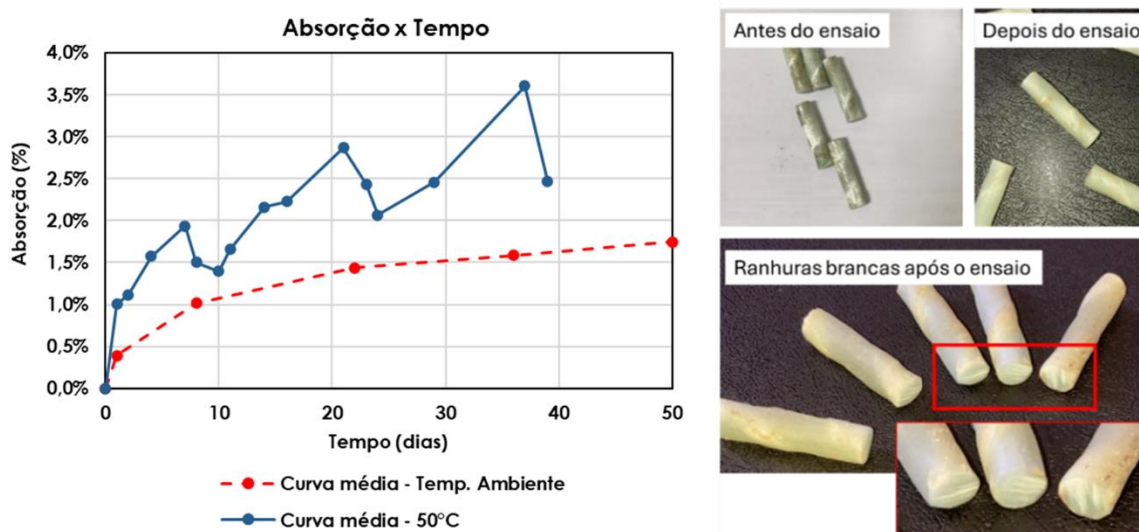


Figura 44: Curvas médias de absorção e o efeito da imersão em água à 50°C

Desta forma, dada observações dos autores citados e as observações deste ensaio, descreitas anteriormente, entende-se que a temperatura:

- acelerou os efeitos de plastificação do polímero, resultou no inchamento do material e, possivelmente em danos internos, com absorção maior em um menor tempo de imersão, ou seja, levando o material ao nível de saturação em menor tempo,
- e, possivelmente, resultou, de modo acelerado, na hidrólise dos grupos éster da resina, levando a degradação do material e, conseqüentemente, aumento rápido na taxa de absorção, tendo em vista a alta presença de grupos éster na composição química de resinas poliéster.

Desta forma, considerando as observações da literatura e dos ensaios realizados, onde a alta taxa de absorção verificada associada a fatores como a temperatura da solução e a resina poliéster em ambiente alcalino, sugere-se que a degradação das barras de GFRP (avaliada a partir da retenção da resistência à tração) seja influenciada de modo não linear com acréscimo de temperatura e o tempo de condicionamento, observando altos níveis de redução de resistência. Essas reduções serão discutidas nas próximas seções.

4.2 Condicionamento acelerado de barras de GFRP

4.2.1 Ensaios mecânicos: análise dos resultados

4.2.1.1 Ensaios de resistência à tração aos 90 dias de condicionamento

Para todos os ensaios de tração realizados, a ruptura aconteceu no comprimento livre da barra devido ao rompimento das fibras, validando o ensaio. As barras apresentaram comportamento elástico-linear e ruptura frágil, conforme esperado. A Figura 45 mostra a falha típica observada nas barras no ensaio de tração e seu comportamento tensão-deformação.

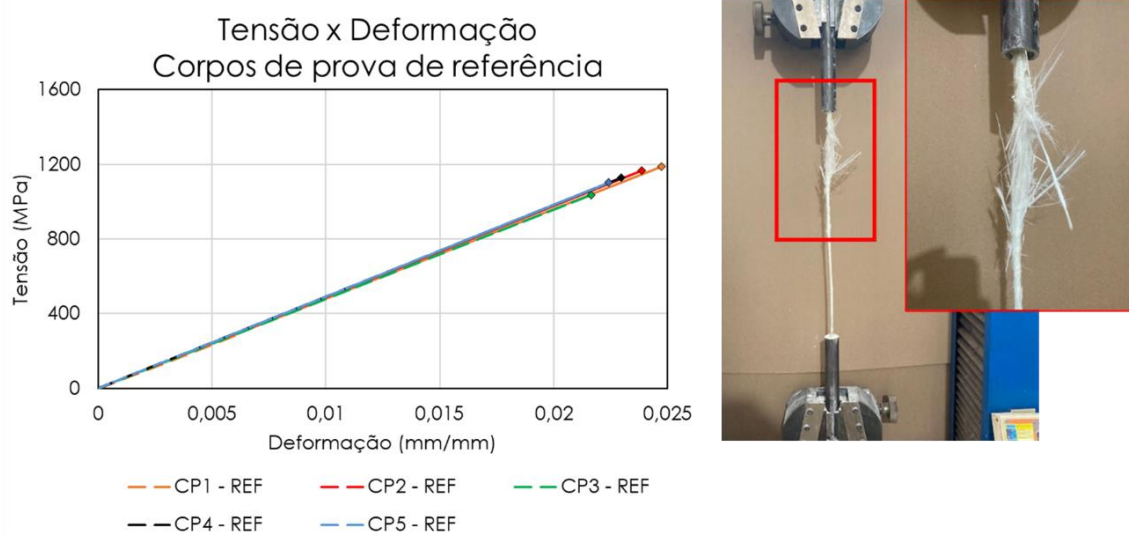


Figura 45: Ruptura de barras de GFRP e comportamento elástico-linear

Os ensaios realizados por imersão em solução alcalina, em um tanque na PUC do Rio de Janeiro e outro na PUC de Campinas, e por imersão em água destilada mostraram o efeito da alcalinidade do ambiente de imersão na velocidade de degradação das barras. A Tabela 29 mostra os resultados obtidos nos ensaios de tração das barras imersas durante três meses à 60°C em água e em solução alcalina (pH = 13). A amostra de referência (não condicionada) apresentou resistência à tração média de 1126,51 MPa.

A Tabela 29 mostra, também, que os coeficientes de variação obtidos nos ensaios realizados com as barras condicionadas em ambiente alcalino foram maiores em comparação com as barras condicionadas em ambiente aquoso.

Tabela 29: Resistência à tração - ambiente alcalino e aquoso

Ambiente	Resistência à tração (MPa)		
	Solução alcalina	Solução alcalina	Solução aquosa
	PUC-Rio	PUC-Campinas	PUC-Rio
Média	634,29	528,59	703,30
Desv. P	72,34	73,59	27,43
COV	11,40%	13,92%	3,90%

Os resultados do ensaio à tração das barras condicionadas em tanques distintos apresentaram valores próximos. O método ANOVA foi aplicado entre os dados obtidos por imersão em solução alcalina realizados na PUC do Rio de Janeiro (duplicidade) e na PUC de Campinas para o mesmo tempo de condicionamento, obtendo valor-p de 7,47%.

A retenção de resistência à tração para imersão em água foi igual a 62,43%, superior a retenção de resistência à tração observada para imersão em solução alcalina, 56,31% (duplicidade). Isso demonstra o efeito mais severo da alcalinidade no processo de degradação das barras de GFRP. Esse resultado indica uma degradação mais acelerada devido a presença de íons OH^- na solução alcalina em comparação com a imersão em água. Ainda assim, mostra um cenário importante de degradação alta das barras em ambientes aquosos.

A ASTM D7957/D7957M (2022) estabelece retenção mínima de resistência à tração de 80% da resistência inicial após três meses de condicionamento acelerado em solução alcalina à 60°C e, como pode ser observado na Tabela 29, essa condição não foi atendida, sendo obtida retenção de 56,31% (duplicidade).

O módulo de elasticidade não foi afetado pelo condicionamento acelerado em água destilada e em solução alcalina, não sendo possível estabelecer uma redução ou aumento efetivo na propriedade. A Tabela 30 mostra o módulo de elasticidade das barras após o condicionamento acelerado em solução alcalina, PUC-Rio e PUC-Campinas, e em água destilada. A amostra de referência apresentou módulo de elasticidade médio de 48,65 GPa.

Tabela 30: Módulo de elasticidade - ambiente alcalino e aquoso

Ambiente	Módulo de elasticidade (GPa)		
	Solução alcalina	Solução alcalina	Solução aquosa
	PUC-Rio	PUC-Campinas	PUC-Rio
Média	50,22	50,03	51,31
Desv. P	0,36	0,34	0,67
COV	0,71%	0,68%	1,31%

4.2.1.2 Ensaios de cisalhamento longitudinal pelo método de viga curta

Autores como Micelli e Nanni (2004), Benmokrane et al. (2017) e Esmaeili et al. (2020), citam que o comportamento observado por meio do ensaio de cisalhamento longitudinal descreve o desempenho da interface fibra-matriz. A Figura 46 mostra o modo de falha dos corpos de prova após o ensaio de cisalhamento longitudinal. Pode-se observar que, após a imersão em solução alcalina, os corpos de prova apresentaram fibras soltas na sua superfície, o que pode estar relacionado ao descolamento da interface fibra-matriz resultante de reações físicas e químicas com a solução de imersão.



Figura 46: Modo de falha devido ao cisalhamento longitudinal

Como mostrado na Tabela 31, foi obtida retenção de resistência longitudinal da barra de 80,67% após o condicionamento acelerado (60°C e solução alcalina), indicando degradação na interface fibra-matriz. A redução na resistência ao cisalhamento longitudinal e os altos níveis de absorção de água, justificam a baixa retenção de resistência à tração, devido à diminuição na capacidade de transferência de carga da matriz. As curvas de Força *versus* Deslocamento obtidas com o ensaio de viga curta são apresentadas na Figura 47.

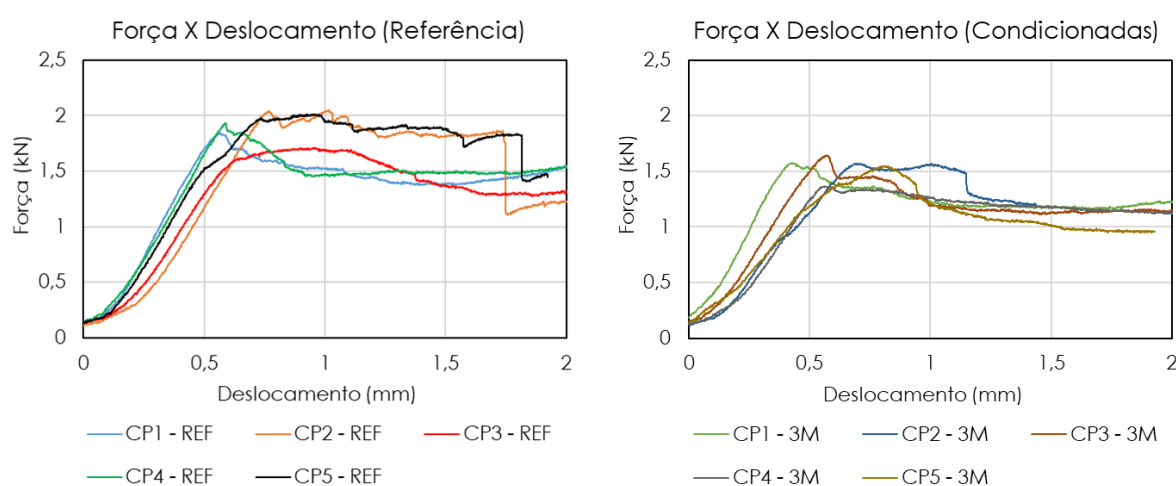


Figura 47: Força *versus* Deslocamento – cisalhamento longitudinal

A AFGC (2023) recomenda retenção de resistência longitudinal superior a 80% e cita que a CSA S807-19 indica retenção superior a 85%. A retenção de resistência ao cisalhamento longitudinal indicada pela AFGC (2023) foi atendida.

Tabela 31: Resultados do ensaio de cisalhamento por viga curta

CP	Referência	Condicionada (90 dias)
	(MPa)	(MPa)
Média	45,80	36,95
Desv. P	2,89	2,24
COV (%)	6,32%	6,06%
Retenção (%)	80,67%	

4.2.1.3 Ensaios de resistência à tração para o desenvolvimento do modelo preditivo de degradação

As Tabelas 32 à 34, mostram os resultados de resistência à tração e módulo de elasticidade das barras submetidas ao processo de condicionamento acelerado, na PUC-Campinas, para o desenvolvimento do modelo preditivo de degradação. A retenção máxima de resistência à tração foi de 46,92%, resultante da imersão à 60°C por 90 dias. Em relação ao módulo de elasticidade, foi observado comportamento diferente, não podendo caracterizar redução ou aumento efetivo na propriedade mecânica.

Outros autores que conduziram ensaios de condicionamento acelerado, seja pela imersão direta de barras ou pela imersão indireta (barras recobertas por concreto), como Zhu et al. (2023) e Ruiz Emparanza et al. (2022), também observaram que o tempo de condicionamento e a temperatura da solução não possuem influência significativa no módulo de elasticidade.

Diferente do módulo de elasticidade, a resistência à tração das barras é diretamente afetada, apresentando menor retenção em combinações de maiores tempos de condicionamento e maiores temperaturas. Além disso, como observado, também, por outros autores, como Zhu et al. (2023), Ruiz Emparanza et al. (2022) e Davalos; Chen; Ray (2012), apesar da rápida redução na resistência à tração em tempos iniciais de condicionamento, a retenção dessa propriedade tende a uma diminuição menos acelerada, convergindo para um estado estável, com uma relação exponencial de retenção por tempo.

Ruiz Emparanza et al. (2022) explica que o fato de a resistência à tração ser reduzida e o módulo de elasticidade não ser efetivamente afetado pelo ambiente de condicionamento ocorre pois, apesar de ambos serem definidos pelo mesmo ensaio mecânico, a resistência à tração está associada a uma máxima força à um nível de

deformação crítica e o módulo de elasticidade a taxa em que a barra se deforma. A resistência à tração da barra é resultado, principalmente, do efeito conjunto das fibras que compõem a matriz polimérica e o módulo de elasticidade é resultado, principalmente, da propriedade das fibras.

Quando submetida a um processo de degradação, a matriz polimérica reduz sua capacidade de transferência de carga e, deste modo, o volume de fibras para qual as cargas são transmitidas diminui, resultando no sobrecarregamento das fibras individualmente, mas não alterando sua taxa de deformação.

Tabela 32: Resultados do ensaio de condicionamento acelerado à 30°C

Ensaio de condicionamento acelerado à 30°C				
Tempo	Resistência à tração	Retenção	Módulo de Elasticidade	Retenção
(dias)	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)
0	1126,51	100,00%	48,65	100,00%
30	1030,58	91,48%	52,05	106,99%
60	990,37	87,91%	51,52	105,90%
90	892,56	79,23%	49,23	101,19%
180	824,71	73,21%	50,08	102,94%

Tabela 33: Resultados do ensaio de condicionamento acelerado à 40°C

Ensaio de condicionamento acelerado à 40°C				
Tempo	Resistência à tração	Retenção	Módulo de Elasticidade	Retenção
(dias)	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)
0	1126,51	100,00%	48,65	100,00%
30	1015,49	90,14%	50,98	104,78%
60	877,11	77,86%	52,51	107,93%
90	862,09	76,53%	48,96	100,63%
180	650,13	57,71%	49,75	102,26%

Tabela 34: Resultados do ensaio de condicionamento acelerado à 60°C

Ensaio de condicionamento acelerado à 60°C				
Tempo	Resistência à tração	Retenção	Módulo de Elasticidade	Retenção
(dias)	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)
0	1126,51	100,00%	48,65	100,00%
30	799,00	70,93%	48,82	100,34%
60	625,77	55,55%	50,04	102,86%
90	528,59	46,92%	50,03	102,83%

Os gráficos apresentados nas Figuras 48 a 50 mostram as relações Tensão *versus* Deformação, reforçando graficamente que a taxa de deformação não apresenta variações significativas com o aumento da temperatura ou do tempo de

condicionamento e mostrando a redução na deformação crítica, devido à diminuição da capacidade de transferência de carga da matriz.

