

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de São Carlos

Estudo da durabilidade frente às ações ambientais do sistema de reforço externo com FRP aplicado ao concreto

Mariana Corrêa Posterli

Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MARIANA CORRÊA POSTERLLI

**ESTUDO DA DURABILIDADE FRENTE ÀS AÇÕES AMBIENTAIS DO
SISTEMA DE REFORÇO EXTERNO COM FRP APLICADO AO
CONCRETO**

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos necessários para o título de Doutor em Engenharia Civil (Estruturas).

Área de concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Ricardo Carrazedo

SÃO CARLOS

2023

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

P857e Posterlli, Mariana Corrêa
Estudo da durabilidade frente às ações ambientais do sistema de reforço externo com FRP aplicado ao concreto. / Mariana Corrêa Posterlli; orientador Ricardo Carrazedo. São Carlos, 2023.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2023.

1. reforço. 2. FRP. 3. epóxi. 4. degradação. 5. intemperismo. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **MARIANA CORRÊA POSTERLLI**.

Título da tese: "Estudo da durabilidade frente às ações ambientais do sistema de reforço externo com FRP aplicado ao concreto".

Data da defesa: 18/05/2023.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Associado **Ricardo Carrazedo (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

APROVADA

Prof. Associado **Edson Denner Leonel**
(Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

APROVADA

Profa. Dra. **Gláucia Maria Dalfré**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADA

Prof. Dr. **Armando Lopes Moreno Junior**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADA

Prof. Dr. **Paulo Roberto Lopes Lima**
(Universidade Estadual de Feira de Santana/UEFS)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
(Engenharia de Estruturas):

Prof. Associado **Ricardo Carrazedo**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo devo toda a minha gratidão a Deus, por me guiar e me dar forças durante essa longa jornada.

Aos familiares, em especial, meus pais, Arley e Luzia, e meu irmão José Augusto, por todo amor e incentivo em mais essa etapa da minha vida.

Ao meu namorado Eder, pelo amor e paciência, principalmente durante o desenvolvimento deste trabalho.

De forma especial também agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Ricardo Carrazedo, e à Prof. Dra. Gláucia Dalfré, pelos conhecimentos transmitidos e pela confiança no meu trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia de Estruturas da EESC-USP: Romeu, Fabiano, Mauri, Amaury, Luiz Vareda e Jorge (*in memoriam*) e aos técnicos da UFSCar: José Roberto e Ricardo, por contribuírem diretamente para que este trabalho fosse realizado.

Agradeço também ao Douglas, técnico do Núcleo de Ensaios de Materiais e Análise de Falhas do Departamento de Engenharia de Materiais da EESC-USP.

Aos amigos de São Carlos, em especial às meninas da D6: Aline, Maria e Patrícia e aos amigos da UFSCar: Amanda, Luiz Sarti e Matusalém, por dividirem comigo inúmeras incertezas e alegrias, fazendo com que essa caminhada fosse mais leve e alegre.

Aos amigos de Barra do Garças, especialmente o pessoal da “salinha” da UFMT: Patrícia, Paulo e Sílvio, pelo incentivo e pelos momentos de descontração.

Por fim, agradeço também a todos os professores e funcionários da Escola de Engenharia de São Carlos, especialmente os do Departamento de Engenharia de Estruturas.

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

RESUMO

POSTERLLI, M. C. **Estudo da durabilidade frente às ações ambientais do sistema de reforço externo com FRP aplicado ao concreto.** 2023. p.270. Tese (Doutorado em Engenharia Civil (Estruturas)) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

Atualmente, vários trabalhos comprovam a eficácia de se reforçar estruturas de concreto por meio da colagem externa (técnica conhecida na literatura internacional por EBR - *Externally Bonded Reinforcement*) de mantas ou laminados de compósitos de polímeros reforçados com fibras (FRP - *Fiber Reinforced Polymer*, em língua inglesa) na superfície do elemento. Apesar da leveza, da facilidade de aplicação e de conferir ganho de capacidade resistente ao elemento, o FRP geralmente encontra-se desprotegido e diretamente susceptível às ações ambientais. Nesse sentido, sabe-se que água, umidade, temperaturas elevadas, radiação ultravioleta, entre outros fatores são potencialmente nocivos ao sistema de reforço. Com base nisso a presente pesquisa investigou a durabilidade frente às ações ambientais do sistema de reforço externo com FRP quando aplicado a elementos de concreto, foram realizados ensaios mecânicos para caracterização do material (resina epóxi, compósitos de CFRP) e do sistema EBR-FRP (corpos de prova de concreto confinados com CFRP, ensaio de cisalhamento FRP-concreto e flexão a três pontos em prismas reforçados à flexão com CFRP), sendo avaliados dois fabricantes de resina epóxi para reforço com FRP e duas condições de exposição (acondicionamento acelerado e intemperismo). Ao final da etapa experimental do trabalho foi possível concluir que os diferentes ambientes de exposição provocaram modificações no comportamento mecânico das resinas epoxídicas, embora nenhuma alteração significativa na tensão de tração ou módulo de elasticidade tenha sido apontada para os compósitos de CFRP. Da análise do sistema EBR-FRP, destaca-se a redução na tensão de cisalhamento e na energia de fratura para os modelos ensaiados ao cisalhamento e à flexão, o que refletiu na redução da deformação máxima atuando na manta de CFRP. Com base nos resultados experimentais foi possível afirmar que a taxa de degradação da aderência FRP-concreto está diretamente relacionada com o tipo de resina epóxi empregada. Da comparação entre as deformações obtidas experimentalmente e recomendadas pelas normas foi apontada a necessidade de alteração da formulação proposta para o cálculo das deformações efetivas no FRP, levando em consideração o efeito da degradação da aderência. Por fim, a partir dos resultados experimentais pré e pós condicionamento, modelos numéricos foram calibrados com a finalidade de fornecer ferramenta capaz de simular a degradação do sistema EBR-FRP.

Palavras-chave: reforço; FRP; epóxi; degradação; intemperismo

ABSTRACT

POSTERLLI, M. C. **Study of the durability against environmental actions of the external strengthening system with FRP applied to concrete.** 2023. p.270. Thesis (PhD. in Civil Engineering (Structures)) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2023.

Currently, several works prove the effectiveness of strengthening concrete structures through external bonding (a technique known in the international literature as EBR - Externally Bonded Reinforcement) of fabrics or laminates of fiber-reinforced polymer composites (FRP) on the surface of the element. Despite its lightness, ease of application and the ability to improve element resistance, FRP is generally unprotected and directly susceptible to environmental actions. In this sense, it is known that water, humidity, high temperatures, ultraviolet radiation, among other factors are potentially harmful to the strengthening system. Based on this, the present research investigated the durability against environmental actions of the external strengthening system with FRP when applied to concrete elements, mechanical tests were carried out to characterize the materials (epoxy resin, CFRP laminates) and the EBR-FRP system (specimens of concrete confined with CFRP, shear test FRP-concrete and three-point bending on prisms strengthened with CFRP), two manufacturers of epoxy resin for strengthening with FRP and two exposure conditions (accelerated conditioning and weathering) were evaluated. At the end of the experimental stage of the work, it was possible to conclude that the different exposure environments caused changes in the mechanical behavior of the epoxy resins, although no significant change in tensile stress or elasticity modulus has been identified for the CFRP laminates. From the analysis of the EBR-FRP system, the reduction in shear stress and fracture energy for the models tested in shear and bending stands out, which reflected in the reduction of the maximum CFRP laminate strain. Based on the experimental results, it was possible to state that the degradation rate of FRP-concrete bond is directly related to the type of epoxy resin used. From the comparison between the strain experimentally measured and recommended by the standards, it was pointed out the need to change the proposed formulation for the effective FRP strain, taking into account the effect of bond degradation. Finally, based on the pre- and post-conditioning experimental results, numerical models were calibrated in order to provide a tool capable of simulating the degradation of the EBR-FRP system.

Keywords: strengthening; FRP; epoxy; degradation; weathering

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo	17
1.2	Justificativa	17
1.3	Metodologia.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Mecanismos de degradação dos compósitos de FRP.....	21
2.1.1	Umidade e soluções salinas	22
2.1.2	Ambiente alcalino.....	29
2.1.3	Temperatura elevada	31
2.1.4	Radiação ultravioleta	34
2.2	Recomendações normativas relacionadas à durabilidade do FRP	37
2.2.1	ACI 440.2R (2017).....	37
2.2.1.1	<i>Reforço à flexão.....</i>	<i>38</i>
2.2.1.2	<i>Reforço ao cisalhamento</i>	<i>40</i>
2.2.1.3	<i>Confinamento</i>	<i>42</i>
2.2.2	FIB Bulletin nº 90 (2019)	44
2.2.2.1	<i>Reforço à flexão.....</i>	<i>44</i>
2.2.2.2	<i>Reforço ao cisalhamento</i>	<i>50</i>
2.2.2.3	<i>Confinamento</i>	<i>53</i>
2.2.3	ACI 440.9R (2015).....	54
2.3	Estado da arte da durabilidade dos sistemas de reforço EBR-FRP	57
2.3.1	Degradação de elementos de concreto confinados com FRP	58
2.3.2	Degradação da aderência FRP-concreto.....	62
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	79
3.1	Propriedades mecânicas dos materiais.....	80
3.1.1	Resina epóxi	80
3.1.1.1	<i>Ensaio de tração.....</i>	<i>81</i>
3.1.1.2	<i>Absorção de umidade</i>	<i>82</i>
3.1.2	Compósitos de CFRP	83