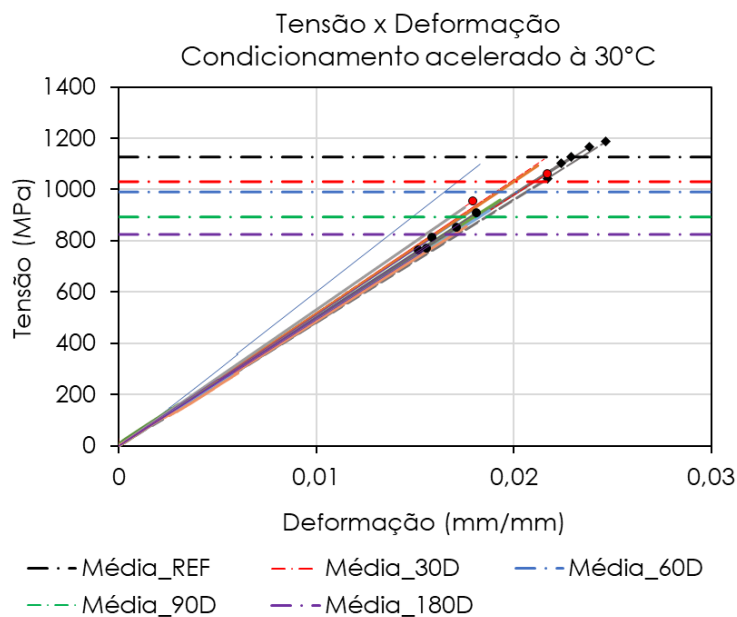


Figura 48: Curva tensão-deformação após condicionamento acelerado à 30°C

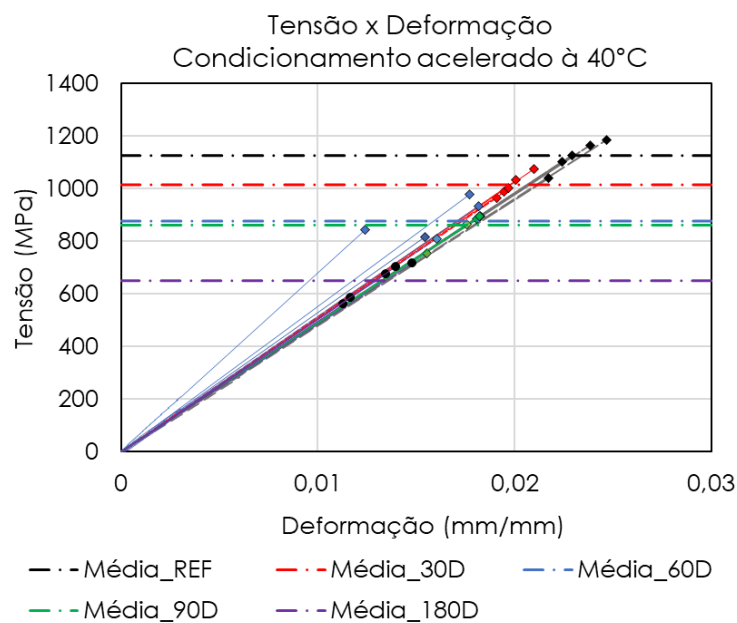


Figura 49: Curva tensão-deformação após condicionamento acelerado à 40°C

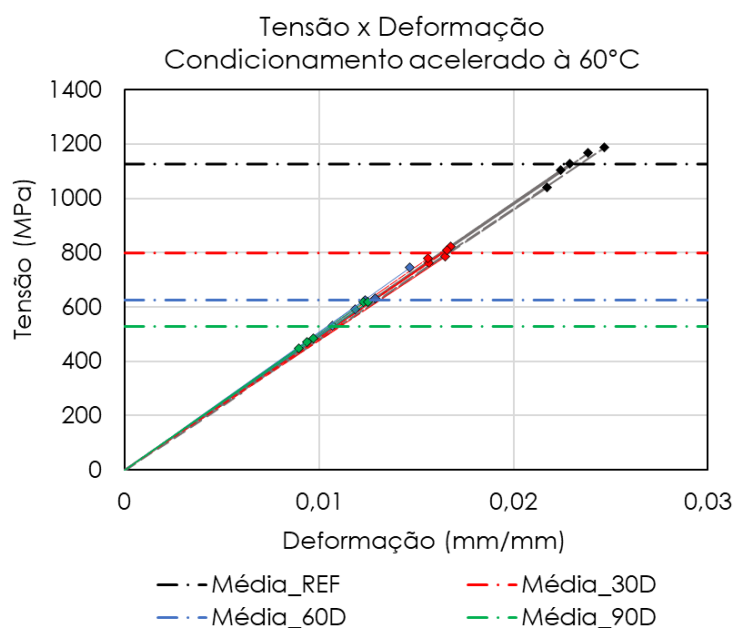


Figura 50: Curva tensão-deformação após condicionamento acelerado à 60°C

Os gráficos apresentados destacam a importância e o efeito da temperatura no condicionamento acelerado. As imersões em solução à 30°C e à 40°C apresentaram níveis de redução de resistência à tração semelhantes em tempos iniciais. As barras imersas em solução à 60°C alcançaram níveis de retenção de resistência inferiores aos observados nas outras temperaturas, mas com taxa de degradação decrescente.

A Figura 51 mostra a camada superficial de uma barra ancorada para ensaio de tração após 90 dias de condicionamento acelerado à 60°C, antes e após o ensaio, verificando a perda da resina nas camadas de enrolamento da barra. Isso demonstra e reforça a existência de alterações na resina da barra. Foi verificada também a mudança de cor e de textura da camada superficial, tendendo a uma coloração branca e uma textura mais áspera após o condicionamento.



Figura 51: Perda da resina nas camadas de enrolamento da barra e alteração de cor

4.2.2 Modelo preditivo baseado na Lei de Arrhenius

Conforme descrito na Seção 2.1.3.4, o modelo preditivo baseado na Lei de Arrhenius tem como princípio que um único mecanismo de deterioração predominante deve ser assumido e este não deve variar com o tempo ou a temperatura da solução de imersão. Autores como Ruiz Emparanza et al. (2022), Wu et al. (2015) e Davalos; Chen; Ray (2012) destacam que o paralelismo das curvas de Arrhenius garantem a não interferência da temperatura no mecanismo de degradação do material. Esse comportamento será apresentado mais adiante.

A Figura 52 mostra os dados de retenção de resistência à tração *versus* tempo de condicionamento. É possível observar uma redução quase que linear para as temperaturas de 30°C e 40°C e um comportamento exponencial para a temperatura de 60°C, destacando novamente o efeito da temperatura na taxa em que a resistência diminui. Esse comportamento é descrito em Benmokrane et al. (2017), que cita que a taxa de reação de degradação aumenta quase linearmente entre a temperatura ambiente e 50°C, enquanto o aumento exponencial é observado em temperaturas mais altas.

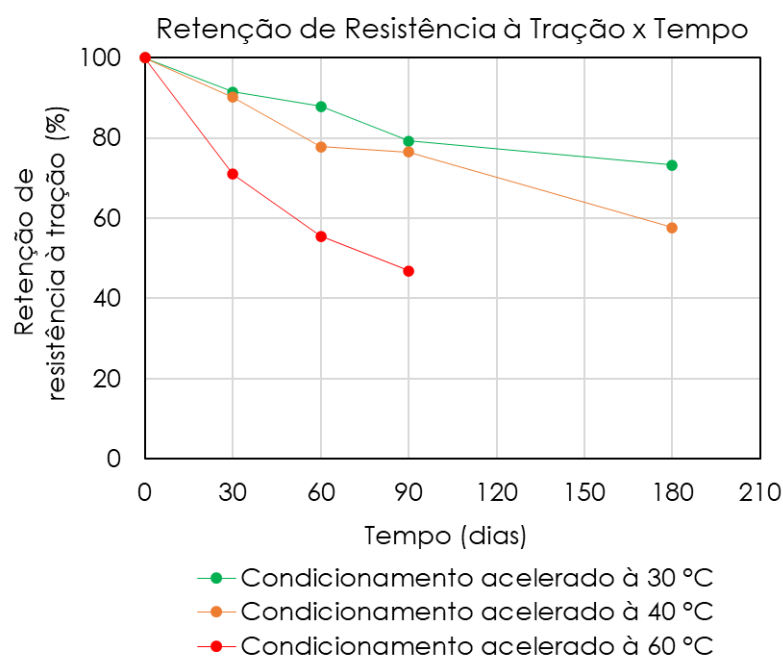


Figura 52: Curvas de retenção de resistência à tração versus tempo

Por meio dos dados apresentados na Figura 52, foram definidas as curvas ajustadas de retenção de resistência à tração *versus* tempo de condicionamento. Os coeficientes y_{∞} e τ foram definidos por minimização do somatório quadrático dos resíduos, utilizando o Solver do Excel (método GRG não linear).

O parâmetro y_{∞} obtido com a temperatura de 30°C destoa dos calculados para as outras temperaturas, que pode ser explicado pela taxa de degradação mais lenta em temperaturas mais baixas, o que não permitiu um bom ajuste ao comportamento exponencial esperado para a curva.

Deste modo, foi considerado y_{∞} para 30°C como a média entre os valores obtidos à 40°C e 60°C, sendo igual à 36,3779%, e τ foi recalculado para 30°C fixando y_{∞} . As curvas foram definidas e seus parâmetros calculados, sendo mostrados na Tabela 35.

Tabela 35: Coeficientes das curvas de retenção de resistência à tração

Equação	$y = (100 - y_{\infty}) \times e^{-\frac{t}{\tau}} + y_{\infty}$	
Temperatura	τ	y_{∞}
30°C	109,28 (Calculado)	66,3845 (Calculado)
	284,69 (Recalculado)	36,3779 (Recalculado)
40°C	171,60	35,6087
60°C	48,54	37,1472

As curvas ajustadas de retenção de resistência à tração *versus* tempo de condicionamento são apresentadas nas Figuras 53 à 55. O comportamento exponencial já em tempos iniciais à 60°C permitiu o bom ajuste da curva, obtendo y_{∞} equivalente ao obtido com a curvas à 40°C, com variação de 4,14%.

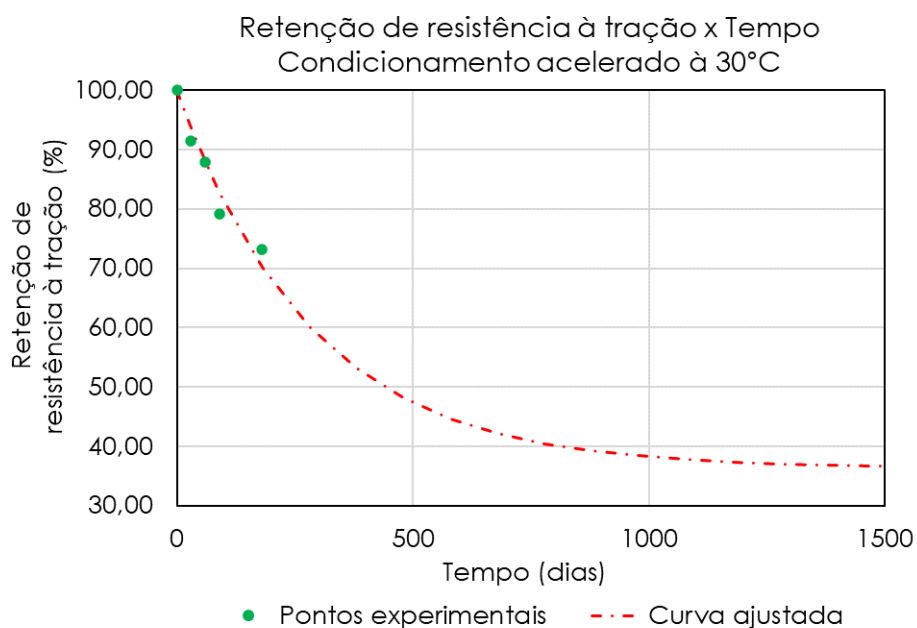


Figura 53: Curva ajustada de retenção de resistência à tração *versus* tempo para 30°C

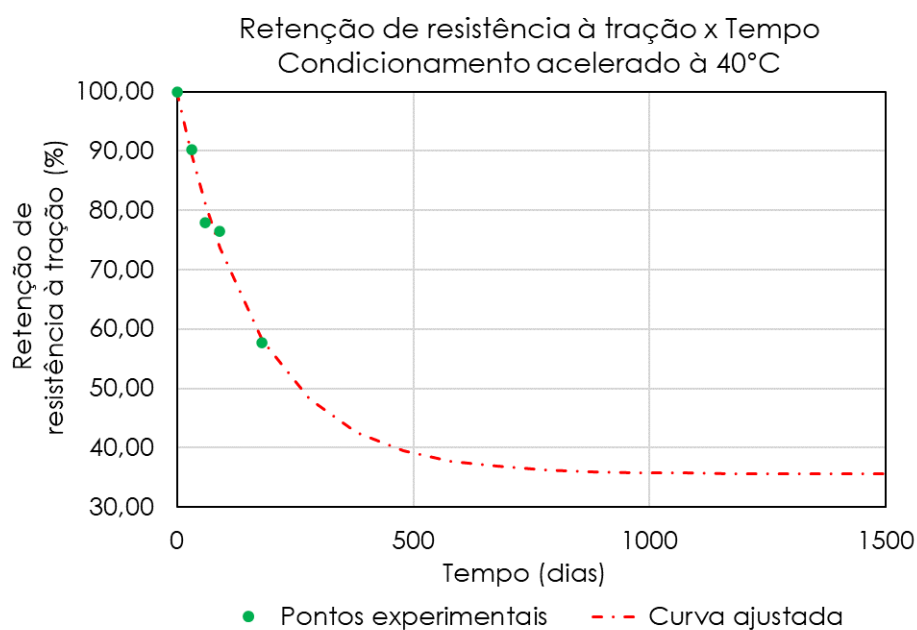


Figura 54: Curva ajustada de retenção de resistência à tração *versus* tempo para 40°C

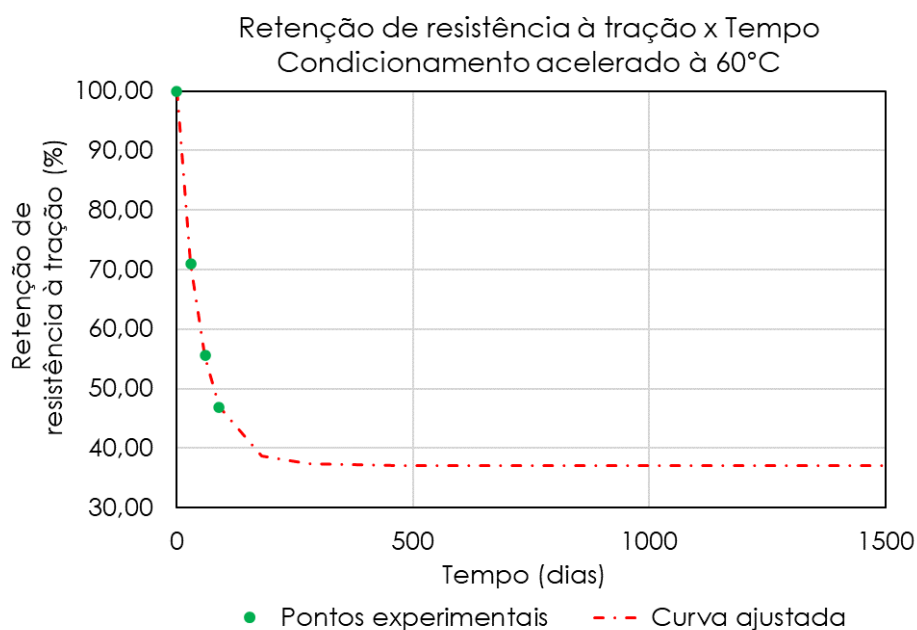


Figura 55: Curva ajustada de retenção de resistência à tração *versus* tempo para 60°C

As curvas de Arrhenius são mostradas na Figura 56. Pode ser observado o alto paralelismo das curvas, mostrando o atendimento ao princípio fundamental do modelo, onde a temperatura acelera o processo de degradação, mas não altera o mecanismo de degradação. A maior diferença observada entre os valores de E_a/R é de 0,22% e os valores de R^2 são superiores a 0,99.

Ruiz Emparanza et al. (2022) utilizaram o mesmo modelo preditivo e obtiveram diferença máxima de 7%, o que mostra a validade dos resultados obtidos neste estudo perante a bibliografia. Além disso, os autores citam que dois critérios devem ser cumpridos para aceitar o modelo desenvolvido: o paralelismo e o ajuste das curvas, para R^2 superior a 0,80; ambos foram atendidos.

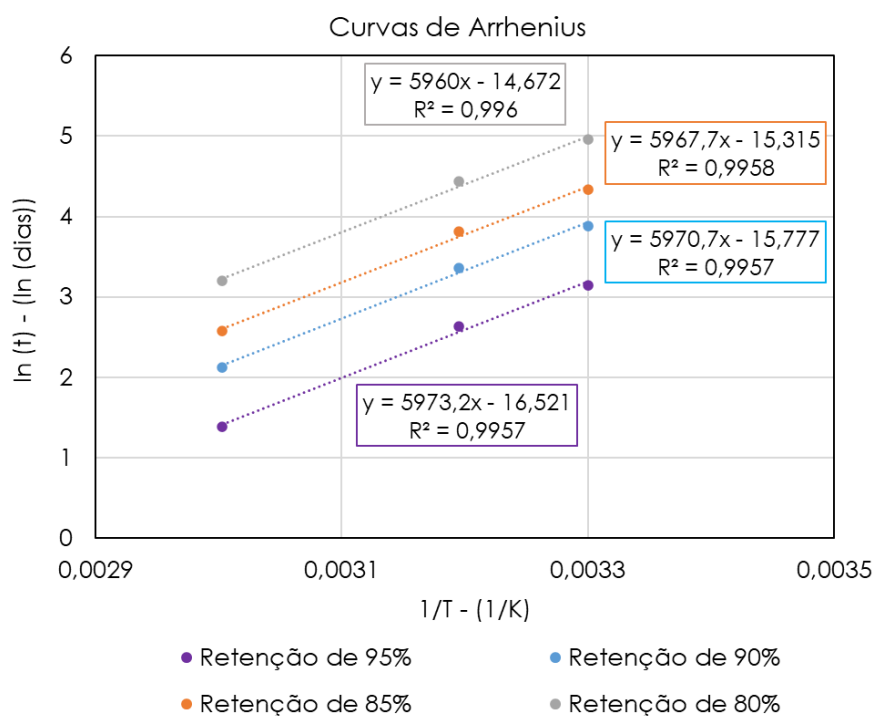


Figura 56: Curvas de Arrhenius

Os valores de E_a/R e da energia de ativação obtidos e suas respectivas médias são apresentados na Tabela 36. Davalos; Chen; Ray (2012) descrevem que a energia de ativação não é uma medida de durabilidade, mas um parâmetro relacionado à degradação dos materiais, que descreve a resposta do material ao ambiente a que foi submetido. Desta forma, diferenças são observadas quando o meio ou o método de imersão é alterado.

Tabela 36: Valores calculados de energia de ativação

Retenção	E_a/R	$E_a \left(\frac{kJ}{mol} \right)$
95%	5973,2	49,66
90%	5970,7	49,64
85%	5967,7	49,62
80%	5960,0	49,55
Média	5967,9	49,62

Davalos; Chen; Ray (2012) e Zhu et al. (2023) compilaram resultados de outros autores que realizaram ensaios de condicionamento acelerado. As condições de imersão, o tipo de barra, a energia de ativação e os autores originais são apresentados na Tabela 37.

Davalos; Chen; Ray (2012) obtiveram valor de energia de ativação para imersão de barras de GFRP (vidro tipo E e resina vinil éster) recobertas por concreto, de 47 kJ/mol. Para uma mesma condição, imersão de barras recobertas por concreto, Zhu et al. (2023) realizaram o ensaio para dois tipos de barras de GFRP (vidro tipo E e resina vinil éster), sendo uma com e outra sem cobertura de areia. A energia de ativação foi igual a 47 kJ/mol para ambas. Os autores dos dois trabalhos citados utilizaram o mesmo modelo de degradação deste trabalho.

Os resultados obtidos neste estudo são semelhantes ao resultado de Phani e Bose (1987), apresentado na Tabela 37, indicando a semelhança do resultado obtido com a bibliografia.

Tabela 37: Resultados de energia de ativação de diferentes estudos

Fonte: (DAVALOS; CHEN; RAY, 2012) – adaptado

Tipo de barra de GFRP	Condição de imersão	$E_a \left(\frac{kJ}{mol} \right)$	Fonte
Vidro E e Vinil Éster	Imersão direta em solução alcalina	41	(CHEN <i>et al.</i> , 2007)
Vidro E e Vinil Éster	Concreto imerso em água	52 e 69 *	(DEJKE, 2001)
Vidro E e Poliéster	Imersão direta em água	50	(PHANI; BOSE, 1987)
Vidro e Poliéster	Imersão em solução alcalina	49,62	Este trabalho
* Barras diferentes em mesma condição de imersão			

Com a definição de E_a/R médio, mostrado na Tabela 36, foram calculados os parâmetros de mudança de tempo (TSF) para as temperaturas de 5°C, 10°C, 15°C, 20°C e 30°C. Eles são apresentados na Tabela 38.

Tabela 38: Fatores de correção de tempo (TSF)

Temperatura desejada	$TSF - 30^\circ C$	$TSF - 40^\circ C$	$TSF - 60^\circ C$
5°C	5,09	9,07	25,99
10°C	3,59	6,40	18,34
15°C	2,57	4,58	13,10
20°C	1,85	3,31	9,47
30°C	1,00	1,78	5,11

As curvas mestras de cada uma dessas temperaturas é mostrada na Figura 57. A retenção de resistência à tração estável média calculada é de, aproximadamente, 38%, inferior ao fator de redução ambiental de 70%, para condição de exposição do concreto à água ou solo, exposto na ACI 440.1R (2015), e a outros

fatores de redução expostos em diferentes normatizações, para dimensionamento no estado limite último.

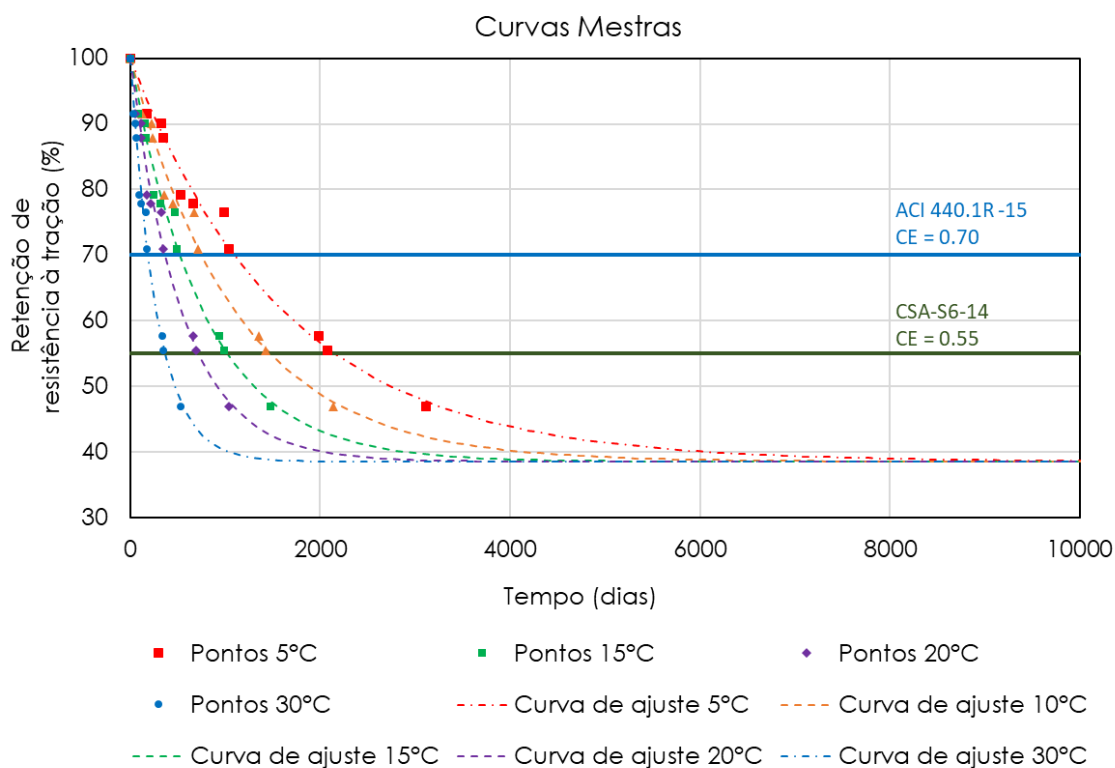


Figura 57: Curvas mestras para diferentes temperaturas

Davalos, Chen e Ray (2012) previram retenção de resistência estável de 45% para vigas de concreto não carregadas e de 38% para vigas de concreto carregadas, e Zhu et al. (2023) de, aproximadamente, 52% para ambos os tipos de barras experimentadas. Ambos observam que os resultados obtidos demonstram que os fatores de resistência, por exemplo, da ACI 440.1R (2015) subestimam o grau de degradação. Contudo, destacam que em condições reais de aplicação das estruturas de concreto, raramente estariam sob condição totalmente saturada, como a realizada experimentalmente.

Para este estudo, a retenção de tensão estável de 38% se compara com os resultados de Phani e Bose (1987), que utilizaram compósito de GFRP, também, com resina poliéster. Os autores obtiveram retenção de tensão estável de, aproximadamente, 31%. Além disso, as mesmas observações podem ser realizadas, ou seja, o fator de 0,7 da ACI 440.1R (2015) subestima o grau de degradação, mas deve ser destacada a imersão direta de barras em solução alcalina e, em

complemento, a recomendação de não uso de barras com resina poliéster pela ASTM D7957/D7957M (2022) e a recomendação da AFGC (2023).

A Tabela 39 apresenta o tempo estimado, por meio das curvas da Figura 57, para retenção de 70% da resistência inicial, em condição de exposição direta das barras à solução alcalina, para cada uma das temperaturas extrapoladas. Os resultados reforçam que o fator de redução ambiental da ACI 440.1R (2015) não garante a segurança de estruturas de concreto reforçadas com barras de GFRP com resina poliéster à longo prazo (considerando vida útil de 50 anos para estruturas de concreto armado), visto que elas atingem esse nível de retenção em um curto período.

A AFGC (2023) aponta que barras com matrizes termofixas de poliéster não são recomendadas pelo “Eurocode 1” para reforço permanente de estruturas. Além disso, destaca que são utilizadas apenas para estruturas temporárias de até 1 ano. Como mostrado na Tabela 39, essa aplicação se mostra válida, pois as barras ensaiadas conseguem garantir retenção de resistência à tração de 70% por até um ano em ambiente alcalino ($\text{pH} \cong 13$) em temperaturas de até 20°C.

Tabela 39: Vida útil das barras de GFRP diretamente expostas à solução

Temperatura	Tempo para retenção de 70%	
	Dias	Anos
5°C	1080	3,0
10°C	730	2,0
15°C	500	1,4
20°C	350	1,0
30°C	180	0,5

4.3 Caracterização do comportamento mecânico do concreto

A Tabela 40 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização do concreto utilizado nas vigas de referência.

Tabela 40: Resultados ensaios de caracterização - concreto de referência

Parâmetro	Resistência à compressão	Módulo de Elasticidade	Resistência à tração
	(MPa)	(GPa)	(MPa)
Média	35,49	31,42	3,94
Desv. Padrão	2,22	1,32	0,31
COV	6,27%	4,21%	7,94%

A Tabela 41 apresenta os resultados de resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração do concreto após a imersão em água. A resistência

à compressão e o módulo de elasticidade não apresentaram alteração significativa após a imersão. A resistência à tração média do concreto apresentou um leve aumento, mas sem diferença estatística entre os dados.

Tabela 41: Resultados ensaios de caracterização – condicionadas

Parâmetro	Resistência à compressão	Módulo de Elasticidade	Resistência à tração
	(MPa)	(GPa)	(MPa)
Média	35,14	30,02	4,67
Desv. Padrão	3,49	2,80	0,29
COV	9,93%	9,31%	6,16%

4.4 Comportamento a flexão das vigas armadas com barras de GFRP

4.4.1 Análise das vigas não submetidas ao condicionamento acelerado

A Figura 58 mostra a ruptura da armadura após ensaio de flexão das vigas. Segundo Esmaeili et al. (2020), a forma em que a barra rompe em um ensaio de tração direta e no ensaio de flexão de uma viga difere, pois, no primeiro o comprimento livre em que a tração ocorre é maior do que no segundo. Em um ensaio de flexão a falha da barra é mais plana em comparação com o ensaio de tração direta.



Figura 58: Ruptura da armadura após ensaio de flexão

O uso da correlação de imagem digital (DIC, do inglês *Digital Image Correlation*) possibilitou a análise da fissuração das vigas. Para validar os resultados obtidos com o DIC, foram coletados dados de flecha e comparados com os resultados experimentais adquiridos pelo LVDT. As Figuras 59 a 61 apresentam a comparação e mostram a boa relação entre os resultados experimentais e do DIC.

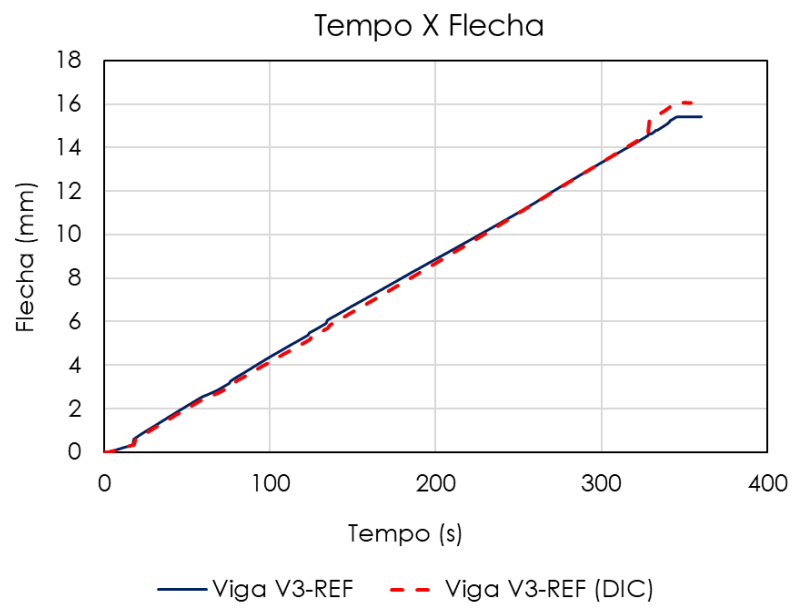


Figura 59: Curvas Flecha versus Tempo – Viga V3-REF

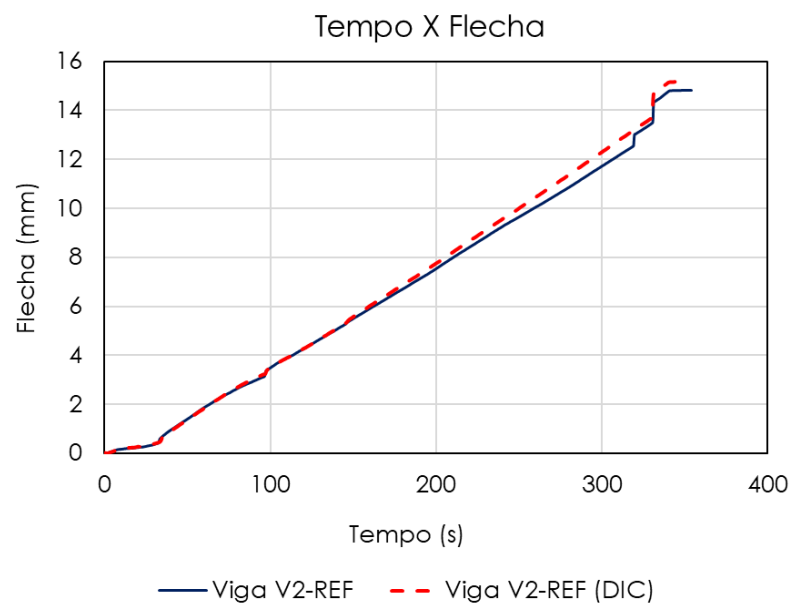


Figura 60: Curvas Flecha versus Tempo – Viga V2-REF

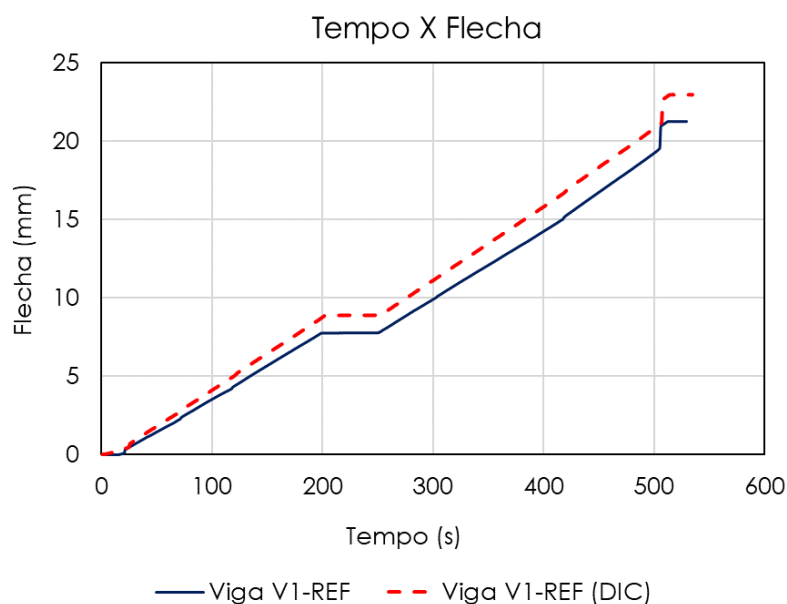


Figura 61: Curvas Flecha versus Tempo – Viga V1-REF

A boa correlação entre os dados possibilitou a coleta de outros resultados do DIC. Os dados de flecha coletados foram comparados com os resultados experimentais, como mostrado na Figura 62. Foi verificado um bom ajuste entre as curvas para as vigas V2-REF e V3-REF, entretanto isso não foi observado para a viga V1-REF. Como pode ser observado na Figura 62, existe uma pequena diferença entre os dados da Viga V1-REF, sendo obtidas flechas ligeiramente maiores com o DIC.

O não ajuste da curva da viga V1 ocorre devido a uma pequena diferença no comportamento inicial. Como pode ser observado na Figura 63, a medição experimental da flecha não foi realizada até aproximadamente 9 kN para a viga V1-REF pelo LVDT. Devido à boa correlação observada para as outras vigas, os dados de flecha obtidos com o DIC para a viga V1-REF foram utilizados nas análises.

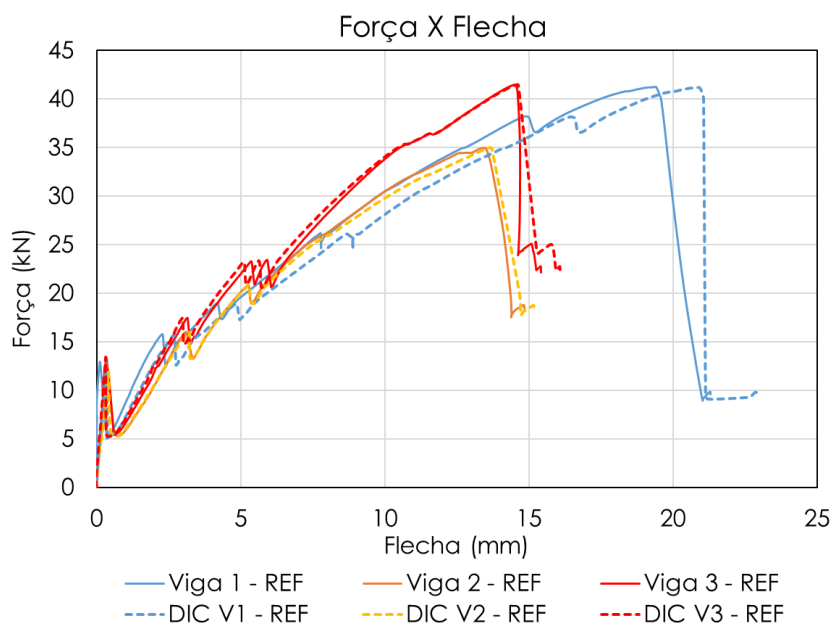


Figura 62: Curvas Força versus Flecha (REF) – DIC e experimental

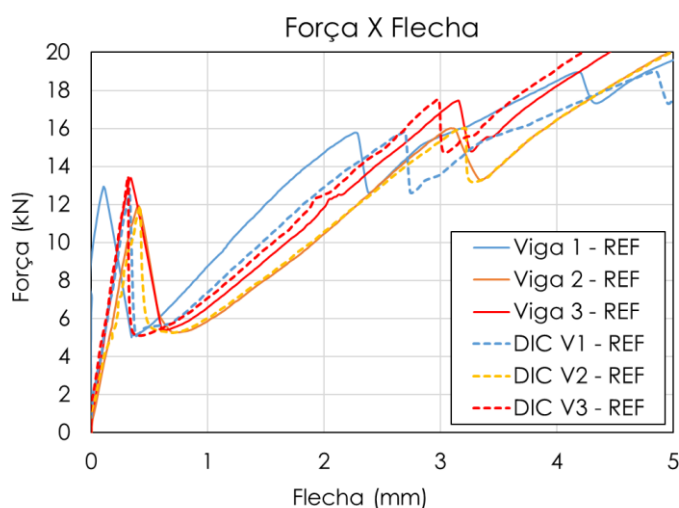


Figura 63: Ajuste inicial das curvas Força versus Flecha (REF)

4.4.1.1 Análise da resposta à flexão das vigas armadas com GFRP

Os ensaios de flexão à três pontos nas vigas de referência apresentaram resultados consistentes com os cálculos analíticos. Seguindo as formulações da ACI 440.1R (2015) era esperado um momento e força máxima de aproximadamente 10,58 kNm e 42,33 kN, respectivamente.