3.1.2.1	<i>Ensaio de tração</i>	84
3.1.3	Concreto	85
3.1.3.1	<i>Ensaio de compressão uniaxial</i>	86
3.1.3.2	<i>Ensaio de tração por compressão diametral</i>	87
3.2	Propriedades mecânicas do sistema EBR-FRP	88
3.2.1	Confinamento com FRP	88
3.2.1.1	<i>Ensaio de compressão uniaxial</i>	90
3.2.2	Aderência FRP-concreto	92
3.2.2.1	<i>Cisalhamento FRP-concreto</i>	92
3.2.2.2	<i>Flexão a três pontos</i>	97
3.2.2.3	<i>Arrancamento</i>	100
3.3	Ambientes de exposição	101
3.3.1	Protocolo de acondicionamento acelerado	102
3.3.2	Intemperismo	103
3.4	Resumo e cronograma do programa experimental	106
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	109
4.1	Propriedades mecânicas dos materiais	109
4.1.1	Resina epóxi	109
4.1.1.1	<i>Protocolo de acondicionamento acelerado - ACP</i>	112
4.1.1.2	<i>Intemperismo - WEA</i>	116
4.1.2	Compósitos de CFRP	119
4.1.2.1	<i>Protocolo de acondicionamento acelerado - ACP</i>	120
4.1.2.2	<i>Intemperismo - WEA</i>	121
4.1.3	Concreto	122
4.2	Propriedades mecânicas do sistema EBR-FRP	127
4.2.1	Confinamento com FRP	128
4.2.1.1	<i>Protocolo de acondicionamento acelerado - ACP</i>	130
4.2.1.2	<i>Intemperismo - WEA</i>	132
4.2.2	Cisalhamento FRP-concreto	134
4.2.2.1	<i>Protocolo de acondicionamento acelerado - ACP</i>	140
4.2.2.2	<i>Intemperismo - WEA</i>	146
4.2.3	Flexão a três pontos	150
4.2.3.1	<i>Protocolo de acondicionamento acelerado - ACP</i>	155
4.2.3.2	<i>Intemperismo - WEA</i>	160

4.2.4	Arrancamento	164
4.3	Comparação com as recomendações normativas	169
4.3.1	Confinamento	169
4.3.2	Reforço ao cisalhamento	171
4.3.3	Reforço à flexão	173
4.4	Conclusão dos resultados experimentais	178
5	MODELAGEM NUMÉRICA DA INTERFACE FRP-CONCRETO	183
5.1	Modelo constitutivo dos materiais	184
5.1.1	Concreto	184
5.1.2	Compósito de CFRP	188
5.2	Modelo constitutivo da interface FRP-concreto	189
5.3	Geometria, vinculação e condições de contorno	196
5.3.1	Cisalhamento FRP-concreto	196
5.3.2	Flexão a três pontos	197
5.4	Resultados modelo numérico	198
5.4.1	Cisalhamento FRP-concreto	198
5.4.2	Flexão a três pontos	201
5.5	Conclusão da modelagem numérica	205
6	CONCLUSÕES	207
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	209
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	211
	APÊNDICES	219
	APÊNDICE A – RESULTADOS EXPERIMENTAIS ENSAIO DE TRAÇÃO DAS RESINAS EPÓXI	219
	APÊNDICE B – RESULTADOS EXPERIMENTAIS ENSAIO DE ABSORÇÃO DE UMIDADE DAS RESINAS EPÓXI	229
	APÊNDICE C – RESULTADOS EXPERIMENTAIS ENSAIO DE TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS DE CFRP	237
	APÊNDICE D – RESULTADOS EXPERIMENTAIS ENSAIO DE COMPRESSÃO CONCRETO	243

APÊNDICE E – RESULTADOS EXPERIMENTAIS ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DO CONCRETO	249
APÊNDICE F – RESULTADOS EXPERIMENTAIS CORPOS DE PROVA CONFINADOS COM CFRP	251
APÊNDICE G – RESULTADOS EXPERIMENTAIS CISLHAMENTO FRP- CONCRETO.....	253
APÊNDICE H – RESULTADOS EXPERIMENTAIS FLEXÃO A TRÊS PONTOS	257
APÊNDICE I – RESULTADOS EXPERIMENTAIS ARRANCAMENTO....	261
APÊNDICE J – MEMORIAL COM OS CÁLCULOS DAS DEFORMAÇÕES RECOMENDADAS PELAS NORMAS	263

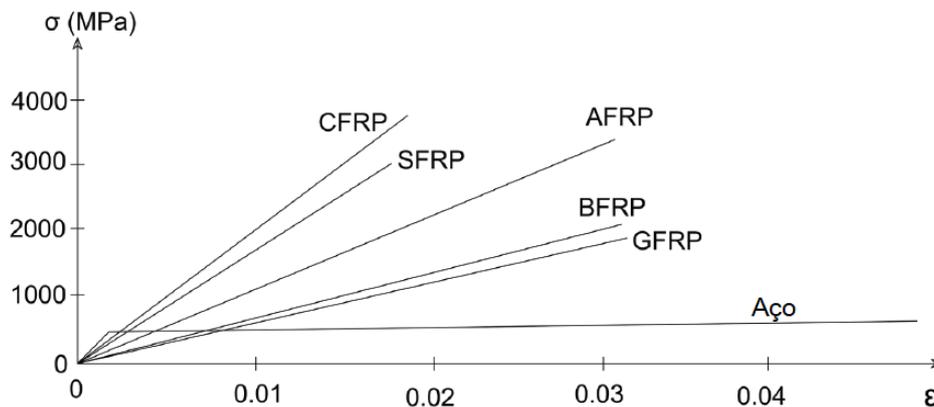
1 INTRODUÇÃO

A utilização de compósitos de polímeros reforçados com fibras (FRP - *Fiber Reinforced Polymer*, em língua inglesa) como materiais na construção civil tem aumentado nos últimos anos em função de uma série de vantagens que incluem suas elevadas propriedades mecânicas, leveza, resistência à corrosão e durabilidade (KARBHARI, 2007).

O compósito de FRP é um material constituído por fibras contínuas orientadas em direções específicas embebidas em uma matriz de resina polimérica termofixa. As fibras, geralmente de carbono, vidro, aramida e basalto resistem aos esforços mecânicos, enquanto a resina polimérica, geralmente epoxídica, éster-vinílica ou poliéster, une, protege e transfere as tensões entre as fibras (FIB *Bulletin* 90, 2019).

A Figura 1.1 apresenta curvas tensão *versus* deformação para diferentes compósitos de FRP quando submetidos à tração, evidenciando a superioridade de suas propriedades mecânicas quando em comparação com o aço (FIB *Bulletin* 90, 2019).

Figura 1.1: Curvas tensão *versus* deformação para diferentes compósitos de FRP em comparação com o aço



Fonte: FIB *Bulletin* 90 (2019)

Embora as principais características e vantagens do emprego do FRP, dentre elas a sua excelente durabilidade, sejam consenso em aplicações projetadas para a indústria automotiva e aeroespacial, os compósitos de FRP, quando empregados na construção civil, apresentam diferenças significativas, especialmente com relação à técnica utilizada na fabricação do compósito, processo de instalação, ambiente de exposição e carregamento atuante (KARBHARI, 2007; FRIGIONE, 2018).

Na indústria da construção civil o emprego do FRP está associado ao reparo e reforço de estruturas por meio da colagem externa do compósito (técnica conhecida na literatura internacional por EBR - *Externally Bonded Reinforcement*) na forma de laminados pré-fabricados ou mantas laminadas *in-situ* na superfície do elemento estrutural. No processo de laminação *in-situ* as mantas ou tecidos de fibras são impregnados em campo pela resina polimérica e colados na superfície do concreto por meio de um adesivo polimérico idêntico ou similar ao empregado na laminação das fibras; os laminados pré-fabricados, apesar de apresentarem maior controle e uniformidade tanto na laminação das fibras como na cura da resina polimérica em fábrica, ainda assim necessitam do emprego em campo de uma resina polimérica para promover a adesão do laminado à superfície de concreto (FRIGIONE, 2018).

Apesar da técnica ter se destacado por sua rapidez, facilidade de aplicação e da necessidade de poucos equipamentos e atividades de intervenção durante a sua instalação, o compósito de FRP, quando aplicado em campo, não apresenta controle suficiente dos processos de laminação e endurecimento (ou cura) da matriz ou adesivo polimérico. Além disso, uma vez que o sistema de reforço é colado na superfície do elemento estrutural, este permanece desprotegido e susceptível às ações ambientais (SILVA, 2017; FRIGIONE, 2018).

Como consequência do emprego de resinas poliméricas curadas sem nenhum tipo de controle em temperatura ambiente, diversas condições ambientais que normalmente atingem as estruturas, tais como, água, umidade, radiação ultravioleta, variações de temperatura e soluções ácidas ou alcalinas podem afetar drasticamente tanto as propriedades mecânicas como a integridade do FRP e sua aderência com a superfície de concreto (FRIGIONE, 2018).

Assim, uma vez que o comportamento e integridade de um elemento de concreto reforçado com FRP é dependente tanto das propriedades mecânicas individuais dos materiais que o constituem (resina, fibras e concreto) como do comportamento e integridade da sua aderência com o concreto, qualquer modificação física e química nos materiais que constituem o reforço resultará em redução da vida útil da estrutura reforçada (KARBHARI; ABANILLA, 2007).

Um grande número de pesquisas já foi realizada e comprovou a eficácia de se reforçar ou reparar estruturas de concreto por meio da colagem externa de compósitos de FRP, entretanto, questões que envolvem o comportamento desse material ao longo do tempo e a durabilidade do sistema de reforço, principalmente quando exposto a condições ambientais agressivas, ainda permanecem sem resposta (KARBHARI; ABANILLA, 2007).

Dessa forma, tem crescido nos últimos anos o número de pesquisas com o objetivo de

avaliar experimentalmente a aderência FRP-concreto (CHOI *et al.*, 2012; TATAR; HAMILTON, 2016a; CERONI *et al.*, 2018; CHOTICKAI; SOMANA, 2018; GUO *et al.*, 2020; MUKHTAR; PEIRIS, 2021), o comportamento de corpos de prova confinados com FRP (MICELLI; MYERS, 2008; XIE *et al.*, 2017) e até mesmo de elementos estruturais de concreto armado reforçados (LI *et al.*, 2002; GRACE; SINGH, 2005; SEONG, 2003; BELARBI *et al.*, 2004; OLIVEIRA, 2019; SARTI JÚNIOR, 2020) quando submetidos a diferentes condições de exposição ambiental.