O momento e a força máxima calculados apresentam uma diferença de 7,31% em relação à média experimental. A viga V2-REF foi a que mais variou em relação ao cálculo analítico. Em relação à flecha máxima (no pico de carga), as vigas V2-REF e V3-REF apresentaram valores semelhantes. Contudo, a viga V1 apresentou maior

capacidade de deformação. A Tabela 42 apresenta os resultados obtidos experimentalmente.

Tabela 42: Resultados do ensaio de flexão – vigas de referência

Parâmetro / Viga	Força	Momento	Flecha
	(kN)	(kN.m)	(mm)
V1-REF	41,22	10,31	20,90 (DIC)
V2-REF	34,96	8,74	13,45
V3-REF	41,52	10,38	14,51
Média	39,24	9,81	15,79
Desvio Padrão	3,02	0,76	2,59
COV (%)	8,00	8,00	16,00

A Figura 64 mostra o comportamento de ruptura em um gráfico de Força *versus* Flecha das três vigas ensaiadas. Até uma solicitação de carga de 25 kN, o comportamento das três vigas se mostrou similar em termos de força máxima e flecha.

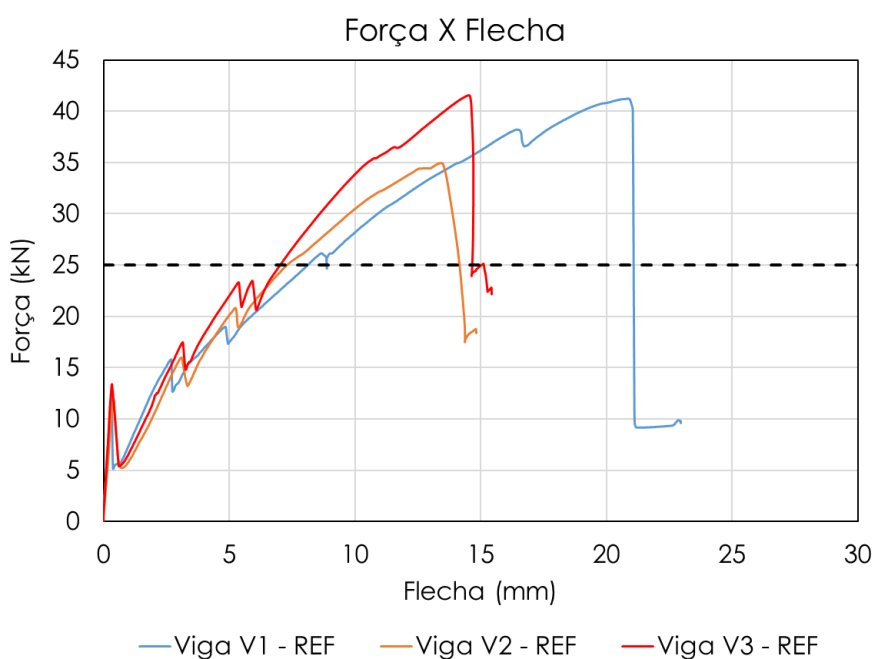


Figura 64: Força *versus* Flecha - vigas de referência

A curva Força *versus* Flecha, mostrada na Figura 64, apresentou pontos expressivos de quedas de carga, que podem ser atribuídos à baixa taxa de armadura utilizada. O primeiro ponto de descarregamento observado está associado ao limite de resistência à tração do concreto, seguido pela recuperação da viga, mas com rigidez reduzida, definindo o início da participação da barra na resistência aos esforços de tração.

Alsayed (1998) estudou, o comportamento à flexão de vigas armadas com GFRP com relação taxa de armadura por taxa de armadura balanceada iguais à 0,64 e 0,90 e vigas armadas com aço com relação ρ_f/ρ_{fb} de 0,68. O autor observou o mesmo comportamento deste estudo, onde as curvas Força *versus* Flecha apresentaram quedas de carga, curvas apresentadas na Figura 65. Isso não foi observado para viga armada com aço. O autor atribuiu o comportamento observado em seu estudo ao baixo módulo de elasticidade das barras de GFRP.

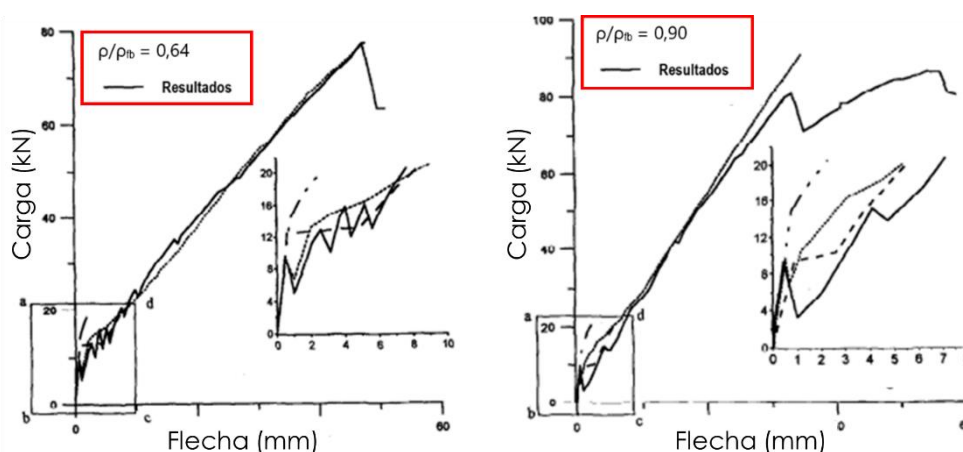


Figura 65: Comportamento a flexão de quatro pontos de viga armada com GFRP.

Fonte: Alsayed (1998) - adaptado

A partir da análise DIC, foi possível observar a relação entre o surgimento ou evolução de uma fissura com os pontos de descarregamento. As Figuras 66 a 68 apresentam a relação entre a força aplicada e as aberturas de fissuras. O início da evolução da fissura central coincide com o primeiro descarregamento observado nas curvas de Força *versus* Tempo. O surgimento e/ou evolução de uma fissura caracteriza o comportamento a flexão da viga, visto que a viga reduz sua rigidez e diminui, momentaneamente, a carga resistida.

A diferença observada no comportamento a flexão, dentre os métodos de dimensionamento, pode ser justificada pela taxa de armadura utilizada, ou seja, em taxas maiores, para rompimento por esmagamento do concreto, se tem um melhor controle de fissuração e deflexão.

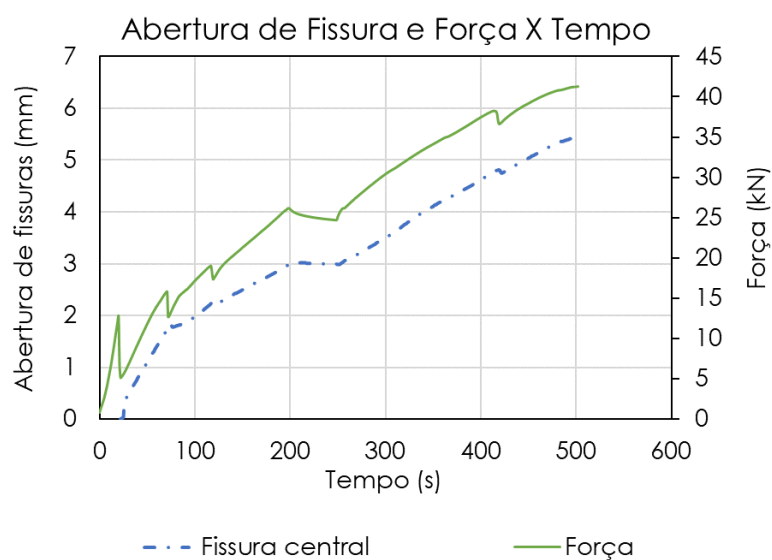


Figura 66: Curvas de Aberturas de Fissura e Força versus Tempo – Viga V1-REF

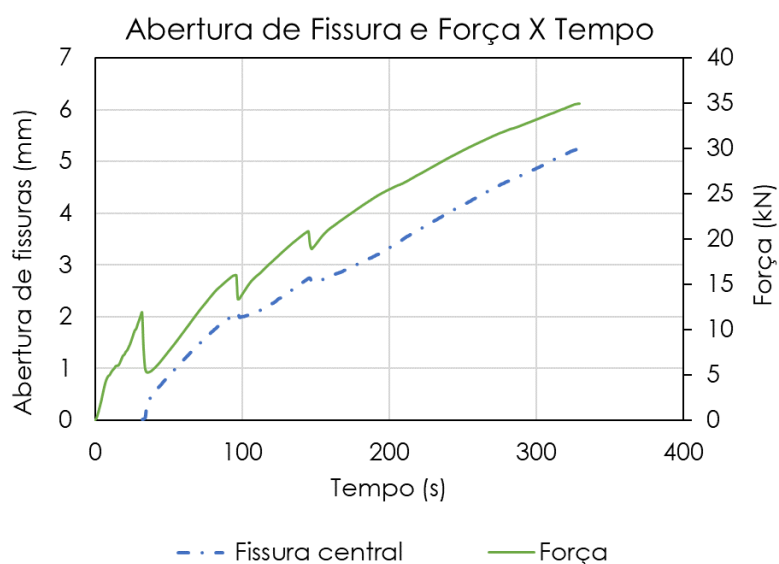


Figura 67: Curvas de Aberturas de Fissura e Força versus Tempo – Viga V2-REF

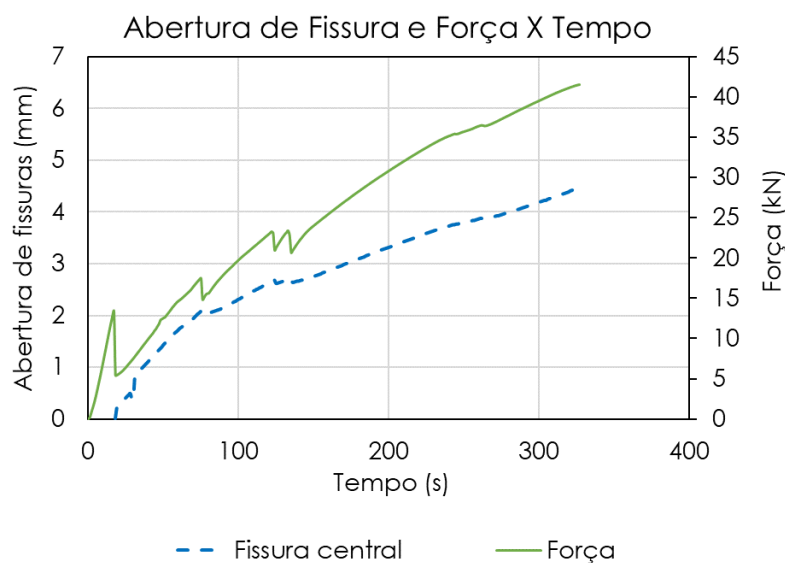


Figura 68: Curvas de Aberturas de Fissura e Força versus Tempo – Viga V3-REF

4.4.1.2 Análise da flecha e fissuração das vigas armadas com GFRP

Foram coletados do DIC dados de abertura da primeira fissura que se desenvolve na viga. As Figuras 69 a 71 mostram o início da fissuração e a condição fissurada da viga no momento da ruptura.

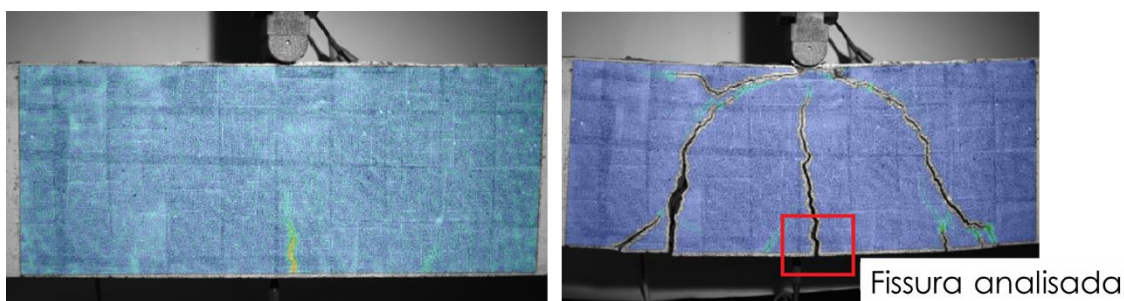


Figura 69: Viga V1-REF - Início da fissuração e na ruptura

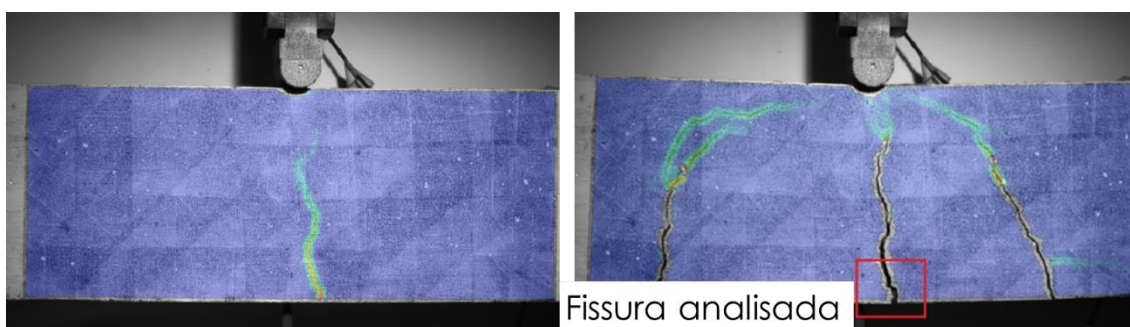


Figura 70: Viga V2-REF - Início da fissuração e na ruptura

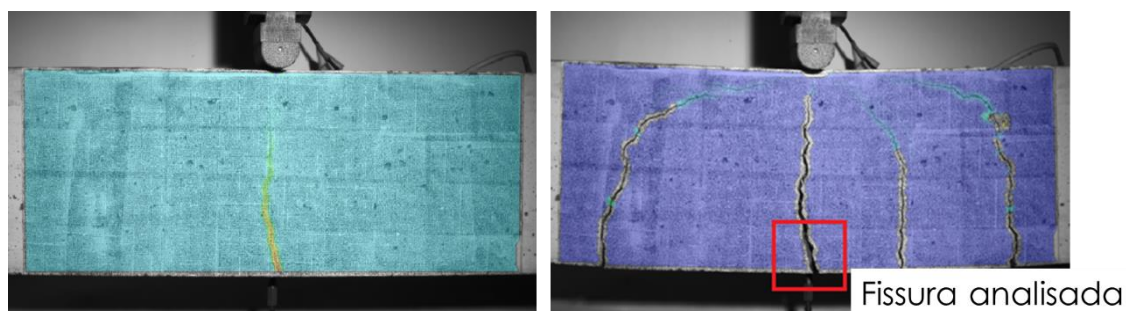


Figura 71: Viga V3-REF - Início da fissuração e na ruptura

Na Figura 72 é mostrada a curva de Abertura de Fissura *versus* Força, para a primeira fissura formada nas vigas. As regiões onde é observado um “nó” representam a queda de carga observada na curva Força *versus* Flecha, devido ao surgimento ou evolução de uma fissura. Pode-se observar que a Viga V1-REF apresentou maior abertura de fissura, seguida pela V2-REF e V3-REF, respectivamente.

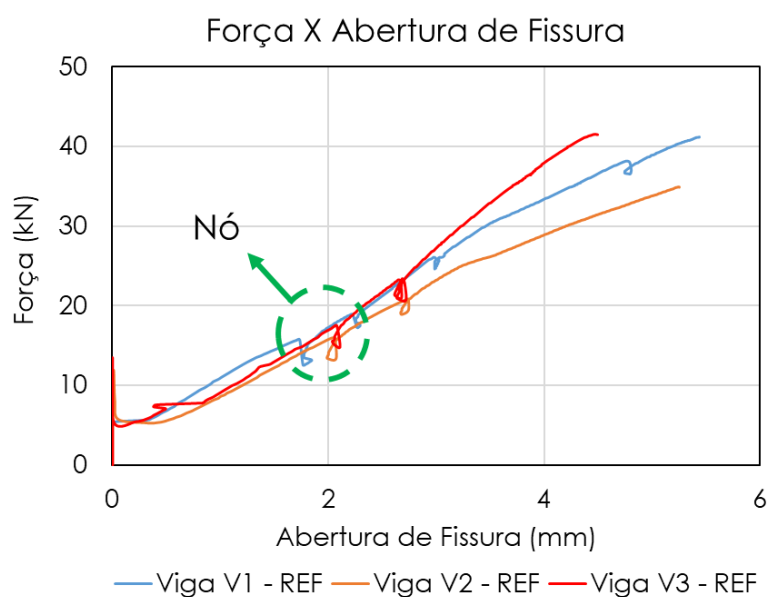


Figura 72: Curvas de Força *versus* Abertura de Fissura

A partir desta curva, foram coletados os momentos de fissuração. Os momentos de fissuração das vigas V1-REF, V2-REF e V3-REF foram 3,18 kN.m, 2,96 kN.m e 3,35 kN.m, respectivamente. É estimado pela ACI 440.1R (2015) um momento de fissuração de 2,69 kN.m. A Tabela 43 mostra os dados apresentados e o erro calculado entre os dados experimentais e o teórico.

Tabela 43: Momentos de fissuração - DIC e cálculo analítico

Amostragem	Experimental (DIC)	ACI	Diferença
	(kNm)	(kNm)	(%)
Viga 1 - REF	3,18	2,69	15%
Viga 2 - REF	2,96		9%
Viga 3 - REF	3,35		20%
Média	3,16		15%

A Figura 73 compara as curvas Força *versus* Flecha obtidas experimentalmente com as curvas estimadas, mostrando que as equações presentes na ACI 440.1R (2015) e ACI 440.11 (2022) subestimam os valores experimentais, calculando flechas inferiores.

Essa mesma observação é feita por Goldston et al. (2017), que ensaiaram vigas de concreto de alto desempenho reforçadas com barras de GFRP à flexão de três pontos, e por Fugiyama (2022), ambos, em relação ao cálculo proposto pela ACI 440.1R (2015). Goldston et al. (2017) ensaiou, ainda, vigas com diferentes taxas de armadura, verificando o mesmo cenário para vigas com ruptura por esmagamento do concreto e ruptura por tração da barra.

Goldston et al. (2017) citam ainda que a abordagem feita pela Canadian Standards Association (CSA) de 2012 se mostrou mais precisa em calcular as flechas. Como descrito pelos autores, a norma canadense não utiliza o método de momento de inércia efetiva, mas sugerem uma relação momento-curvatura para cálculo da flecha, sendo a formulação expressa na Equação 18.

$$\Delta = \frac{P.L^3}{48.E_c.I_{cr}} \cdot \left(1 - 8 \cdot \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right) \cdot \left(\frac{L_g}{L} \right)^3 \right) \quad \text{Equação 18}$$

onde:

- L_g é a distância do ponto onde o momento de fissuração atua ao apoio.

Utilizando a Equação 18, verifica-se um melhor ajuste da curva estimada até o nível de 25 kN de força adotado como referência. A comparação entre as flechas calculadas utilizando as equações propostas pelas normatizações, também, são apresentadas na Figura 73.

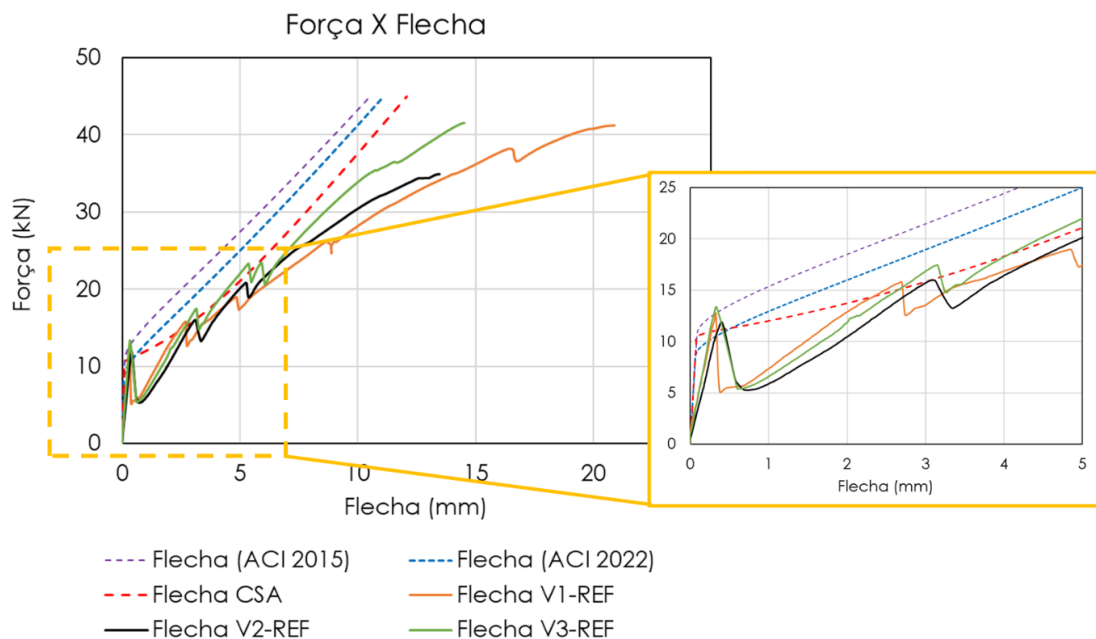


Figura 73: Curvas Força versus Flecha – vigas referência

4.4.1.3 Análise do comportamento das armaduras longitudinais

A Figura 74 mostra a relação entre a força aplicada no ensaio de flexão da viga e as deformações das barras longitudinais das três vigas de referência. Quando a curva se torna totalmente vertical, como para as vigas V1-REF e V3-REF, o extensômetro utilizado se rompeu ou não mediu dados antes da ruptura da viga. O comportamento Força versus Deformação das armaduras se mostraram similares para as três amostras.

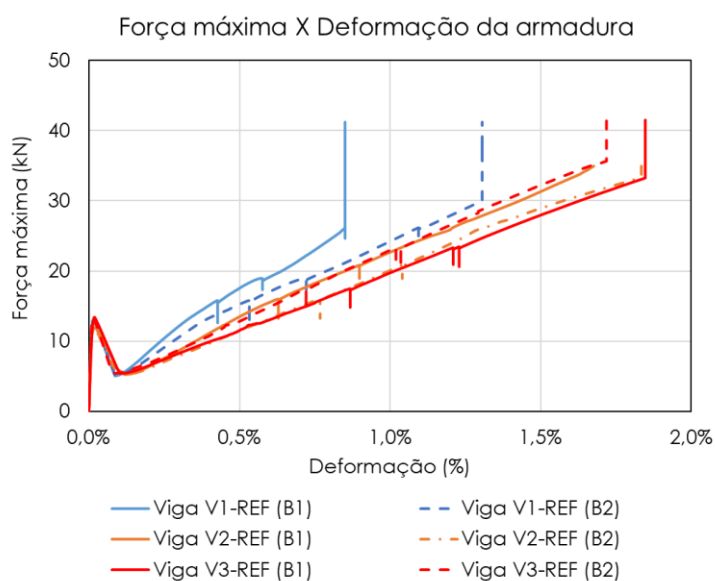


Figura 74: Curva Força versus Deformação das armaduras das vigas de referência

Devido a elasticidade linear das barras de GFRP, é possível adotar uma tendência linear da curva de deformação da armadura até a ruptura da viga. Para melhor ajuste da curva (R^2) foram plotados três gráficos de Deformação *versus* Força (Figura 75), considerando somente a região pós fissuração da viga. Foi considerada somente a parcela do gráfico pós fissuração, pois é o momento em que a barra começa efetivamente a contribuir com a resistência aos esforços de tração da viga.

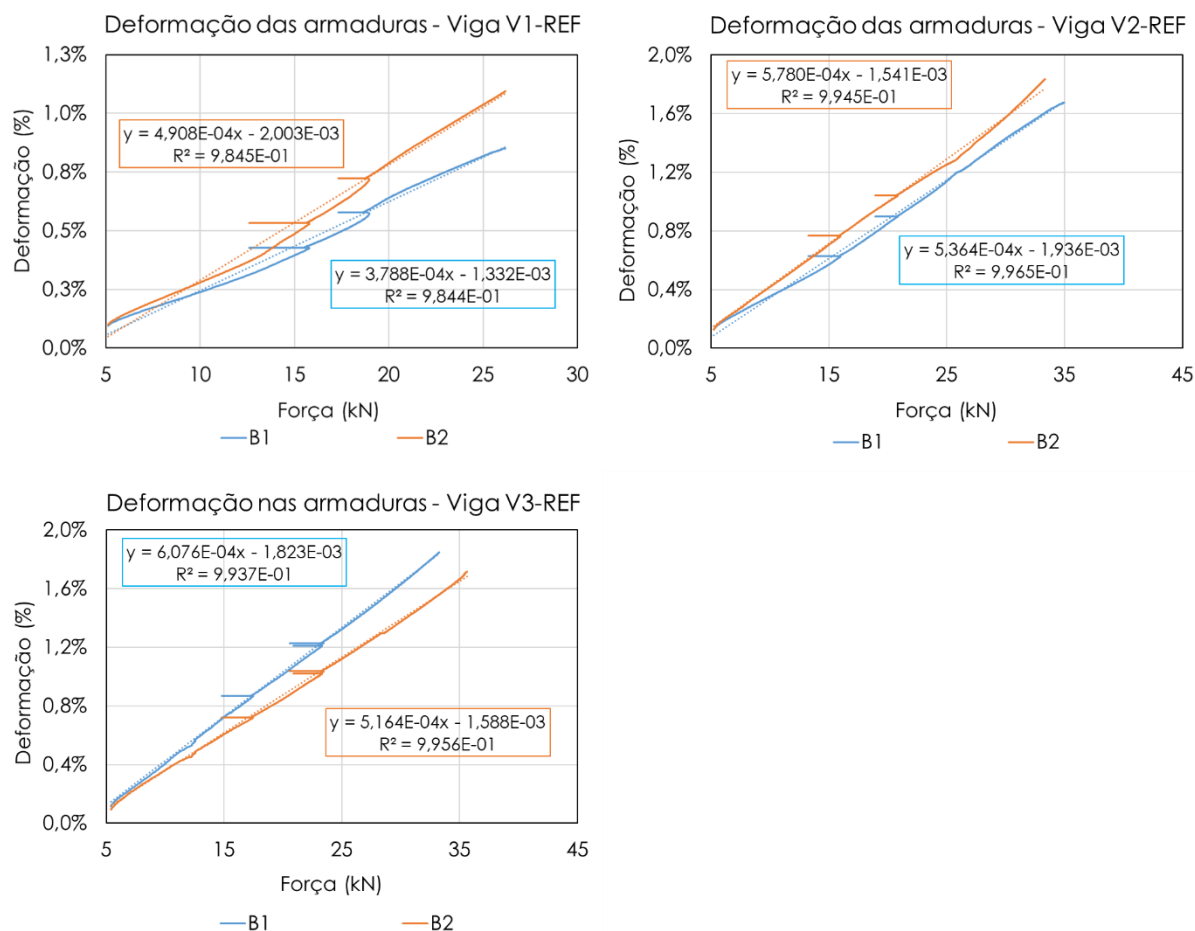


Figura 75: Curva Deformação da armadura *versus* Força

A partir da linearização das curvas, é possível estimar as deformações nas armaduras no momento da falha da viga e definir a tensão de tração na barra. A deformação última das barras B1 e B2 de reforço das vigas V1-REF, V2-REF e V3-REF, utilizando as equações de reta apresentadas na Figura 75, foram iguais a [1,43%, 1,83%], [1,87%, 1,68%] e [2,34%, 1,99%], respectivamente.

Considerando o módulo de elasticidade da barra definido experimentalmente de 48,65 GPa (resultados apresentados na Seção 4.2), foram calculadas as tensões de tração resistidas pelas barras, mostradas na Tabela 44. A resistência à tração,

calculada a partir da deformação da armadura, que é apresentada é a da barra de reforço mais solicitada. Para a avaliação dessas análises, esses resultados foram comparados com o cálculo analítico realizado a partir da equação apresentada na Seção 3.1.2.4.1.

Tabela 44: Estimativa de resistência à tração da armadura

Viga	Momento máximo resistido	Resistência à tração (ACI 440.1R - 2015)	Resistência à tração (deformação da armadura)	Diferença
	(kNm)	(MPa)	(MPa)	(%)
V1 - REF	10,31	1105,09	888,33	19,61
V2 - REF	8,74	936,80	908,21	3,05
V3 - REF	10,38	1112,59	1138,68	2,35

As vigas V2-REF e V3-REF mostraram melhor ajuste com o cálculo analítico, demonstrando uma boa convergência de resultados. Devido a essa boa convergência de resultados, essa dupla análise será apresentada posteriormente para vigas submetidas ao procedimento de condicionamento acelerado, com objetivo de observar e quantificar a degradação da barra inserida no concreto.

Apesar da variação de 19,61% apresentada entre o cálculo analítico e o verificado utilizando as curvas de Deformação *versus* Força da viga V1-REF, é possível realizar essa análise utilizando os cálculos analíticos, dada a boa convergência observada para as outras vigas.

4.4.2 Efeito hidrotérmico nas vigas armadas com barras de GFRP

O modo de falha das vigas após o condicionamento acelerado, foi semelhante ao observado nas vigas de referência. As vigas condicionadas e as vigas de referência, em geral, não apresentaram esmagamento do concreto, como mostrado na Figura 76. A viga V1-REF apresentou fissuras próximas ao ponto de aplicação de carga em comparação as demais, o que, possivelmente, indica para uma falha mista com maior contribuição da parte comprimida do concreto, dado os valores próximos de taxa de armadura balanceada e taxa utilizada,

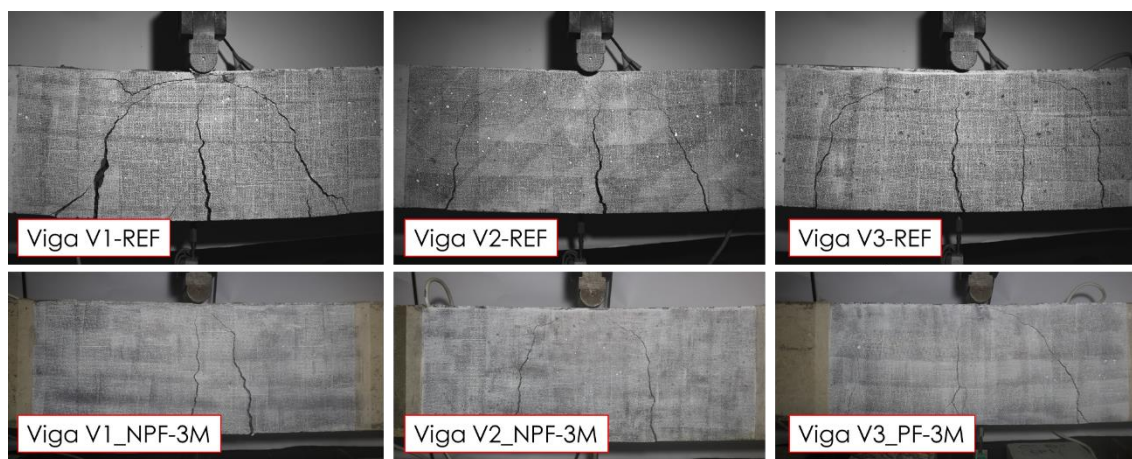


Figura 76: Comparativo do modo de ruptura das vigas

As Figuras 77 a 79 mostram as curvas de Tempo *versus* Flecha, constatando a boa correlação entre os dados experimentais coletado pelo LVDT e os dados obtidos pela correlação de imagens digitais. Os corpos de prova foram nomeados com a numeração da viga (V1, V2 e V3), se ela é ou não de pré-fissurada (PF e NPF, respectivamente) e o tempo de condicionamento (3M). Por exemplo, a viga V1_NPF-3M se refere à viga número um, não pré-fissurada e condicionada por 3 meses em água.

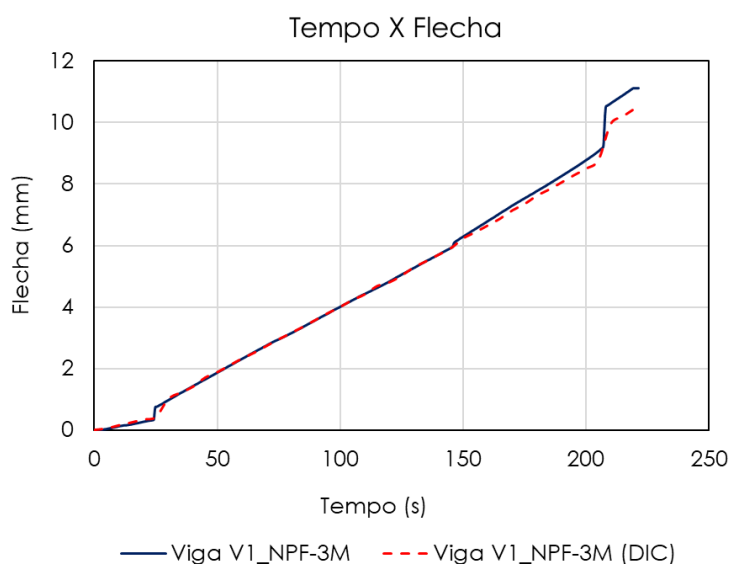


Figura 77: Curvas Flecha *versus* Tempo – Viga V1_NPF-3M

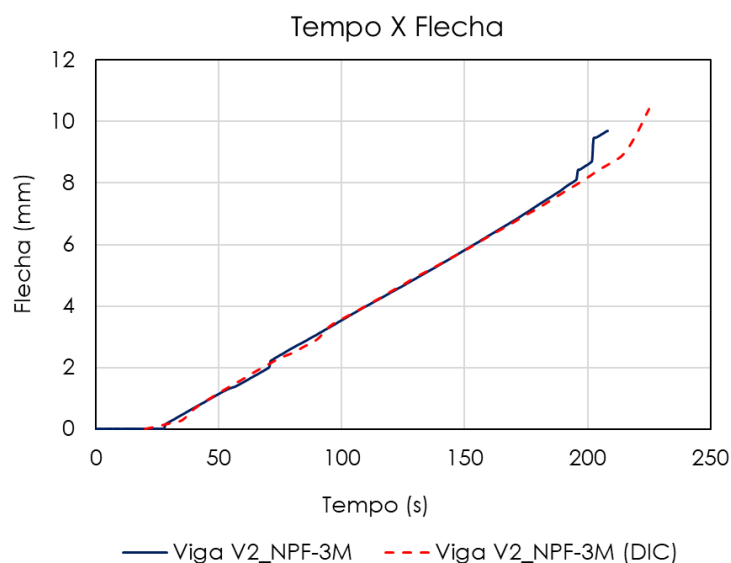


Figura 78: Curvas Flecha versus Tempo – Viga V2_NPF-3M

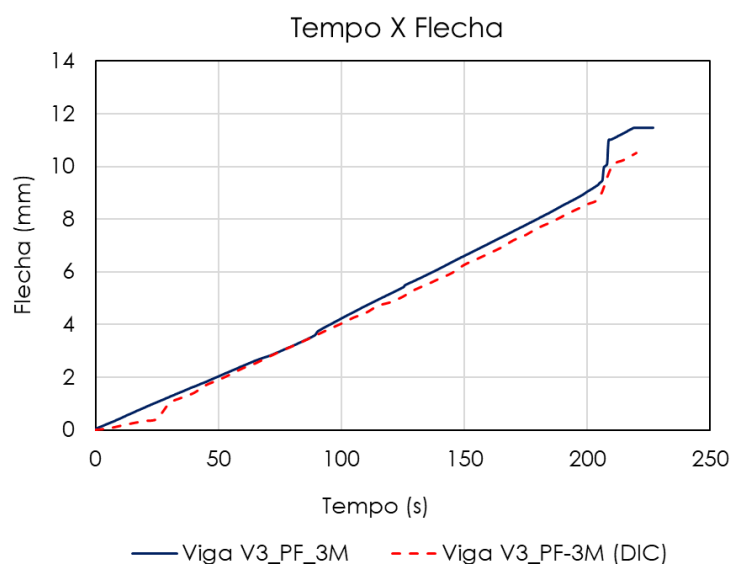


Figura 79: Curvas Flecha versus Tempo – Viga V3_PF-3M

A plotagem das curvas de Força *versus* Flecha para os dados obtidos experimentalmente e para os dados do DIC apresentaram, em geral, uma boa convergência. Os dados de flecha do DIC para a viga V2-NPF-3M precisaram ser utilizados devido a uma pequena diferença no comportamento inicial, em razão da leitura inicial do LVDT. As Figuras 80 e 81 mostram a convergência e a pequena diferença entre os dados experimentais e do DIC, respectivamente.