Nesse sentido a presente pesquisa visa contribuir com as análises experimentais e numéricas da durabilidade de sistemas de reforço EBR-FRP aplicados a elementos de concreto.

1.1 Objetivo

A presente pesquisa tem por objetivo investigar a durabilidade frente às ações ambientais do sistema de reforço externo com FRP quando aplicado a elementos de concreto.

Para alcançar esse objetivo podem ser pontuados alguns objetivos específicos:

- Avaliar a influência das condições de exposição (acondicionamento acelerado e intemperismo) no comportamento mecânico do sistema de reforço EBR-FRP;
- Analisar a influência da resina epóxi na durabilidade do sistema de reforço;
- Desenvolver modelos numéricos que permitam representar a degradação do sistema de reforço.

1.2 Justificativa

Seja para aumentar ou restaurar a capacidade de carga original das estruturas de concreto armado, o emprego da técnica EBR para reforço utilizando compósitos e laminados de FRP aderidos ao substrato dos elementos estruturais tem aumentado em função de inúmeras vantagens inerentes tanto à técnica quanto ao material empregado.

Embora as propriedades e vantagens do reforço utilizando FRP sejam bem conhecidas e validadas por meio de inúmeros trabalhos científicos, uma vez que o sistema de reforço é colado na superfície do elemento estrutural, este permanece desprotegido e susceptível às ações ambientais.

Nesse sentido, o desafio atual para os engenheiros civis está relacionado a questões que envolvem o comportamento desse material ao longo do tempo e a durabilidade do sistema de

reforço, principalmente quando exposto a condições ambientais agressivas.

Grande parte das pesquisas existentes e da literatura acerca da durabilidade dos materiais compósitos de FRP se concentra nas indústrias automotiva e aeroespacial. Entretanto, as aplicações desses materiais na construção civil apresentam algumas particularidades, seja quanto ao método de laminação, materiais envolvidos ou a longa vida útil requerida, que impedem a comparação direta com resultados de durabilidade obtidos para outras aplicações (ISIS, 2006; CABRAL-FONSECA *et al.*, 2018).

Além disso, a falta de normas e diretrizes que regulamentem os procedimentos, tipos de ensaio e condições de exposição, somada à grande variabilidade de materiais e fabricantes geram resultados de degradação divergentes e pouco confiáveis (KARBHARI, 2007). Nesse sentido, em 2015 o *American Concrete Institute* lançou o ACI 440.9R (2015), a primeira recomendação determinando os procedimentos de ensaio para avaliação da durabilidade dos sistemas de reforço com FRP aplicado a estruturas de concreto.

Nacionalmente o problema se agrava, uma vez que ainda não existe norma ou recomendação que indique os procedimentos adequados para instalação, dimensionamento e manutenção do sistema de reforço com materiais compósitos. Destaca-se ainda uma quantidade limitada de pesquisas que buscaram avaliar a durabilidade frente às ações ambientais dos sistemas de reforço com FRP disponíveis no mercado nacional (OLIVEIRA, 2019; FERREIRA, 2019; LENZI, 2020; SARTI JÚNIOR, 2020).

Diante do exposto, a análise experimental e numérica do comportamento mecânico de elementos de concreto reforçados com FRP e expostos a diferentes condições ambientais contribuirá para o desenvolvimento de recomendações normativas mais consistentes.

1.3 Metodologia

O trabalho aqui apresentado envolveu o cumprimento das seguintes etapas que são detalhadas na sequência: (a) revisão bibliográfica; (b) programa experimental e (b) modelagem numérica.

- a) Revisão bibliográfica: compreensão dos fatores e mecanismos que causam degradação nos compósitos de FRP; foram estudadas também as principais recomendações normativas relacionadas à durabilidade do FRP e apontados os estudos mais recentes envolvendo o tema.
 - b) Programa experimental: realização de uma extensa campanha experimental,
-

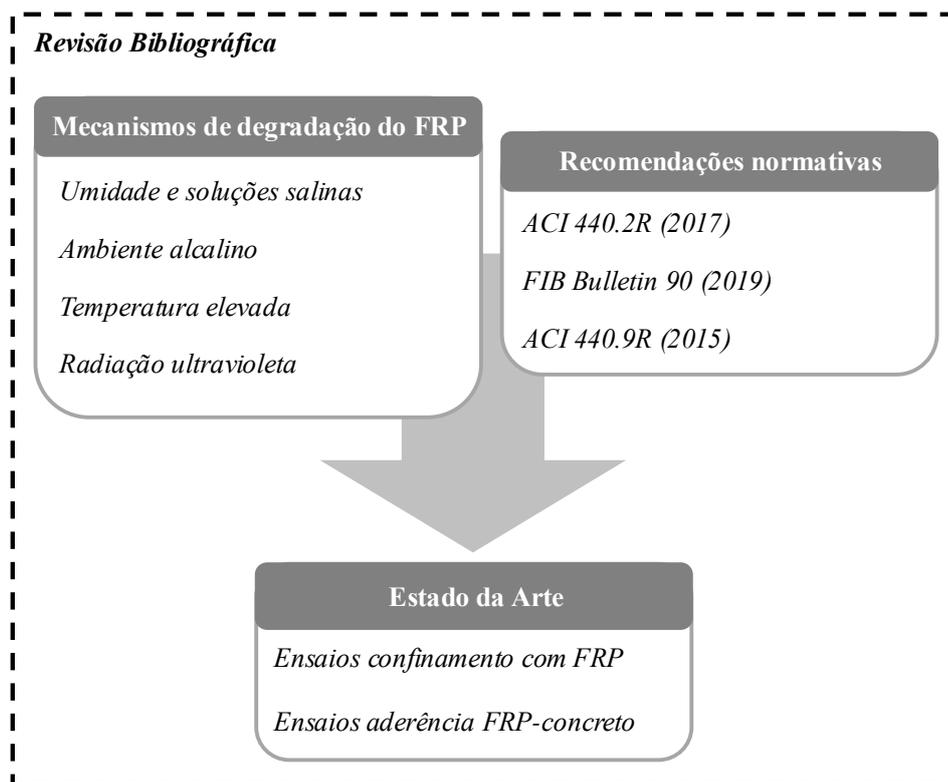
envolvendo ensaios para caracterização dos materiais e do sistema de reforço. Para tanto as propriedades mecânicas de dois sistemas de reforço foram avaliadas após exposição a dois ambientes diferentes - acondicionamento acelerado e intemperismo.

- c) Modelagem numérica: a fim de complementar as análises experimentais, a etapa de modelagem numérica tomou como base os parâmetros extraídos experimentalmente para simular as tensões de cisalhamento atuando na interface FRP-concreto.
-

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para melhor entender a durabilidade dos sistemas EBR-FRP, o presente capítulo inicia detalhando os principais mecanismos e fatores que provocam a degradação do sistema, na sequência são pontuadas as recomendações normativas e fatores empregados para ponderar o efeito de degradação do sistema EBR-FRP e, finalmente, apresenta-se o estado da arte, detalhando as pesquisas mais recentes acerca da degradação do sistema EBR-FRP. A Figura 2.1 indica um esquema da revisão bibliográfica apresentada.

Figura 2.1: Esquema dos principais tópicos abordados na revisão bibliográfica



Fonte: A Autora

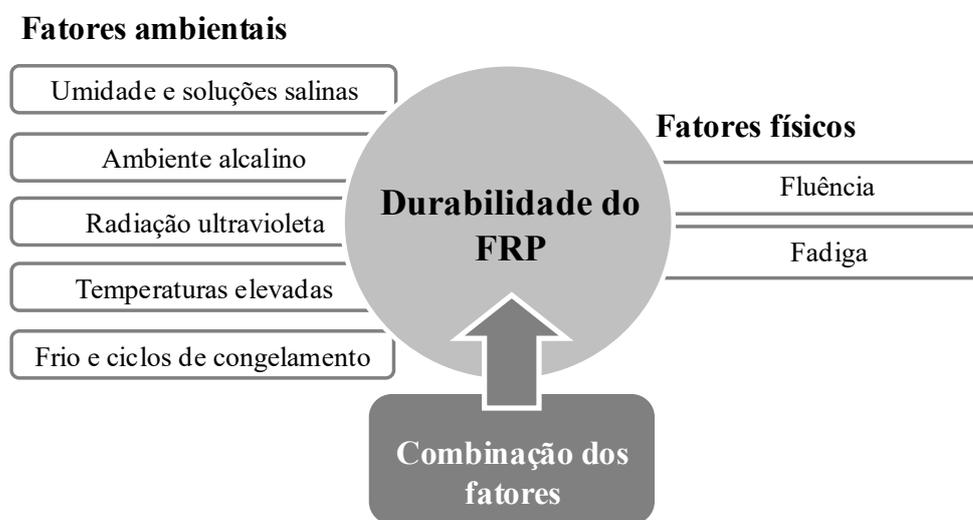
2.1 Mecanismos de degradação dos compósitos de FRP

Karbhari (2007) define a durabilidade do compósito de FRP como a habilidade de resistir à fissuração, oxidação, degradação química, delaminação, desgaste e/ou dano provocado por algum agente externo por um período específico de tempo, sob determinado

carregamento e condição ambiental.

Em geral as estruturas reforçadas com FRP estão sujeitas a uma variedade de carregamentos e condições de exposição (físicas e químicas) que podem atuar individualmente ou em conjunto na degradação do compósito de FRP. Os fatores considerados mais críticos para a durabilidade dos sistemas de reforço são: água e umidade, soluções salinas e alcalinas, fogo e calor, frio e ciclos de congelamento, exposição à radiação ultravioleta, fluência, relaxação e fadiga; além do efeito combinado desses fatores (Figura 2.2) (ISIS, 2006).

Figura 2.2: Fatores que afetam a durabilidade dos compósitos de FRP



Fonte: Adaptado de ISIS (2006)

A seguir serão detalhados os mecanismos de degradação associados a alguns dos fatores ambientais potencialmente nocivos à durabilidade do compósito e do sistema de reforço com FRP.

2.1.1 Umidade e soluções salinas

Como mencionado anteriormente, por serem resistentes à corrosão eletroquímica, os materiais compósitos de FRP geralmente são empregados em forma de armadura ou reforço externo em estruturas de concreto que se encontram em ambientes úmidos e marinhos, nos quais a corrosão do sistema tradicional contendo armaduras metálicas resultaria em degradação severa da estrutura (ISIS, 2006).

Entretanto, apesar de resistentes à corrosão eletroquímica, estes materiais não estão completamente imunes de danos causados pela umidade, uma vez que a água é absorvida por

todos os tipos de polímeros orgânicos, modificando suas características termofísicas, mecânicas e químicas (ISIS, 2006; HELBLING; KARBHARI, 2007).

Para Weitsman e Elahi (2000) o processo de absorção de umidade por compósitos poliméricos e seus efeitos nas propriedades mecânicas do material são questões bastante complexas, embora se saiba que existe uma relação entre a taxa de degradação do FRP e a taxa de absorção de umidade pela matriz polimérica. Essa taxa de absorção ainda pode ser modificada por outras condições de exposição atuando simultaneamente, assim, uma elevação nos níveis de tensão aplicados e na temperatura aumenta a taxa de absorção de umidade do FRP (ISIS, 2006).

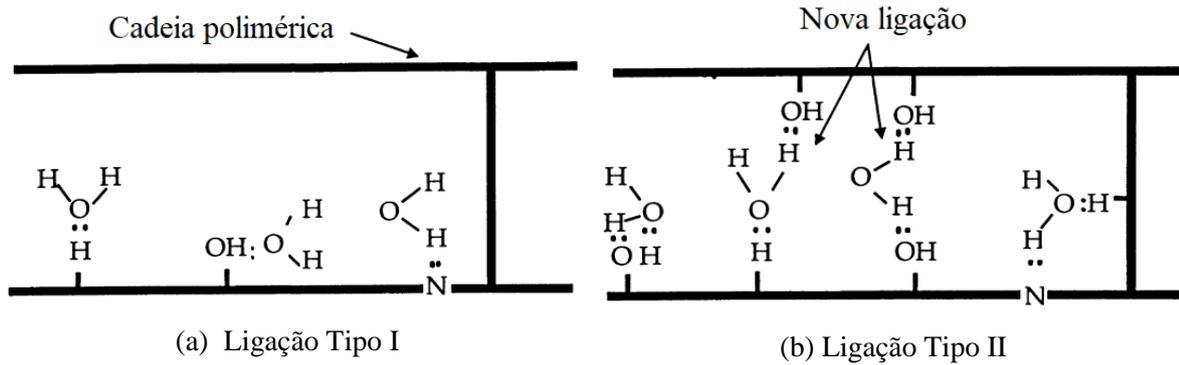
A absorção de umidade pela resina resulta primeiramente em amolecimento da matriz, ou seja, ocorre um aumento da mobilidade molecular da matriz polimérica uma vez que as moléculas de água ocupam os espaços entre as cadeias poliméricas, reduzindo as forças coesivas intermoleculares. Este é um processo reversível que resulta em redução da temperatura de transição vítrea (T_g), a temperatura acima da qual as propriedades mecânicas do polímero mudam de um sólido rígido e frágil para as de um plástico fluido e viscoso. No caso de exposição à umidade por um longo período de tempo, ocorre simultaneamente a hidrólise, um ataque às ligações químicas da resina, modificando irreversivelmente sua estrutura química e reduzindo a sua T_g (GHORBEL; VALENTIM, 1994).

Dessa forma, o enfraquecimento das ligações intermoleculares dos polímeros resulta em redução da sua resistência, módulo de elasticidade, deformação máxima e dureza (ISIS, 2006).

Apesar disso, Frigione (2018) explica que a modificação das propriedades das resinas epoxídicas em condições higrotérmicas (combinação de temperatura e umidade elevada) é resultado de vários mecanismos complexos e inter-relacionados, que são ainda mais complicados no caso das resinas epoxídicas que ainda não foram totalmente curadas - caso das resinas empregadas para reforço de estruturas com FRP. Assim, dependendo do grau de cura da resina, a combinação de temperatura e umidade pode até causar aumento nas propriedades mecânicas da resina.

Zhou e Lucas (1999) observaram dois tipos de ligação entre as moléculas de água e as cadeias poliméricas presentes em uma matriz de resina epóxi. O Tipo I de ligação é responsável pela plastificação, quebrando as forças de Van der Waals entre as cadeias poliméricas, enquanto o Tipo II de ligação permite a formação de ligações de hidrogênio entre as cadeias poliméricas conforme ilustra a Figura 2.3.

Figura 2.3: Tipos de ligação da água com os compostos poliméricos



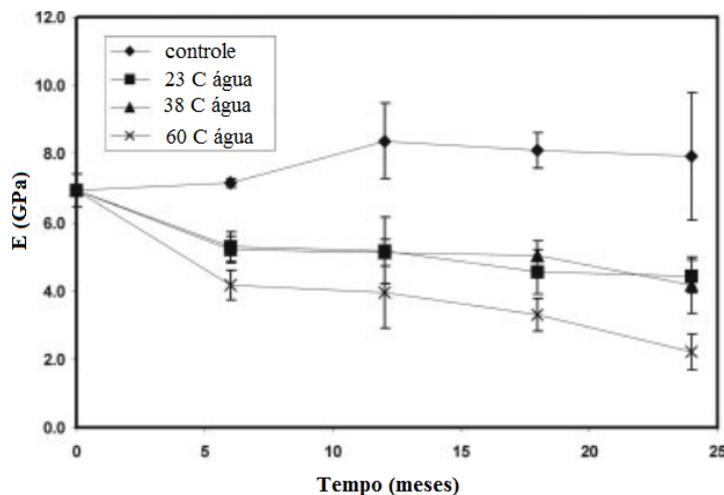
Fonte: Zhou e Lucas (1999)

O Tipo I está associado aos processos de absorção de água que ocorrem em condições higrotérmicas com baixa temperatura; o Tipo II de ligação da água em tais condições é consideravelmente menor. Por outro lado, a presença deste último tipo de ligação está associada ao condicionamento higrotérmico em temperaturas mais altas e tempos de exposição mais longos (ZHOU, LUCAS, 1999).

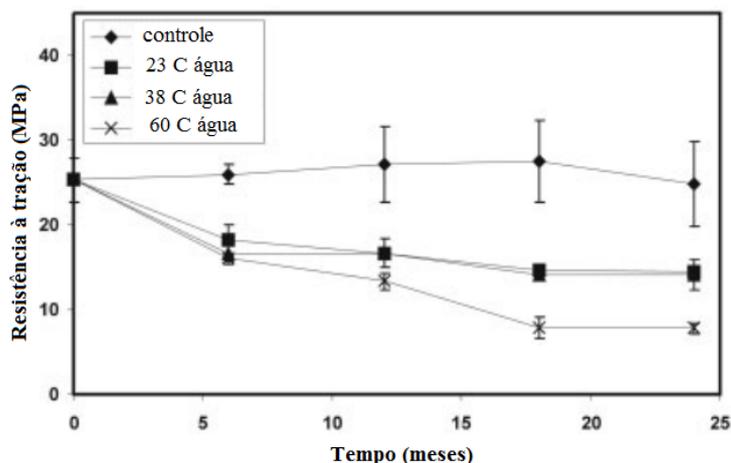
Pesquisa realizada por Yang, Xian e Karbhari (2008) avaliou o efeito da imersão de resinas epoxídicas em água por 24 meses (em temperatura constante de 23°C, 38°C e 60°C). Os resultados da pesquisa indicaram uma pequena redução da T_g para as amostras mantidas à 23°C e uma redução mais expressiva para as amostras mantidas à 38°C e 60°C.

Além disso, ensaios de tração dos corpos de prova de resina epóxi indicaram reduções significativas nas suas propriedades mecânicas, principalmente nos primeiros 6 meses de exposição, conforme ilustra a Figura 2.4.

Figura 2.4: Propriedades mecânicas da resina epóxi imersa em água por 24 meses



(a) Módulo de elasticidade em função do tempo de exposição



(b) Resistência à tração em função do tempo de exposição

Fonte: Yang, Xian e Karbhari (2008)

Destaca-se que ao fim dos 24 meses os corpos de prova apresentaram reduções na resistência à tração de 43%, 44% e 69% e reduções no módulo de elasticidade de 36%, 40% e 68% para as temperaturas de 23°C, 38°C e 60°C, respectivamente.

Ghiassi (2013) também observou redução de 25% na resistência à tração e redução de 40% no módulo de elasticidade de corpos de prova de resina epóxi imersos em água à 23°C por 24 semanas.

Silva *et al.* (2016) analisaram as propriedades mecânicas de corpos de prova de resina epóxi imersas em água à 20°C por 480 dias. Os resultados de ensaios de tração indicaram redução da resistência à tração de 38% e redução do módulo de elasticidade de 53%.

Além das resinas, alguns tipos de fibra também estão susceptíveis à degradação quando expostas à umidade. No caso das fibras de vidro, a umidade penetra pelo compósito e remove íons da fibra, modificando sua estrutura, o que resulta em dano e redução da resistência à tração da fibra (HELBLING; KARBHARI, 2007). As fibras de aramida absorvem umidade, resultando em expansão das fibras e redução das propriedades do compósito como resistência à compressão, cisalhamento e ligação da fibra com a matriz polimérica. Além disso, soluções como hidróxido de sódio e ácido hidrocloreídrico podem atacar quimicamente as fibras de aramida (ISIS, 2006).

As fibras de carbono, apesar de não serem afetadas pela exposição a ambientes úmidos como as fibras de vidro e aramida, estão sujeitas à degradação da aderência fibra-resina e adesivo-concreto (ISIS, 2006; HELBLING; KARBHARI, 2007).