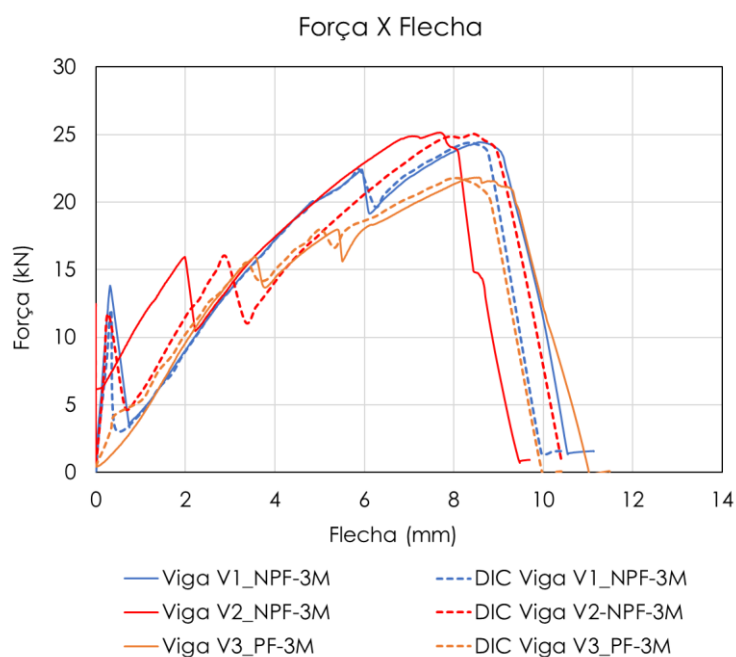


Figura 80: Curvas Força versus Flecha (3M) – DIC e experimental

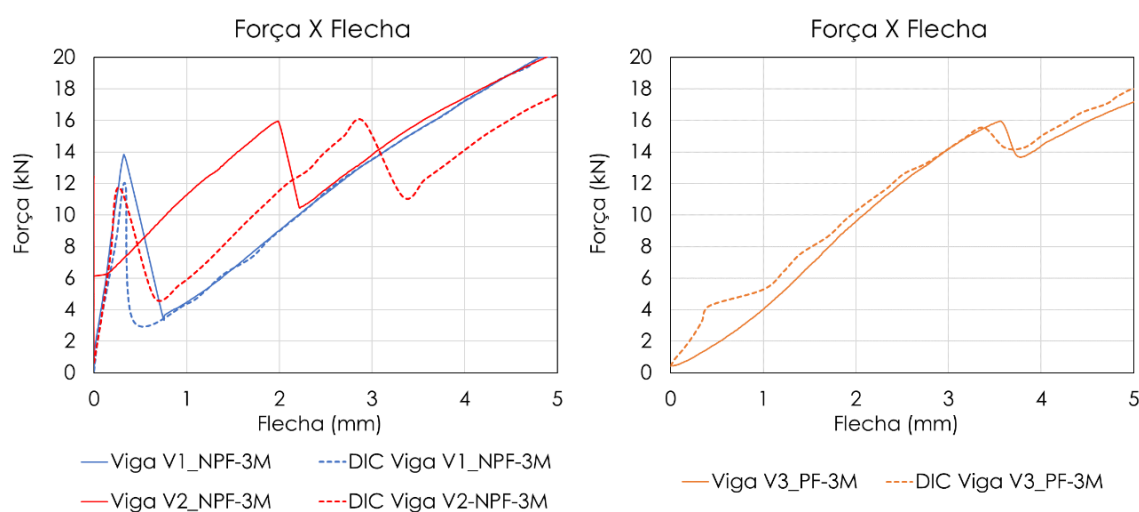


Figura 81: Ajuste inicial das curvas Força versus Flecha (3M)

4.4.2.1 Efeito hidrotérmico na resposta a flexão das vigas

Os corpos de prova cilíndricos de concreto não foram significativamente afetados pelo condicionamento acelerado em água, como apresentado na Seção 4.3, demonstrando a boa cura do concreto nos 28 dias iniciais em câmara úmida. A resistência à compressão e o módulo de elasticidade não sofreram alteração significativa, o que permite pressupor que as perdas de capacidade de carga das vigas estão relacionadas principalmente às perdas mecânicas da armadura.

A falha precoce das vigas após o condicionamento acelerado acontece, principalmente, devido à redução da resistência à tração das barras de reforço. A Figura 82 mostra as curvas Força *versus* Flecha, onde são comparadas as respostas das vigas antes e após o condicionamento, podendo observar que a rigidez à flexão é similar para ambos os cenários e que a menor flecha ocorre essencialmente devido à redução da capacidade de carga.

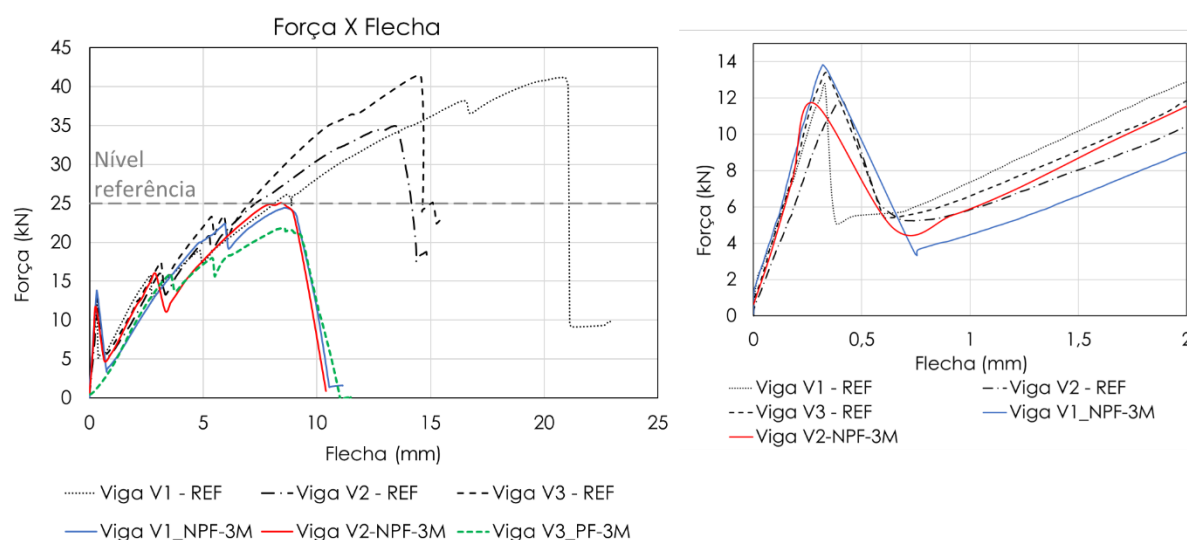


Figura 82: Comparação das curvas Força *versus* Flecha

Essa rigidez semelhante para as vigas antes e após o condicionamento é justificada principalmente pelo comportamento à tração das barras, visto que, elas não apresentaram redução ou aumento significativo no módulo de elasticidade após o condicionamento acelerado (ver Seção 4.2.1.3).

A Figura 82 mostra que não houve variação considerável no nível de força em que a primeira fissura é formada, dado o baixo aumento na resistência à tração do concreto. O ponto em que a viga começa a recuperar sua capacidade de carga após a formação da primeira fissura também não apresentou diferenças significativas em relação as vigas de referência. Além disso, as vigas de referência apresentaram maior dispersão na resposta à flexão após a carga de 25 kN.

O desenvolvimento das curvas de Força *versus* Flecha foi similar ao observado para as vigas não condicionadas. A viga pré-fissurada (V3_PF-3M) não apresentou o primeiro ponto de descarregamento, pois a fissura associada a essa perda na capacidade de carga estava previamente desenvolvida. Entretanto, a

evolução do gráfico foi similar, indicando que a pré-fissura não teve grande influência na aderência barra-concreto.

Esmaeili et al. (2020) observaram resultados semelhantes em seu estudo. Após o condicionamento em ambiente natural durante 10 anos, não adicionando o incremento de temperatura, os autores verificaram que vigas submetidas à ensaios de flexão à quatro pontos apresentaram redução na capacidade de carga e na flecha máxima. Eles atribuíram esses resultados a degradação das barras de GFRP utilizadas como armadura. Além disso, também, verificaram o desenvolvimento similar das curvas Momento *versus* Flecha antes e após o condicionamento.

As vigas submetidas ao condicionamento acelerado apresentaram momento último de 6,11 kNm e 6,29 kNm, para as vigas sem pré-fissura V1_NPF-3M e V2_NPF-3M, respectivamente, e 5,46 kNm para a viga pré-fissurada V3_PF-3M. Os momentos máximos apresentaram retenção média de 63,22% e 55,61% em comparação com as amostras não condicionadas, para as vigas não pré-fissuradas e pré-fissurada, respectivamente. Esses resultados mostram que o concreto possui um papel de proteção contra o ambiente externo, se comparado a exposição direta das barras, apresentando retenção de resistência similar a imersão direta em temperaturas entre 40°C e 60°C.

A maior redução no momento último é observada na viga pré-fissurada, que promove mais canais para que o fluido externo penetre o ambiente interno do concreto. Wu et al. (2022) avaliaram a resposta a tração de barras de GFRP inseridas em concreto e submetidas a um condicionamento em solução alcalina durante oito anos, sem efeito de temperatura, observando que fatores como a existência de pré-fissuras aumentam a taxa de degradação das barras.

A Tabela 45 mostra os resultados de momento último, força máxima e flecha obtidas para as vigas após condicionamento acelerado de 90 dias à 60°C.

Tabela 45: Resultados do ensaio de flexão após o condicionamento

Parâmetro / Viga	Força	Momento	Flecha
	(kN)	(kN.m)	(mm)
V1_NPF-3M	24,44	6,11	8,55
V2_NPF-3M	25,18	6,29	7,68
Média das amostras NPF	24,81	6,20	8,12

Parâmetro / Viga	Força	Momento	Flecha
	(kN)	(kN.m)	(mm)
V3_PF-3M	21,82	5,46	8,56
NPF – Não Pré-Fissurada			
PF – Pré-Fissurada			

4.4.2.2 Efeito hidrotérmico na flecha e fissuração das vigas

A Figura 83 mostra as curvas de Força *versus* Flecha definidas experimentalmente e analiticamente. A viga V3_PF-3M foi pré-fissurada, por esse motivo a curva experimental não é bem caracterizada inicialmente.

O condicionamento acelerado não tem efeito significativo na previsão da flecha por meio de equações analíticas, pois, como descrito anteriormente, o módulo de elasticidade das barras não é afetado pelo condicionamento, desta forma, não alterando a rigidez da resposta da viga após o limite de tração do concreto. A Figura 83 destaca que a equação proposta pela CSA melhor representou a curva experimental.

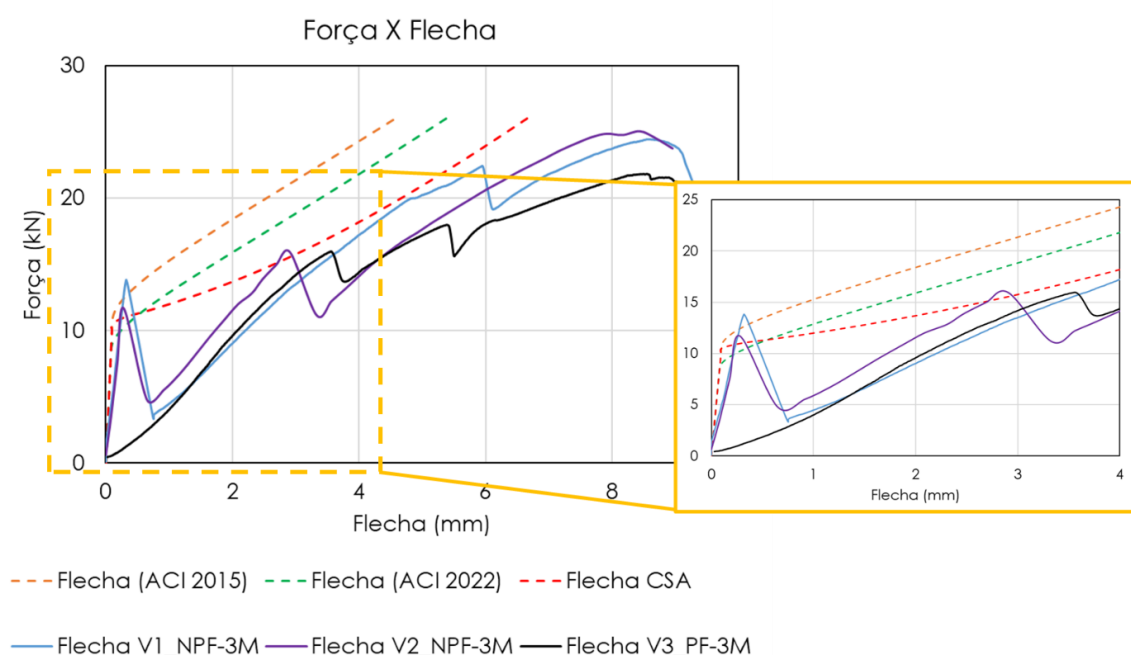


Figura 83: Curvas Força *versus* Flecha – vigas condicionadas

O padrão de fissuração das vigas condicionadas foi diferente do observado para as vigas não condicionadas. A fissura central foi a que primeiro se desenvolveu nas vigas de referência. Contudo, esse padrão não foi observado para todas as vigas condicionadas, como pode ser observado na Figura 84 para a viga V2_NPF-3M.

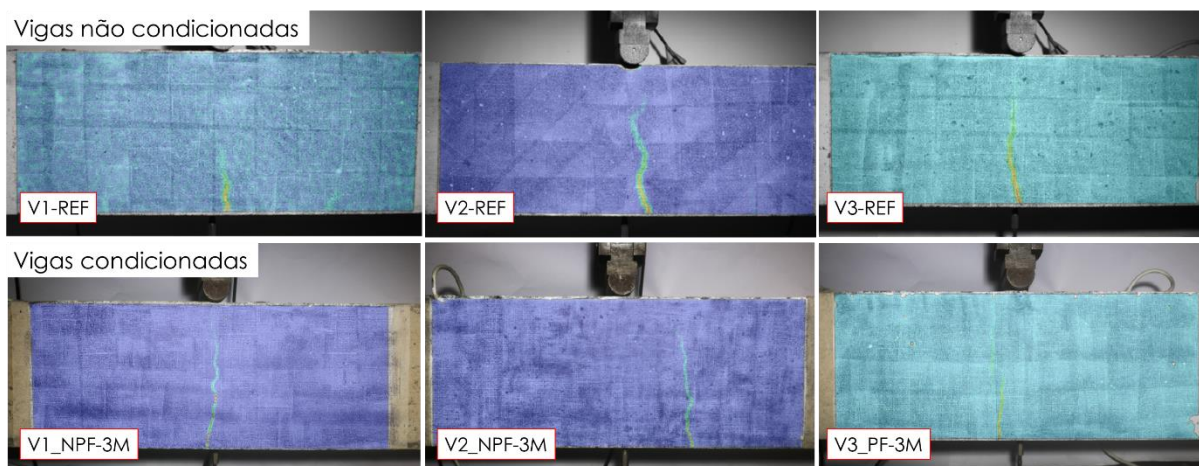


Figura 84: Comparação do início da fissuração das vigas

As Figuras 85 e 86 mostram o padrão de fissuração no momento da ruptura das vigas condicionadas e das vigas não condicionadas quando a força de flexão aplicada é aproximadamente igual a força máxima média das vigas condicionadas, 25 kN para as vigas não pré-fissuradas e 22 kN para a viga pré-fissurada.

A Figura 85 mostra que a fissuração das vigas não condicionadas foi mais expressiva em comparação com as vigas condicionadas.

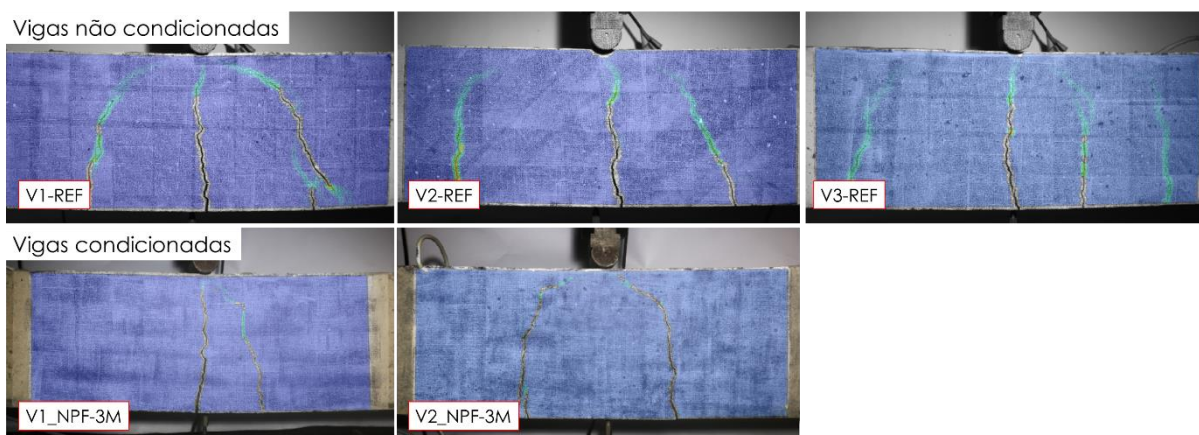


Figura 85: Comparação da fissuração das vigas na ruptura – vigas não pré-fissuras

As vigas V1-REF, V2-REF e V3-REF apresentaram fissuras mais largas, maior abertura (para nível de força de 25 kN) em torno de 2,86 mm, 3,24 mm e 2,83 mm, respectivamente, em relação as vigas V1_NPF-3M e V2_NPF-3M, que apresentaram aberturas de fissuras em torno de 0,36 mm e 1,27 mm, respectivamente. Os menores valores obtidos para as vigas condicionadas indicam que, para um mesmo nível de força aplicada, resultou-se em uma menor fissuração, o que pode estar relacionado com um ganho de aderência barra-concreto, possivelmente devido ao inchamento do polímero.