Nos compósitos, a água absorvida pela resina expande a matriz, gerando tensões diferenciais entre a fibra e a matriz. Essas tensões diferenciais danificam a interface entre os

materiais, causando desprendimento das fibras e reduzindo a integridade estrutural do FRP (KARBHARI *et al.*, 2003).

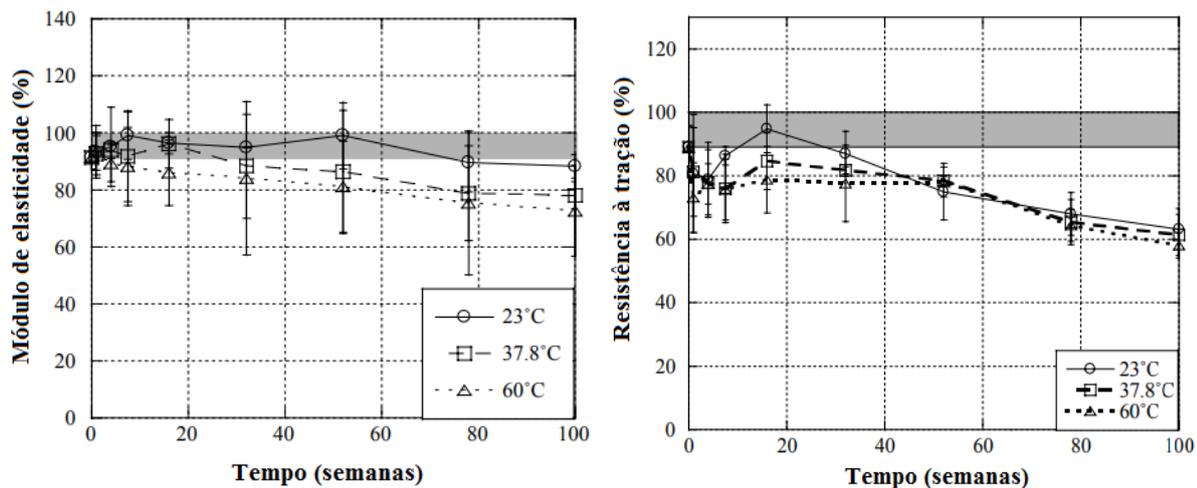
Sabe-se que as propriedades mecânicas do FRP dominadas pelas características da resina, tais como a resistência ao cisalhamento interlaminar e a resistência à flexão, estão mais susceptíveis à degradação devido à umidade do que as propriedades dominadas pelas características das fibras, como a resistência à tração; embora essa propriedade também possa ser afetada (SCIOLTI; FRIGIONE; AIELLO, 2010; ISIS, 2006).

Pesquisa realizada por Abanilla, Li e Karbhari (2006) avaliou as propriedades mecânicas de compósitos de CFRP e resina epóxi mantidos por 100 semanas imersos em água (em temperatura constante de 23°C, 38°C e 60°C).

Os resultados de ensaios de tração em compósitos de CFRP contendo 2 camadas indicaram redução da resistência à tração em 1%, 12% e 19% e do módulo de elasticidade em 15%, 12% e 27% para as temperaturas de 23°C, 38°C e 60°C, respectivamente. Para o CFRP contendo 6 camadas foi possível notar redução na resistência à tração de 32%, 39% e 42% e no módulo de elasticidade de 12%, 22% e 27% para as temperaturas de 23°C, 38°C e 60°C, respectivamente.

A Figura 2.5 ilustra os resultados dos ensaios de tração do compósito contendo 6 camadas.

Figura 2.5: Propriedades mecânicas do CFRP imerso em água



(a) Módulo de elasticidade em função do tempo

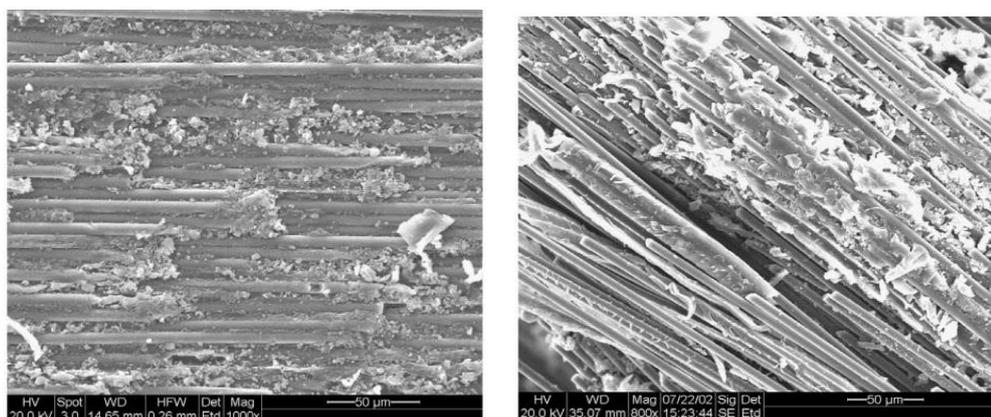
(b) Resistência à tração em função do tempo

Fonte: Abanilla, Li e Karbhari (2006)

Os autores concluíram que a maior parte da deterioração observada nos compósitos está associada à degradação das propriedades da resina e da interface fibra-resina, sendo o nível

desta deterioração mais evidente no compósito contendo 6 camadas. A Figura 2.6 apresenta a análise microscópica do compósito antes e após a exposição por 32 semanas em ambiente com umidade constante à 60°C, sendo possível notar no compósito exposto à umidade que as fibras aparentam estar mais soltas, indicando a redução da aderência fibra-matriz.

Figura 2.6: Análise microscópica da superfície do CFRP



(a) Antes da exposição

(b) Depois da exposição

Fonte: Abanilla, Li e Karbhari (2006)

Sciolti, Frigione e Aiello (2010) também avaliaram o comportamento mecânico de compósitos de CFRP e GFRP laminados com resina epóxi e mantidos imersos em água destilada por 30 semanas. Os resultados dos ensaios de tração dos compósitos contendo uma única camada de fibra de carbono não indicaram nenhuma mudança significativa na resistência à tração e módulo de elasticidade do compósito de CFRP após o período de imersão em água. Com relação ao compósito contendo uma camada de fibra de vidro, observou-se redução de 40% na resistência à tração do GFRP após o período de imersão em água.

A umidade também enfraquece a aderência entre o adesivo e o substrato de concreto. A água próxima ou na interface adesivo-concreto degrada essa aderência por meio de pressão osmótica, absorção de umidade e amolecimento do adesivo (ISIS, 2006).

Pesquisa realizada por Benzarti *et al.* (2011) avaliou o comportamento da aderência FRP-concreto por meio de ensaios de arrancamento (*pull-off*). Compósitos de CFRP e resina epoxídica pré-fabricados e laminados *in-situ* foram aplicados em prismas de concreto por meio da técnica EBR e mantidos por 20 meses em umidade de 95% a 40°C.

Os resultados deste programa experimental indicaram significativa redução na aderência FRP-concreto (46% para o laminado *in-situ* e 49% para o laminado pré-fabricado), além de uma alteração nos modos de ruptura, passando de coesiva, com plano de ruptura no substrato

de concreto, para adesiva, com plano de ruptura na interface FRP-concreto, conforme ilustra a Figura 2.7.

Figura 2.7: Amostras do modo de falha por arrancamento



(a) Antes da exposição

(b) Depois da exposição

(c) Depois da exposição

Fonte: Benzarti *et al.* (2011)

Além do efeito da água e da umidade no comportamento do FRP, alguns estudos ainda avaliaram o efeito de soluções salinas. Em geral, as observações experimentais concluíram que os compósitos de FRP expostos a essas soluções apresentavam redução de suas propriedades mecânicas pouco inferiores às reduções observadas quando os compósitos estavam expostos apenas a soluções não-salinas (ISIS, 2006; ABANILLA; LI; KARBHARI, 2006).

Estudo conduzido por Karbhari e Ghosh (2009) avaliou a aderência FRP-concreto de sistemas compósitos de CFRP e GFRP pré-fabricados e laminados *in-situ*. Corpos de prova reforçados pela técnica EBR foram mantidos por 24 meses imersos em água e solução de NaCl à 23°C.

Os resultados dos ensaios de arrancamento (*pull-off*) revelaram reduções de 54% e 26% na aderência dos compósitos de GFRP e CFRP laminados *in-situ* e redução de 50% na aderência de compósitos pré-fabricados de CFRP quando mantidos em solução salina, enquanto as reduções na aderência para os mesmos compósitos quando imersos em água foram de 23%, 20% e 48%, respectivamente.

Em escala molecular, o NaCl presente na solução salina pode deformar ou romper as ligações intermoleculares da estrutura da resina, resultando em maior degradação da resistência à compressão, resistência interlaminar e resistência à flexão do FRP (REGE; LAKKAD, 1983).

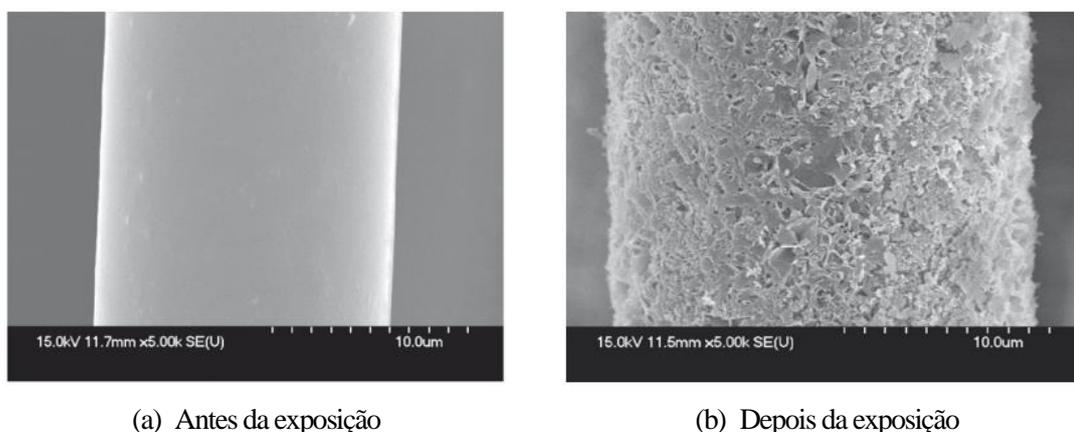
2.1.2 Ambiente alcalino

O concreto é um sólido poroso contendo solução com elevada alcalinidade em seus poros (pH variando entre 11 e 13,5). Como os compósitos de FRP são utilizados no interior ou em contato com a superfície do concreto, é fundamental conhecer o comportamento desse material em ambiente alcalino (ISIS, 2006).

Resultados de diversas pesquisas comprovam que as fibras de vidro isoladas quando expostas a ambientes alcalinos degradam em função de uma combinação de mecanismos que incluem a erosão, hidroxilação, hidrólise e lixiviação da fibra, resultando em redução de sua resistência à tração. Já as fibras de carbono isoladas mostram-se resistentes ao ataque das soluções alcalinas (KARBHARI *et al.*, 2003; ACI 440.2R, 2017).

A Figura 2.8 apresenta a análise microscópica de uma fibra de vidro isolada após 3 horas de exposição em uma solução alcalina com concentração de 2 mol/L de NaOH, sendo possível observar claramente a degradação da superfície da fibra quando em contato direto com a solução.

Figura 2.8: Análise microscópica da superfície da fibra de vidro



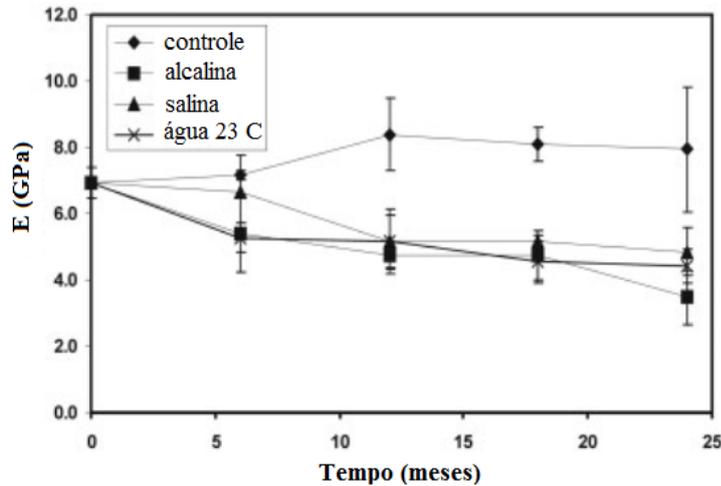
Fonte: Wei, Cao e Shenhua (2010)

A habilidade da matriz polimérica em promover a proteção contra o ataque de álcalis é um fator importante na resistência dos compósitos de FRP em contato com a alcalinidade do concreto, embora as soluções alcalinas possam acelerar o processo de degradação da aderência fibra-matriz (ISIS, 2006, KARBHARI *et al.*, 2003).

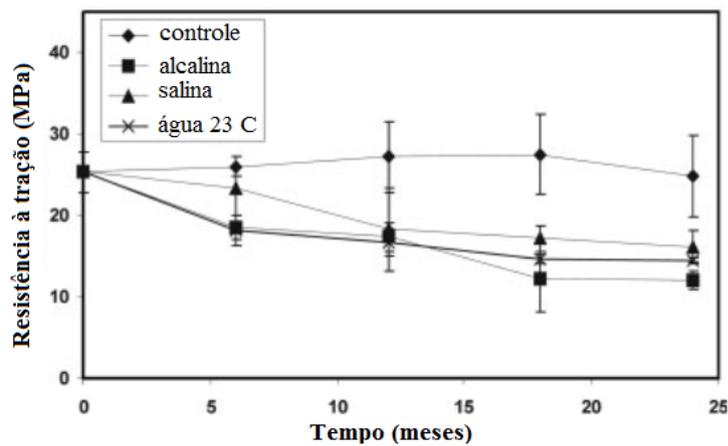
Estudo realizado por Yang, Xian e Karbhari (2008) avaliou por meio de ensaios de tração a redução das propriedades mecânicas de uma resina epóxi quando imersa por um período de 24 meses em água, solução salina e alcalina com temperatura constante de 23°C. A

Figura 2.9 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para o módulo de elasticidade e para a resistência à tração da resina epóxi mantida em diferentes tipos de soluções.

Figura 2.9: Propriedades mecânicas da resina epóxi mantida por 24 meses em diferentes tipos de solução



(a) Módulo de elasticidade em função do tempo de exposição



(b) Resistência à tração em função do tempo de exposição

Fonte: Yang, Xian e Karbhari (2008)

Os resultados obtidos ao final dos 24 meses de ensaio indicam uma redução na resistência à tração de 48% e redução de 46% no módulo de elasticidade para os corpos de prova imersos em solução alcalina.

Apesar das maiores reduções nas propriedades mecânicas da resina ocorrerem para os corpos de prova em solução alcalina, as diferenças entre os resultados obtidos para as propriedades mecânicas das amostras em água (redução de 43% na resistência à tração e 36% de redução no módulo de elasticidade) e solução salina foram muito próximas dos resultados obtidos para as amostras mantidas em solução alcalina.

2.1.3 Temperatura elevada

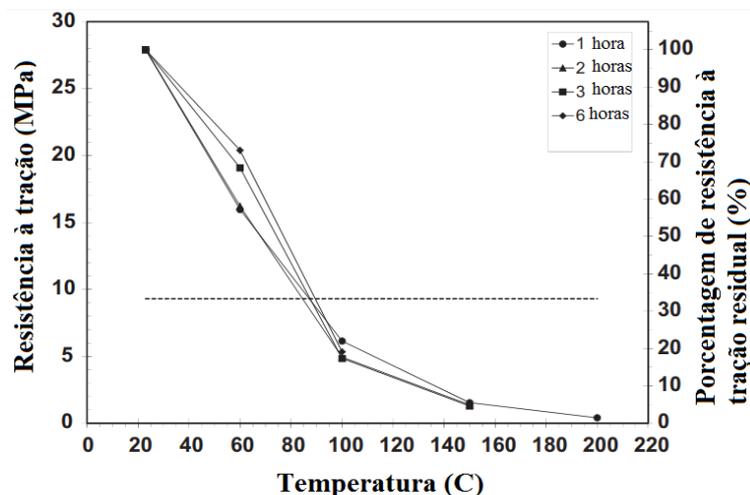
Os compósitos de FRP usualmente empregados na construção civil sofrem significativa redução tanto de suas propriedades mecânicas quanto da aderência FRP-concreto quando expostos a temperaturas acima de sua temperatura de transição vítrea T_g (usualmente variando entre 60°C e 82°C) (ACI 440.2R, 2017).

Quando a temperatura ambiente supera a T_g , a matriz polimérica do FRP apresenta modificações em sua estrutura molecular provocada pelo enfraquecimento das suas ligações intermoleculares, o que causa amolecimento e redução do módulo de elasticidade da matriz (ISIS, 2006). Para temperaturas mais elevadas, entre 300°C e 500°C ocorre a decomposição das matrizes poliméricas empregadas nos compósitos de FRP (MOURITZ, 2007).

Okba *et al.* (2017) avaliaram o efeito da elevação de temperatura no comportamento de resinas do tipo poliéster e epóxi. Após a cura dos corpos de prova de resinas (7 dias à temperatura de 23°C e umidade de 30%) elas foram mantidas à 60°C, 100°C, 150°C e 200°C por períodos de 1, 2, 3 e 6 horas.

Para a resina epoxídica, a Figura 2.10 representa os resultados dos ensaios de tração, sendo obtidas reduções de 43%, 88%, 94% e 98% na resistência à tração dos corpos de prova mantidos por apenas 1 hora à temperatura de 60°C, 100°C, 150°C e 200°C, respectivamente. Além disso, o aumento do tempo de exposição às temperaturas indicadas teve pouco efeito na redução das propriedades mecânicas das resinas.

Figura 2.10: Resistência à tração em função da temperatura para a resina epóxi



Fonte: Okba *et al.* (2017)

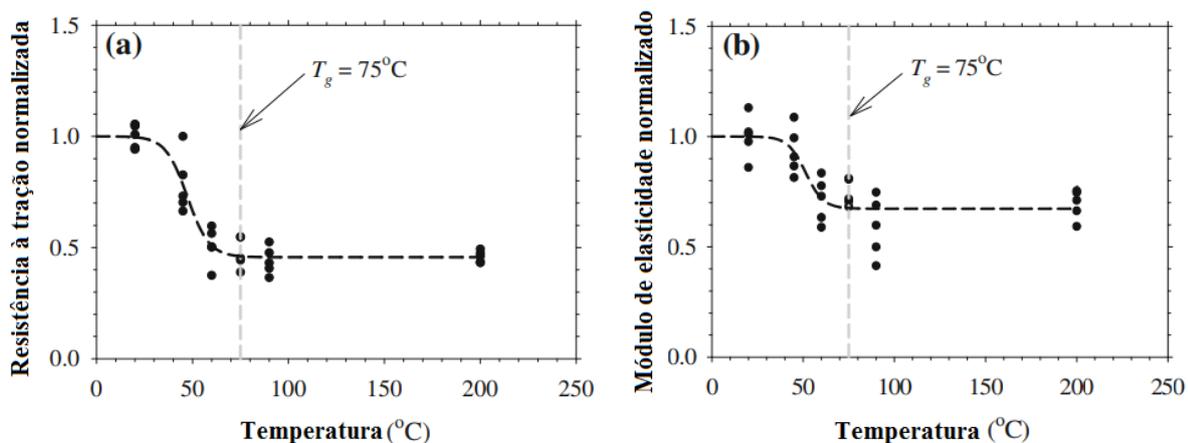
As fibras comumente empregadas nos FRPs são pouco afetadas pela elevação de temperatura, pesquisas indicam que as fibras de carbono não apresentam qualquer sinal de redução de sua resistência ou rigidez quando expostas a temperaturas de 1000°C. As fibras de vidro apresentam redução entre 20 e 60% de sua resistência à tração quando expostas a 600°C, já as fibras de aramida apresentam reduções semelhantes quando expostas a 300°C (ISIS, 2006).