A Figura 86 mostra um comportamento diferente, onde a viga condicionada pré-fissurada apresenta um padrão de fissuração mais desenvolvido em relação, por exemplo, as vigas V2-REF e V3-REF, e semelhante a viga V1-REF.

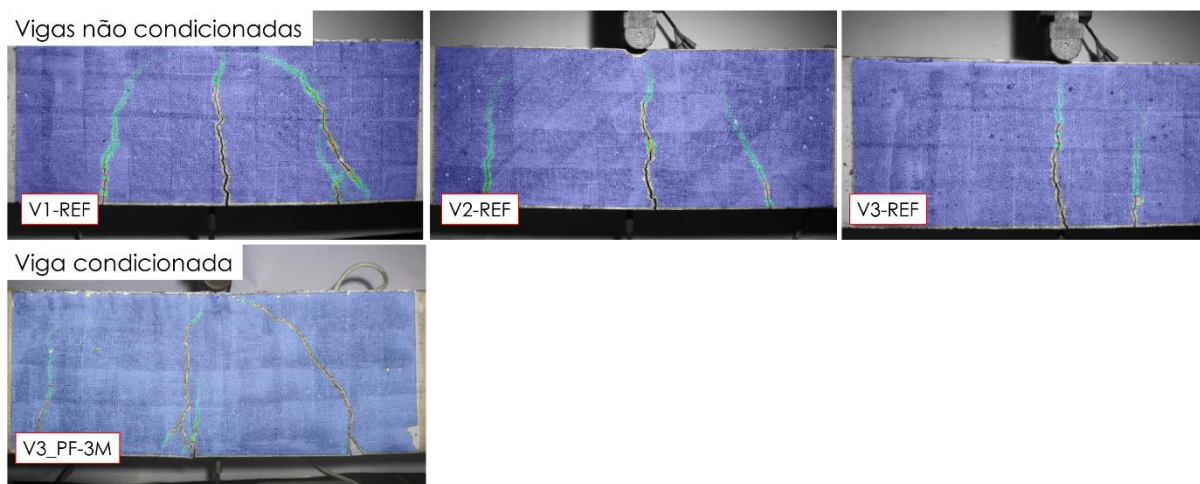


Figura 86: Comparação da fissuração das vigas na ruptura – vigas pré-fissuras

As vigas V1-REF, V2-REF e V3-REF apresentaram fissuras mais largas, com maior abertura (para nível de força de 22 kN) em torno de 2,58 mm, 2,86 mm e 2,66 mm, respectivamente, enquanto a viga V3_PF-3M apresentou abertura de 1,73 mm.

Esmaeili et al. (2020) não verificaram mudança no padrão de fissuração de vigas condicionadas em ambiente natural durante 10 anos. Os autores citam que isso ocorreu devido à pouca influência do condicionamento na aderência barra-concreto. Dois fatores diferem a metodologia de Esmaeili et al. (2020) e da adotada nesse estudo:

- Esmaeili et al. (2020) não adicionaram a temperatura, o que implica em processos químicos, como a difusão, menos acelerados. Efeitos como o inchamento devido a absorção podem ser menos expressivos;
- Esmaeili et al. (2020) utilizaram barras de GFRP com matriz de vinil éster que, segundo a bibliografia, apresenta menor permeabilidade comparada a barras com matriz de poliéster.

Desta forma, o aumento na aderência barra-concreto observado nesse estudo, possivelmente, é um efeito momentâneo e reversível, ou seja, em um cenário não saturado e em condições normais de temperatura, ele não ocorreria ou aconteceria em menor escala.

4.4.2.3 Efeito hidrotérmico no comportamento das barras de reforço

A Figura 87 mostra a relação entre a força aplicada no ensaio de flexão da viga e a deformação da barra de reforço para uma das vigas condicionadas. Não foi possível medir as deformações das armaduras da viga V2_NPF-3M e da viga V3_PF-3M. Comparando as deformações nas armaduras da viga V1_NPF-3M e das vigas não condicionadas, observa-se evolução similar em níveis próximos de força de flexão.

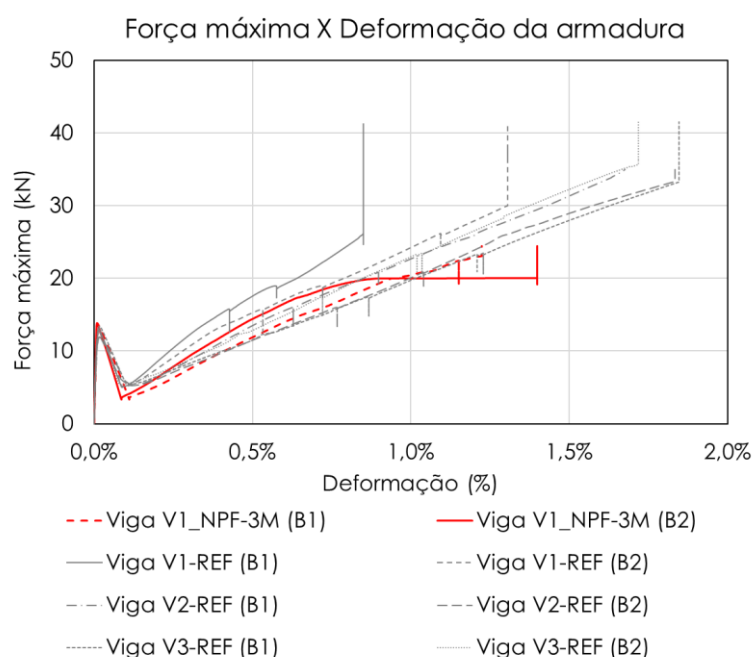


Figura 87: Curva Força versus Deformação da armadura – comparação

As curvas de Deformação *versus* Força foram plotadas para estimar a deformação das barras no momento da ruptura da viga V1_NPF-3M, considerando somente a parcela do gráfico após o início de fissuração da viga. A Figura 88 mostra as curvas para cada uma das barras de reforço.

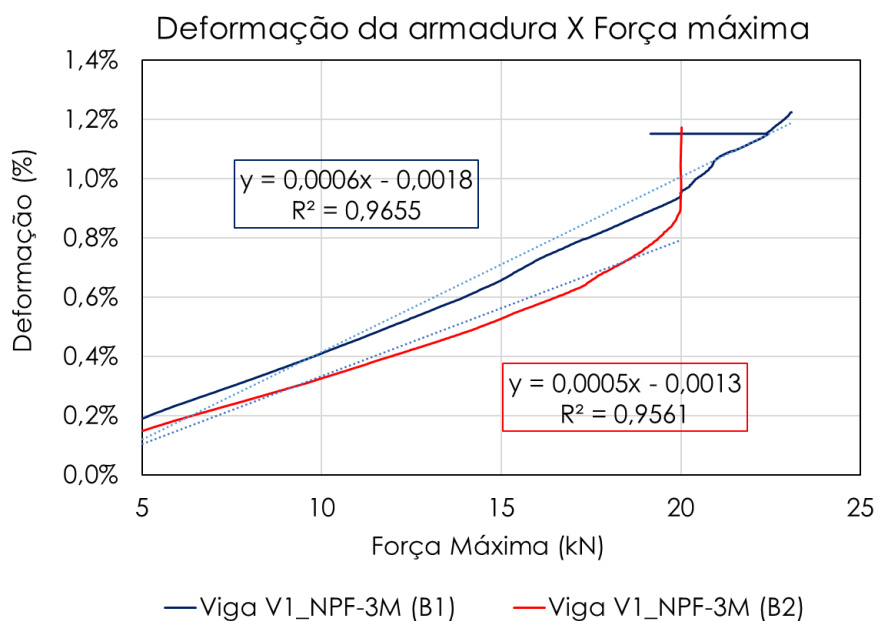


Figura 88: Deformação da armadura versus Força – V1_NPF-3M

A partir da linearização das curvas, foi possível estimar a deformação nas armaduras no momento da ruptura da viga e definir a tensão tração na barra. A deformação última das barras B1 e B2 de reforço da viga V1_NPF-3M, utilizando as equações de reta apresentadas na Figura 88, foram iguais a [1,29%,1,09%], respectivamente.

O mesmo módulo de elasticidade da barra de 48,65 GPa, utilizado para definição da tensão de tração nas armaduras das vigas de referência, foi empregado. A resistência à tração das barras de reforço foi calculada de modo analítico por meio da Equação 18, mostrada na Seção 3.1.2.4.1. A Tabela 46 mostra a resistência à tração da barra de reforço mais solicitada, calculada para cada uma das vigas de modo analítico e, para a viga V1_NPF-3M, por meio da deformação coletada pelos extensômetros.

Tabela 46: Estimativa de resistência à tração da armadura – vigas condicionadas

Viga	Momento máximo	Resistência à tração (ACI 440.1R - 2015)	Resistência à tração (deformação da armadura)	Variação
	(kNm)	(MPa)	(MPa)	(%)
V1_NPF – 3M	6,11	654,90	625,82	4,14
V2_NPF – 3M	6,29	674,62	-	-
V3_PF – 3M	5,46	584,73	-	-

Foi obtida uma boa aproximação entre o cálculo analítico e a resistência à tração definida por meio dos dados de deformação, para a viga V1_NPF-3M. Desta forma, considerando a resistência à tração média calculada analiticamente para as vigas de referência e a resistência a tração média das vigas condicionadas não pré-fissuradas, observa-se uma retenção 63,22%. Em relação a viga pré-fissurada, calcula-se uma retenção de 55,61%.

Quando comparado com a redução de resistência à tração observada a partir dos ensaios de degradação acelerada por imersão direta das barras de GFRP em solução alcalina, pode-se verificar que a imersão direta possui um efeito mais severo do que a imersão indireta (barra circundada por concreto), visto que a exposição direta permite uma total área de contato entre solução e a barra. Diferentes autores destacaram essa observação, como Wu et al. (2022), que cita que a presença do concreto circundante prolonga a vida útil da barra.

Observa-se que uma relação entre as imersões direta e indireta pode ser alcançada pela redução da temperatura da solução alcalina. Uma relação entre a imersão direta (em solução alcalina à 60°C) e a imersão indireta (em água destilada à 60°C durante 3 meses) utilizando a extrapolação realizada com a Lei de Arrhenius, apresentada na Seção 4.2.2, aconteceria quando a temperatura da solução alcalina fosse de, aproximadamente, 50°C para as vigas com e sem pré-fissura.

A Figura 89 mostra as curvas mestras de retenção de resistência à tração das barras para as temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C e os pontos de retenção de resistência à tração obtidos analiticamente a partir dos dados dos ensaios de flexão das vigas.

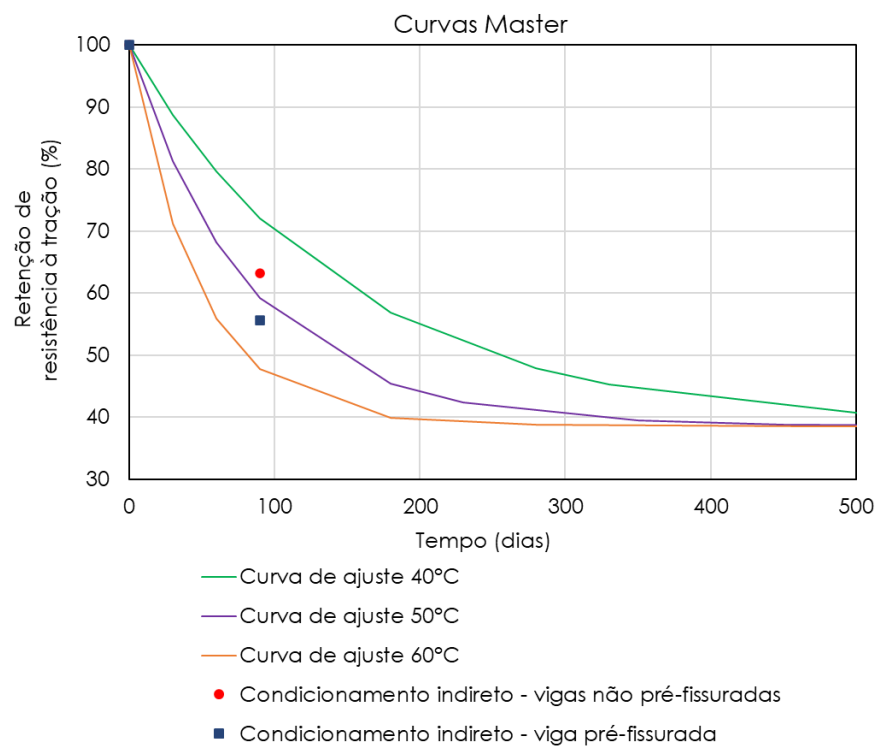


Figura 89: Curvas mestras e dados de imersão indireta

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi realizada uma pesquisa experimental para analisar o efeito hidrotérmico em vigas de concreto reforçadas com barras de GFRP, com matriz de poliéster, a partir de ensaios de condicionamento acelerado de barras e vigas.

Os resultados mostraram que as barras de GFRP com matriz de poliéster apresentaram alto teor de absorção de água e perda de massa durante o ensaio de absorção de água, resultando no aumento do índice de vazios. A taxa de absorção, quando o material estava saturado, foi de 1,93% e o total de água absorvida após 39 dias de ensaio foi de 2,64%.

A resistência ao cisalhamento longitudinal retida foi de 80,67% após três meses de condicionamento em solução alcalina à 60°C, levemente superior a recomendada pela AFGC (2023). A resistência à tração da barra foi mais afetada, apresentando retenção de 56,31%, no condicionamento realizado na PUC-Rio, após o mesmo período e condição ambiental. A retenção de resistência à tração obtida não atende ao valor mínimo definido por recomendações e normatizações como a CSA S807-19, de 85% e 70% para barras com classe de durabilidade D1 e D2, respectivamente, e ASTM D7957/D7957M-22 e AFGC (2023), ambas de 80%. O módulo de elasticidade da barra não apresentou diferenças significativas após o condicionamento acelerado.

A alta redução na resistência à tração da barra está, possivelmente, relacionada com o descolamento na interface fibra-matriz, tendo em vista que, as barras com matriz de poliéster utilizadas nesse estudo apresentam alta taxa de absorção. Esse alto teor de solução que pode penetrar na matriz polimérica pode resultar em diferentes reações físicas e químicas, como a formação de fissuras na matriz.

O desenvolvimento do modelo preditivo de degradação para estimar a retenção de resistência à tração, resultou em curvas mestras com retenção mínima (quando a curva apresenta um patamar quase estável) de 38%. Esses resultados mostram que as barras de GFRP com matriz de poliéster não garantiriam a segurança de estruturas de concreto armado a longo prazo, considerando os coeficientes de redução ambiental atualmente empregados, como o da ACI 440.1R (2015) de 70%. O

tempo estimado para atingir uma retenção de 38% é de, aproximadamente, 10 anos e 5 anos para exposição a temperaturas de 20°C e 30°C, respectivamente.

As barras condicionadas por três meses apresentaram retenção de resistências à tração de 87,91%, 76,53% e 46,92% para imersão à 30°C, 40°C e 60°C, respectivamente. O condicionamento acelerado das barras em solução alcalina mostrou que as barras são altamente afetadas pelo ambiente condicionante.

A exposição direta das barras em condicionamento acelerado é mais agressiva do que a sua aplicação em estruturas de concreto, que também são ambientes alcalinos, pois o concreto age como uma camada protetora ao ambiente externo. Isso foi verificado neste estudo: as retenções de resistência à tração após a imersão da viga em água por três meses à 60°C foram de 63,22% e 55,61% para barras em vigas sem e com pré-fissura, respectivamente.

A resposta a flexão das vigas após o condicionamento acelerado em água à 60°C foi influenciada, principalmente, pela degradação da barra, visto que, as propriedades mecânicas do concreto não foram, estatisticamente, alteradas pelo condicionamento acelerado. As respostas Força *versus* Flecha das vigas, antes e depois do condicionamento, mostraram rigidez à flexão semelhantes. A redução na capacidade de carga e na flecha máxima foram causadas pela ruptura precoce da viga, devido à redução na resistência à tração das barras. A previsão de flecha máxima a partir de equações analíticas não é influenciada pelo condicionamento acelerado. A abordagem feita pela *Canadian Standards Association (CSA)* de 2012 se mostrou mais precisa em calcular as flechas.

O padrão de fissuração das vigas mudou após o condicionamento acelerado. As vigas com e sem pré-fissura apresentaram fissuras menos espessas em comparação com as vigas não condicionadas. A pré-fissuração da viga potencializou o efeito do ambiente condicionante, resultando em uma menor capacidade de carga devido a maior facilidade de penetração de água na viga, e fissuras mais largas em comparação com as vigas condicionadas não pré-fissuradas.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para futuros trabalhos que busquem estudar o efeito da degradação de barras de GFRP nos parâmetros mecânicos do material e de

elementos de concreto reforçados com eles, por meio de procedimentos de condicionamento acelerado:

- Desenvolver o modelo preditivo baseado na Lei de Arrhenius para barras com diferentes tipos de matrizes, como poliéster, epóxi e vinil éster, comparando a respostas desses diferentes materiais. Associado ao modelo preditivo avaliar o comportamento mecânico de elementos de concreto armado com essas barras de GFRP.
- Devido ao comportamento exponencial da retenção de resistência à tração no tempo, recomenda-se realizar tempos de condicionamento mais espaçados em temperaturas mais baixas (como 30°C e 40°C) e tempos menos espaçados em temperaturas mais altas (como 60°C), para uma boa caracterização das curvas Retenção *versus* Tempo, devido as diferentes velocidades de degradação.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELKARIM, O. I.; AHMED, E. A.; MOHAMED, H. M.; BENMOKRANE, B. Flexural strength and serviceability evaluation of concrete beams reinforced with deformed GFRP bars. **Engineering Structures**, vol. 186, p. 282–296, 1 maio 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.02.024>.