Dessa forma, nos compósitos de FRP o efeito da temperatura resulta em maiores reduções da resistência e da rigidez ao cisalhamento (propriedades mecânicas governadas pelas características da matriz polimérica), embora a resistência à tração longitudinal do compósito também possa ser afetada (ISIS, 2006).

Chowdhury *et al.* (2011) avaliaram o efeito da elevação de temperatura nas propriedades mecânicas de compósitos de GFRP laminados com resina epoxídica (2 camadas). Tendo como base o valor da temperatura de transição vítrea do compósito (75°C), foi avaliado o comportamento mecânico do FRP quando exposto por apenas 15 minutos às temperaturas de 20°C, 45°C, 60°C, 75°C, 90°C e 200°C.

Os resultados dos ensaios de tração do FRP são apresentados na Figura 2.11, sendo possível observar reduções de 21%, 49%, 53%, 56% e 54% na resistência à tração para as temperaturas de 45°C, 60°C, 75°C, 90°C e 200°C, respectivamente e reduções de 10%, 30%, 23%, 38% e 19% no módulo de elasticidade dos compósitos de FRP expostos às mesmas temperaturas. As reduções mais expressivas nas propriedades mecânicas do compósito ocorreram para a temperatura de 60°C, inferior à temperatura de transição vítrea do compósito.

Figura 2.11: Propriedades mecânicas do compósito de GFRP em diferentes temperaturas



(a) Resistência à tração em função da temperatura

(b) Módulo de elasticidade em função da temperatura

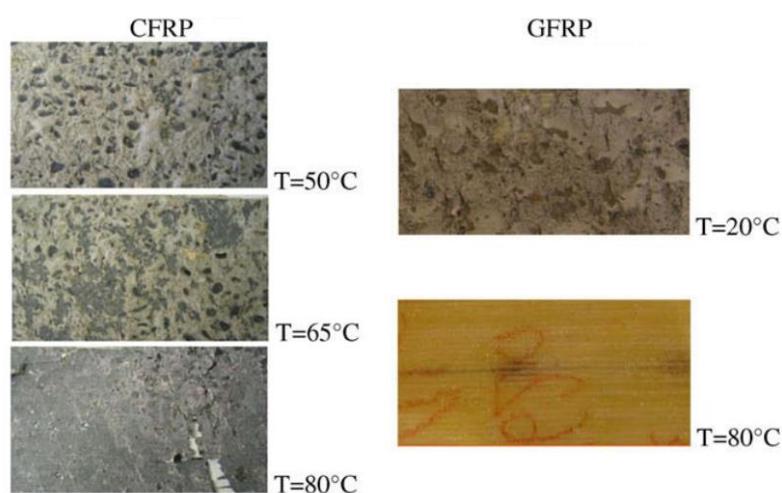
Fonte: Chowdhury *et al.* (2011)

A elevação de temperatura também pode influenciar na aderência FRP-concreto em função do amolecimento do adesivo e de expansões diferenciais entre as fibras e a resina e entre o FRP e a superfície de concreto (KARBHARI *et al.*, 2003).

Pesquisa realizada por Leone *et al.* (2009) avaliou o efeito da elevação de temperatura na aderência da interface FRP-concreto para corpos de prova mantidos à 20°C, 50°C, 65°C e 80°C. Prismas de concreto foram reforçados pela técnica EBR com compósitos pré-fabricados de CFRP e compósitos laminados *in-situ* de CFRP e GFRP a fim de avaliar a resistência ao cisalhamento na interface FRP-concreto.

Os resultados dos ensaios indicaram para uma temperatura de 80°C redução na resistência ao cisalhamento na interface FRP-concreto de 54%, 72% e 25% para os corpos de prova reforçados com mantas de CFRP e GFRP laminados *in-situ* e laminados de CFRP pré-fabricados, respectivamente. Além disso, o mesmo estudo ainda constatou modificações nos modos de falha na interface FRP-concreto que passou de coesiva no concreto para adesiva com a elevação da temperatura (Figura 2.12).

Figura 2.12: Modo de falha da ligação FRP-concreto com o aumento da temperatura (laminados *in-situ*)



Fonte: Leone *et al.* (2009)

Ainda vale destacar que a exposição a elevadas temperaturas pode influenciar em outros fatores de degradação como, por exemplo, na taxa de absorção de umidade e soluções alcalinas (ISIS, 2006).

Como já foi apresentado em itens anteriores, pesquisas como as de Yang, Xian e Karbhari (2008) e Abanilla, Li e Karbhari (2006) indicam que a elevação na temperatura de exposição de resinas poliméricas e compósitos de FRP imersos em solução tende a aumentar a degradação das propriedades mecânicas dos corpos de prova analisados.

2.1.4 Radiação ultravioleta

A radiação ultravioleta (UV) que atinge a superfície da Terra compreende cerca de 6% do total de radiação solar. Sabe-se que a radiação UV danifica diversos tipos de polímeros, incluindo aqueles empregados como matrizes em materiais compósitos. Dessa forma, como a maioria das aplicações externas dos sistemas de reforço estão expostas ao sol, é necessário conhecer do comportamento do FRP quando exposto à radiação UV (KARBHARI *et al.*, 2003; ISIS, 2006).

A degradação dos constituintes dos polímeros quando expostos à radiação UV ocorre por meio de um mecanismo conhecido como fotodegradação, em que a radiação UV dentro de uma gama de comprimentos de onda específicos (290 a 400 nm) quebra as ligações químicas entre as cadeias poliméricas. A quebra dessas ligações só é possível pois a energia de ligação dos polímeros é menor que a energia promovida pela luz UV (KARBHARI *et al.*, 2003; TONG; WHITE, 1996; ZHAO *et al.*, 2017).

Os efeitos da fotodegradação geralmente atingem apenas poucos *microns* da superfície exposta do FRP. Porém, apesar da degradação superficial, os componentes poliméricos geralmente apresentam uma redução desproporcional de suas propriedades mecânicas, uma vez que as fissuras resultantes da fotodegradação superficial concentram as tensões nessas regiões e, portanto, fraturam com níveis de tensão muito menores do que os esperados para amostras que não foram expostas (KARBHARI *et al.*, 2003).

As fissuras resultantes da fotodegradação também atuam de maneira a aumentar a susceptibilidade dos compósitos de FRP ao ataque de outros mecanismos de degradação como a absorção de umidade e soluções alcalinas (ISIS, 2006).

Kumar, Singh e Nakamura (2002) conduziram uma investigação experimental a fim de caracterizar a degradação física, química e mecânica de um compósito de CFRP e resina epoxídica quando exposto à radiação UV e condensação de vapor de água.

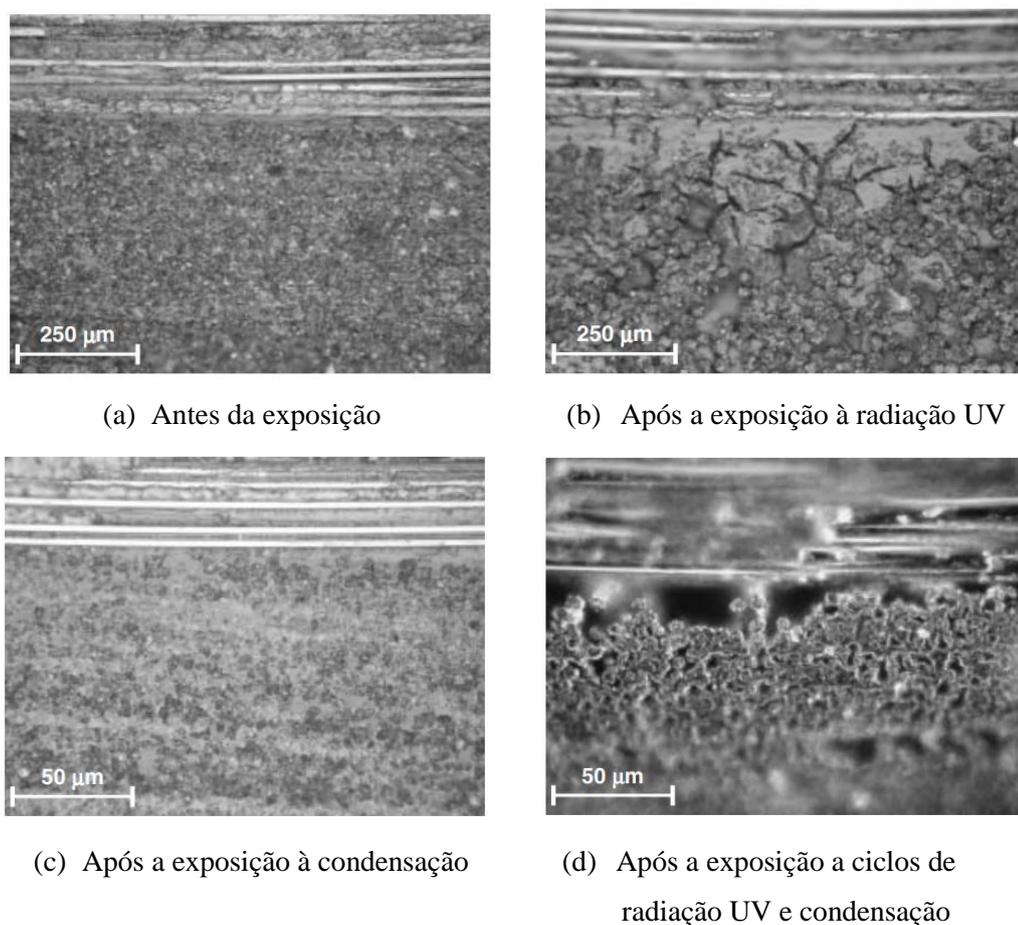
Os corpos de prova foram expostos a quatro diferentes ambientes em uma câmara de envelhecimento acelerado, combinando radiação UV (295 a 365 nm a uma temperatura de 60°C) e/ou condensação (100% de umidade a uma temperatura de 50°C).