AFGC. **Recommendations for the use of FRP (Fibre Reinforced Polymer) rebars for reinforced concrete structures**. 2023.

ALI, A. H.; BENMOKRANE, B.; MOHAMED, H. M.; MANALO, A.; EL-SAFETY, A. Statistical analysis and theoretical predictions of the tensile-strength retention of glass fiber-reinforced polymer bars based on resin type. **Journal of Composite Materials**, vol. 52, nº 21, p. 2929–2948, 9 set. 2018. <https://doi.org/10.1177/0021998318755866>.

ALIA, C.; JOFRE-RECHE, J. A.; SUÁREZ, J. C.; ARENAS, J. M.; MARTÍN-MARTÍNEZ, J. M. Characterization of the chemical structure of vinyl ester resin in a climate chamber under different conditions of degradation. **Polymer Degradation and Stability**, vol. 153, p. 88–99, 1 jul. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2018.04.014>.

ALSAYED, S.; AL-SALLOUM, Y.; ALMUSALLAM, T.; EL-GAMAL, S.; AQEL, M. Performance of glass fiber reinforced polymer bars under elevated temperatures. **Composites Part B: Engineering**, vol. 43, nº 5, p. 2265–2271, jul. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.034>.

ALSAYED, S. H. Flexural behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars. **Cement and Concrete Composites**, vol. 20, nº 1, p. 1–11, jan. 1998. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(97\)00061-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(97)00061-9).

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.1R - Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars**. 2015a. Farmington Hills, 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.9R - Guide to accelerated conditioning protocols for durability assessment of internal and external fiber-reinforce polymers (FRP) reinforcement**. 2015b. Farmington Hills, 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.11-22: Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars.** 2022. 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D570 - Standard Test Method for Water Absorption of Plastics.** 2022a. West Conshohocken, 2022. <https://doi.org/10.1520/D0570-22>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3171 - Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials.** 2022b. West Conshohocken, 2022. <https://doi.org/10.1520/D3171-22>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4475 - Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods by the Short-Beam Method.** 2021a. West Conshohocken, 2021. <https://doi.org/10.1520/D4475-21>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7205/D7205M - Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars.** 2021b. West Conshohocken, 2021. https://doi.org/10.1520/D7205_D7205M-21.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7705/D7705M - Standard Test Method for Alkali Resistance of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Matrix Composite Bars used in Concrete Construction.** 2019. West Conshohocken, 2019. https://doi.org/10.1520/D7705_D7705M-12R19.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7957/D7957M - Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement.** 2022c. West Conshohocken, 2022. https://doi.org/10.1520/D7957_D7957M-22.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** 2018. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Requisitos.** 2022a. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522-1: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão**. 2021. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. 2010. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. 2020. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. 2022b. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. 2023. Rio de Janeiro, 2023.

BARBOSA JÚNIOR, A. R.; SILVA, G. Q. da; NEVES, B. V. B.; DEVENS, J. A. Métodos diretos de determinação do coeficiente de dispersão longitudinal em cursos d'água naturais: Parte 1 - Fundamentos teóricos. **Rem: Revista Escola de Minas**, vol. 58, nº 1, p. 27–32, mar. 2005. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672005000100005>. Acessado em: 7 abr. 2023.

BAŞARAN, B.; KALKAN, İ.; BEYCIOĞLU, A.; KASPRZYK, I. A Review on the Physical Parameters Affecting the Bond Behavior of FRP Bars Embedded in Concrete. **Polymers**, vol. 14, nº 9, 1 maio 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14091796>.

BASTIDAS-ARTEAGA, E.; CHATEAUNEUF, A.; SÁNCHEZ-SILVA, M.; BRESSOLETTE, Ph.; SCHOEFS, F. A comprehensive probabilistic model of chloride ingress in unsaturated concrete. **Engineering Structures**, vol. 33, nº 3, p. 720–730, mar. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.11.008>.

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**, vol. 114, p. 163–174, 1 abr. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.002>.

BENMOKRANE, B.; ELGABBAS, F.; AHMED, E. A.; COUSIN, P.; M.ASCE. Characterization and Comparative Durability Study of Glass/Vinylester, Basalt/Vinylester, and Basalt/Epoxy FRP Bars. **Journal of Composites for Construction**, vol. 19, nº 6, dez. 2015. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000564](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000564).

BENMOKRANE, B.; WANG, P.; MINH TON-THAT, T.; RAHMAN, H.; ROBERT, J.-F. Durability of Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars in Concrete Environment. **Journal of Composites for Construction**, vol. 6, nº 3, 2002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:3\(143\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:3(143)).

BISCHOFF, P. H. Reevaluation of Deflection Prediction for Concrete Beams Reinforced with Steel and Fiber Reinforced Polymer Bars. **Journal of Structural Engineering**, vol. 131, nº 5, p. 752–767, maio 2005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:5\(752\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:5(752)).

BLAZNOV, A. N.; KRASNOVA, A. S.; KRASNOV, A. A.; ZHURKOVSKY, M. Geometric and mechanical characterization of ribbed FRP rebars. **Polymer Testing**, vol. 63, p. 434–439, 1 out. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.09.006>.

CARRA, G.; CARVELLI, V. Long-term bending performance and service life prediction of pultruded Glass Fibre Reinforced Polymer composites. **Composite Structures**, vol. 127, p. 308–315, set. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.049>.

CHEN, Y.; DAVALOS, J. F.; RAY, I. Durability Prediction for GFRP Reinforcing Bars Using Short-Term Data of Accelerated Aging Tests. **Journal of Composites for Construction**, vol. 10, nº 4, p. 279–286, 2006. <https://doi.org/10.1061/ASCE1090-0268200610:4279>.

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. **Composite Structures**, vol. 78, nº 1, p. 101–111, mar. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.08.015>.

COLAÇO, C. D.; YABUKI, L. N. M.; ALCÂNTARA, A. L.; MENEGÁRIO, A. A. Coeficientes de difusão de metais em materiais não convencionais (agarose e acetato de celulose) usados na técnica de difusão em filmes finos por gradientes de

concentração. **Química Nova**, vol. 35, nº 7, p. 1360–1364, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000700014>.

COLOMBO, C.; VERGANI, L.; BURMAN, M. Static and fatigue characterization of new basalt fibre reinforced composites. **Composite Structures**, vol. 94, nº 3, p. 1165–1174, fev. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.10.007>.

DAVALOS, J. F.; CHEN, Y.; RAY, I. Long-term durability prediction models for GFRP bars in concrete environment. **Journal of Composite Materials**, vol. 46, nº 16, p. 1899–1914, 10 ago. 2012. <https://doi.org/10.1177/0021998311427777>.

DEJKE, V. Durability of FRP reinforcement in concrete: literature review and experiments. **Engineering Materials Science**, 2001. .

DONG, Z.; WU, G.; ZHAO, X.-L.; ZHU, H.; LIAN, J.-L. The durability of seawater sea-sand concrete beams reinforced with metal bars or non-metal bars in the ocean environment. **Advances in Structural Engineering**, vol. 23, nº 2, p. 334–347, 24 jan. 2020. <https://doi.org/10.1177/1369433219870580>.

EL-FIKY, A. M.; AWAD, Y. A.; ELHEGAZY, H. M.; HASAN, M. G.; ABDEL-LATIF, I.; EBID, A. M.; KHALAF, M. A. FRP Poles: A State-of-the-Art-Review of Manufacturing, Testing, and Modeling. **Buildings**, vol. 12, nº 8, p. 1085, 25 jul. 2022. <https://doi.org/10.3390/buildings12081085>.

ESMAEILI, Y.; ESLAMI, A.; NEWHOOK, J.; BENMOKRANE, B. Performance of GFRP-Reinforced Concrete Beams Subjected to High-Sustained Load and Natural Aging for 10 Years. **Journal of Composites for Construction**, vol. 24, nº 5, out. 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001065](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001065).

FUGIYAMA, M. M. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM BARRAS POLIMÉRICAS REFORÇADAS COM FIBRA DE BASALTO E FIBRAS DESCONTÍNUAS**. 2022. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS, Campinas, 2022. Disponível em: <http://repositorio.sis.puc-campinas.edu.br/handle/123456789/16487>. Acessado em: 10 dez. 2023.

GAO, C.; ZHOU, C. Moisture absorption and cyclic absorption–desorption characters of fibre-reinforced epoxy composites. **Journal of Materials Science**, vol. 54, n° 11, p. 8289–8301, 28 jun. 2019. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03399-7>.

GOLDSTON, M. W.; REMENNIKOV, A.; SHEIKH, M. N. Flexural behaviour of GFRP reinforced high strength and ultra high strength concrete beams. **Construction and Building Materials**, vol. 131, p. 606–617, jan. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.094>.

HE, X. J.; DAI, L.; YANG, W. R. Durability and degradation mechanism of GFRP bars embedded in concrete beams with cracks. **Plastics, Rubber and Composites**, vol. 46, n° 1, p. 17–24, 2 jan. 2017. <https://doi.org/10.1080/14658011.2016.1245807>.

IBRACON. **CT 303 - Comitê IBRACON/ABECE: Uso de Materiais não convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras - Estruturas de Concreto Armado com Barras de Polímero Reforçado com Fibras (FRP)**. 2021. Brasil, 2021.

JABBAR, S. A.; FARID, S. B. H. Replacement of steel rebars by GFRP rebars in the concrete structures. **Karbala International Journal of Modern Science**, vol. 4, n° 2, p. 216–227, 1 jun. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.kijoms.2018.02.002>.

JIN, Q.; CHEN, P.; GAO, Y.; DU, A.; LIU, D.; SUN, L. Tensile Strength and Degradation of GFRP Bars under Combined Effects of Mechanical Load and Alkaline Solution. **Materials**, vol. 13, n° 16, p. 3533, 11 ago. 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13163533>.

LIBERATI, E. A. P.; LEONEL, E. D.; NOGUEIRA, C. G. Influence of the reinforcement corrosion on the bending moment capacity of reinforced concrete beams: a structural reliability approach. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, vol. 7, n° 3, p. 379–413, jun. 2014. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952014000300005>.

LU, C.; NI, M.; CHU, T.; HE, L. Comparative Investigation on Tensile Performance of FRP Bars after Exposure to Water, Seawater, and Alkaline Solutions. **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 32, n° 7, jul. 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003243](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003243).

MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos - Fundamentos e Tecnologia**. São Paulo: Artliber Editora, 2011. vol. 1, .

MELO, A. J. L. de. **Avaliação da estrutura de tecidos técnicos como elemento reforçante em compósitos poliméricos sistema poliéster isoftálico**. 2013. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

MICELLI, F.; NANNI, A. Durability of FRP rods for concrete structures. **Construction and Building Materials**, vol. 18, nº 7, p. 491–503, set. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.012>.

MOURA, R. C. de A.; RIBEIRO, D. V.; LIMA, P. R. L. Mechanical Damage Assessment of GFRP Rebars with Different Resins due to Hydrothermal Aging. **Materials Research**, vol. 24, nº 5, 2021. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2021-0172>.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 1º ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2006. vol. 1, .

NKURUNZIZA, G.; DEBAIKY, A.; COUSIN, P.; BENMOKRANE, B. Durability of GFRP bars: a critical review of the literature. **Progress in Structural Engineering and Materials**, vol. 7, nº 4, p. 194–209, 10 out. 2005. <https://doi.org/10.1002/pse.205>.

OU, Y.; ZHU, D.; ZHANG, H.; HUANG, L.; YAO, Y.; LI, G.; MOBASHER, B. Mechanical Characterization of the Tensile Properties of Glass Fiber and Its Reinforced Polymer (GFRP) Composite under Varying Strain Rates and Temperatures. **Polymers**, vol. 8, nº 5, p. 196, 19 maio 2016. <https://doi.org/10.3390/polym8050196>.

PAÇZKOWSKI, P.; PUSZKA, A.; GAWDZIK, B. Investigation of Degradation of Composites Based on Unsaturated Polyester Resin and Vinyl Ester Resin. **Materials**, vol. 15, nº 4, p. 1286, 9 fev. 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15041286>.

PHANI, K. K.; BOSE, N. R. Temperature dependence of hydrothermal ageing of CSM-laminate during water immersion. **Composites Science and Technology**, vol. 29, nº 2, p. 79–87, jan. 1987. [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(87\)90050-9](https://doi.org/10.1016/0266-3538(87)90050-9).

RAMESH, M.; PALANIKUMAR, K.; REDDY, K. H. Mechanical property evaluation of sisal–jute–glass fiber reinforced polyester composites. **Composites Part**

B: Engineering, vol. 48, p. 1–9, maio 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.12.004>.

RIFAI, M. AI; EL-HASSAN, H.; EL-MAADDAWY, T.; ABED, F. Durability of basalt FRP reinforcing bars in alkaline solution and moist concrete environments. **Construction and Building Materials**, vol. 243, p. 118258, 20 maio 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118258>.

ROBERT, M.; BENMOKRANE, B. Physical, Mechanical, and Durability Characterization of Preloaded GFRP Reinforcing Bars. **Journal of Composites for Construction**, vol. 14, nº 4, p. 368–375, 2010.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.000010](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.000010).

ROLLAND, A.; BENZARTI, K.; QUIERTANT, M.; CHATAIGNER, S. Accelerated Aging Behavior in Alkaline Environments of GFRP Reinforcing Bars and Their Bond with Concrete. **Materials**, vol. 14, nº 19, p. 5700, 30 set. 2021.
<https://doi.org/10.3390/ma14195700>.

RUIZ EMPARANZA, A.; KAMPMANN, R.; DE CASO, F.; MORALES, C.; NANNI, A. Durability assessment of GFRP rebars in marine environments. **Construction and Building Materials**, vol. 329, p. 127028, abr. 2022a.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127028>.

RUIZ EMPARANZA, A.; KAMPMANN, R.; DE CASO, F.; MORALES, C.; NANNI, A. Durability assessment of GFRP rebars in marine environments. **Construction and Building Materials**, vol. 329, p. 127028, 25 abr. 2022b.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127028>.

SANTOS, J. D. dos. **Estudo do comportamento à flexão de vigas de concreto com fibras sintéticas armadas com barras de polímero reforçado com fibras de vidro**. 2022. 84–86 f. PUC-Campinas, Campinas, 2022. Disponível em: <http://repositorio.sis.puc-campinas.edu.br/xmlui/handle/123456789/16486>. Acessado em: 12 maio 2023.

SENNAH, K.; TROPYNINA, E.; IBRAHIM, Z.; HEDJAZI, S. Structural Qualification of a Developed GFRP-Reinforced Concrete Bridge Barrier using Ultimate Load Testing. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, vol. 12, nº 1, p. 63, 3 dez. 2018. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0284-1>.

SILVA, M. A. G.; DA FONSECA, B. S.; BISCAIA, H. On estimates of durability of FRP based on accelerated tests. **Composite Structures**, vol. 116, nº 1, p. 377–387, set. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.05.022>.

THOMASON, J. L. Glass fibre sizing: A review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, vol. 127, p. 105619, 1 dez. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105619>.

TU, J.; XIE, H.; GAO, K.; LI, Z.; ZHANG, J. Durability Prediction of GFRP Rebar Based on Elastic Modulus Degradation. **Frontiers in Materials**, vol. 6, 21 out. 2019. <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00258>.

UOMOTO, T.; MUTSUYOSHI, H.; KATSUKI, F.; MISRA, S. Use of Fiber Reinforced Polymer Composites as Reinforcing Material for Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 14, nº 3, p. 191–209, jun. 2002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)14:3\(191\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:3(191)).

WERLE, A. P.; KAZMIERCZAK, C. de S.; KULAKOWSKI, M. P. Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. **Ambiente Construído**, vol. 11, nº 2, p. 213–228, jun. 2011. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212011000200015>.

WU, G.; DONG, Z.-Q.; WANG, X.; ZHU, Y.; WU, Z.-S. Prediction of Long-Term Performance and Durability of BFRP Bars under the Combined Effect of Sustained Load and Corrosive Solutions. **Journal of Composites for Construction**, vol. 19, nº 3, jun. 2015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000517](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000517).

WU, W.; HE, X.; WU, C.; HE, J.; YANG, W. Fracture performance of GFRP-RC beams with working cracks in alkaline environment for eight years. **Construction and Building Materials**, vol. 299, p. 123757, 13 set. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123757>.

WU, W.; HE, X.; YANG, W.; DAI, L.; WANG, Y.; HE, J. Long-time durability of GFRP bars in the alkaline concrete environment for eight years. **Construction and Building Materials**, vol. 314, p. 125573, 3 jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125573>.

XIN, H.; LIU, Y.; MOSALLAM, A.; CORREIA, J. A. F. O.; ZHANG, Y.; HE, J. Numerical Simulation of Non-Fick Moisture Diffusion of Pultruded Composite GFRP

Bridge Deck Plates. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, vol. 35, n° 6, dez. 2021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001655](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001655).

YANG, W.; HE, X.; DAI, L.; ZHAO, X.; SHEN, F. Fracture Performance of GFRP Bars Embedded in Concrete Beams with Cracks in an Alkaline Environment. **Journal of Composites for Construction**, vol. 20, n° 6, dez. 2016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000688](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000688).

YOU, Y.-J.; KIM, J.-H.; PARK, K.-T.; SEO, D.-W.; LEE, T.-H. Modification of Rule of Mixtures for Tensile Strength Estimation of Circular GFRP Rebars. **Polymers**, vol. 9, n° 12, p. 682, 7 dez. 2017. <https://doi.org/10.3390/polym9120682>.

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**, vol. 299, p. 123995, set. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123995>.

ZHANG, K.; YANG, W.; LI, H.; TANG, Z.; WU, W.; YUAN, J.; FENG, Z. Semi-Reliability Probability Damage Assessment of GFRP Bars Embedded in Steam-Curing Concrete Beams Based on the Multiple Factors Related Moisture Absorption Model. **Polymers**, vol. 13, n° 24, p. 4409, 16 dez. 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13244409>.

ZHU, P.; LI, Z.; ZHU, Y.; WU, Y.; QU, W. Prediction of the Long-Term Tensile Strength of GFRP Bars in Concrete. **Buildings**, vol. 13, n° 4, p. 1035, 14 abr. 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings13041035>.