Os corpos de prova expostos a 500 horas de radiação UV apresentaram uma redução de apenas 0,3% no seu peso, redução essa associada a uma expulsão de umidade residual, enquanto os corpos de prova expostos à condensação apresentaram um ganho de 0,9% em seu peso após 500 horas de exposição; já os corpos de prova que foram expostos a ciclos de radiação UV e

condensação (totalizando 500 horas de exposição com ciclos de 6 horas) apresentaram uma taxa constante de perda de peso durante o período de exposição, indicando perda de material do CFRP.

A Figura 2.13 apresenta a análise microscópica do CFRP quando exposto a cada uma das condições de exposição citadas anteriormente. É possível notar que a ação combinada da radiação UV e da condensação gera extensiva erosão e microfissuração da matriz, descolamento, perda de fibras e formação de vazios.

Figura 2.13: Análise microscópica da superfície do CFRP



Fonte: Kumar, Singh e Nakamura (2002)

A mesma pesquisa ainda avaliou o efeito dessa degradação nas propriedades mecânicas dos compósitos de CFRP, sendo possível observar que as propriedades mecânicas dominadas pelas características da matriz eram as mais afetadas, destacando-se uma redução de 29% na resistência à tração transversal às fibras dos corpos de prova expostos a 1000 horas de ciclos de radiação UV e condensação.

Os autores destacam que, apesar das propriedades mecânicas longitudinais (na direção

paralela às fibras) não terem sido alteradas após o período de exposição analisado, pode-se esperar que danos mais severos ocorram durante longos períodos de exposição à radiação UV e condensação.

Pesquisa realizada por Zhao *et al.* (2017) teve por objetivo avaliar o comportamento de diferentes tipos de resinas poliméricas e compósitos quando expostos à radiação UV. A exposição ao UV foi feita de maneira cíclica em uma câmara de envelhecimento acelerado onde os corpos de prova foram submetidos a ciclos de 8 horas com radiação UV (280 a 315 nm) e 4 horas de condensação com temperatura e umidade constantes (95% e 60°C) por um total de 90 dias.

Os resultados dos ensaios de tração para as resinas expostas indicam redução de 65% na resistência à tração e redução de 69% no módulo de elasticidade das resinas éster vinílicas, enquanto as resinas epoxídicas apresentaram redução de apenas 20% no módulo de elasticidade.

Para os compósitos laminados com a resina éster vinílica, foram observadas reduções de 20% e 25% na resistência à tração do CFRP e GFRP (1 camada) respectivamente. Para os compósitos laminados com resina epoxídica, foram observadas reduções de 13% na resistência à tração tanto do CFRP quanto do GFRP (2 camadas). O mesmo estudo ainda permitiu concluir que o aumento do número de camadas não foi capaz de reduzir o efeito da exposição UV nas propriedades mecânicas do compósito.

Além da resina, em função de sua natureza orgânica, a fibra de aramida Kevlar também degrada sob radiação UV. Resultados de estudos indicam redução de 50% na resistência à tração de um tecido de aramida exposto por 5 semanas à luz solar natural (DU PONT TECHNICAL INFORMATION, 1981¹ *apud.* LARSON, 1986).

Com relação ao comportamento dos compósitos de aramida, Larsson (1986) avaliou compósitos de aramida e resina epóxi expostos a 2000 horas de radiação ultravioleta artificial (lâmpadas com comprimento de onda entre 29 nm e 600 nm). Observou-se redução de 40% na resistência à tração dos compósitos com 0,13 mm de espessura expostos à radiação UV. Além disso, a pesquisa também observou que para corpos de prova com espessuras de 0,25 mm e 0,55 mm não foi constatada redução das propriedades mecânicas em função da radiação UV.

¹ DU PONT TECHNICAL INFORMATION. Kevlar Aramid Bulletin K-5, Characteristics and uses of Kevlar 49 Aramid High Modules Organic Fiber, 1981.

2.2 Recomendações normativas relacionadas à durabilidade do FRP

A principal técnica de reforço com FRP consiste na colagem externa de mantas ou laminados do material na superfície do elemento estrutural, técnica conhecida por EBR-FRP, permitindo assim o reforço à flexão, cisalhamento, torção e confinamento de seções transversais de concreto.

As aplicações da técnica EBR podem ser divididas em críticas por aderência (*bond-critical*, em língua inglesa) e críticas por contato (*contact-critical*, em língua inglesa), a depender do elemento estrutural a ser reforçado. O reforço de vigas e lajes à flexão e ao cisalhamento são exemplos de aplicações consideradas críticas por aderência, sendo necessário garantir uma boa aderência entre o FRP e o substrato de concreto para a transferência de tensões entre os materiais. Aplicações consideradas críticas por contato devem garantir o contato entre o FRP e o concreto, entretanto a aderência entre os materiais não é crítica, esse é o caso das aplicações de sistemas FRP para o confinamento de pilares (ACI 440.2R, 2017; TATAR; MILEV, 2021).

Dessa forma, em aplicações cuja aderência seja crítica, a durabilidade tanto do compósito como da aderência FRP-concreto desempenha papel fundamental no comportamento do elemento reforçado, já em aplicações cujo contato seja crítico, apenas a durabilidade do FRP influencia no comportamento do elemento estrutural reforçado (TATAR; MILEV, 2021).

A seguir são apresentadas algumas das recomendações normativas para o dimensionamento e avaliação da durabilidade frente às ações ambientais dos sistemas de reforço externo com FRP.

2.2.1 ACI 440.2R (2017)

A norma americana para dimensionamento de reforço externo em estruturas de concreto armado utiliza em suas equações de dimensionamento propriedades mecânicas do FRP reduzidas em função da condição de exposição ambiental da estrutura. As Equações 2.1 e 2.2 apresentam a resistência à tração e a deformação de ruptura reduzida por um fator de redução ambiental, em que f_{fu}^* e ε_{fu}^* representam a tensão de tração e a deformação de ruptura fornecida pelo fabricante do FRP e C_E é o fator de redução ambiental que depende do tipo de fibra e da condição de exposição (Tabela 2.1) (ACI 440.2R, 2017).

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (2.2)$$

Tabela 2.1: Fator de redução ambiental para vários sistemas de FRP e condições de exposição

Condição de exposição	Tipo de fibra	Fator de redução ambiental C_E
Interior	Carbono	0,95
	Vidro	0,75
	Aramida	0,85
Exterior (pontes, cais e garagens abertas)	Carbono	0,85
	Vidro	0,65
	Aramida	0,75
Ambiente agressivo (fábricas de produtos químicos e estações de tratamento de águas residuais)	Carbono	0,85
	Vidro	0,5
	Aramida	0,7

Fonte: ACI 440.2R (2017)

Segundo o ACI 440.2R (2017), os fatores de redução ambiental apresentados na Tabela 2.1 são estimativas conservadoras baseadas na durabilidade de cada tipo de fibra.

Como o FRP apresenta comportamento elástico-linear até a sua ruptura, o módulo de elasticidade (E_f) empregado no dimensionamento do reforço pode ser determinado da Lei de Hooke conforme a Equação 2.3 (ACI 440.2R, 2017).

$$E_f = f_{fu} / \varepsilon_{fu} \quad (2.3)$$

2.2.1.1 Reforço à flexão

A colagem de FRP com as fibras orientadas ao longo do comprimento da face tracionada de uma estrutura de concreto submetida à flexão irá aumentar a sua resistência à flexão (ACI 440.2R, 2017).

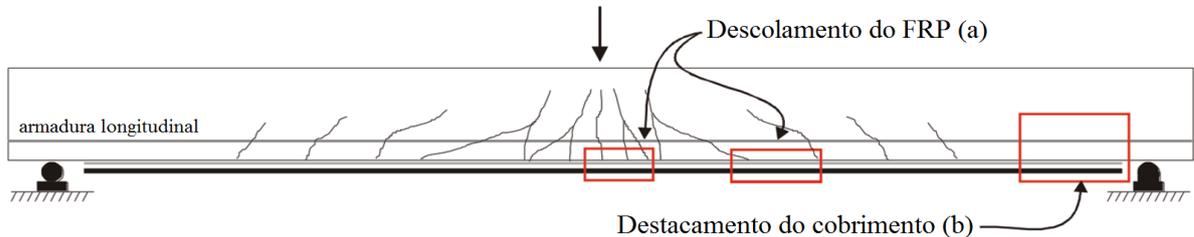
O procedimento para dimensionamento do sistema de reforço à flexão consiste em controlar o modo de falha do elemento em concreto armado reforçado. GagaRao e Vijay (1998)

destacam os seguintes modos de falha à flexão:

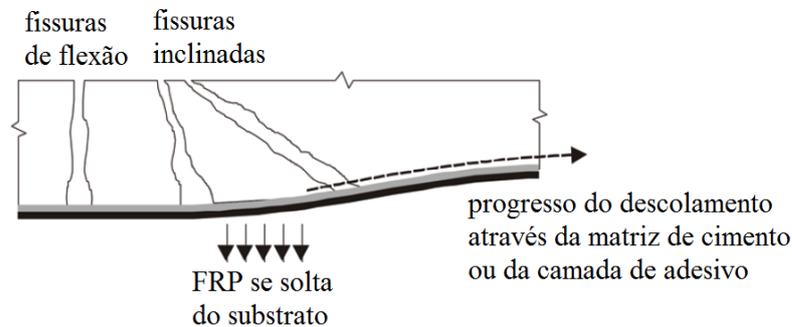
- (a) Esmagamento do concreto comprimido antes do escoamento da armadura;
- (b) Escoamento da armadura seguido de ruptura do FRP;
- (c) Escoamento da armadura seguido de esmagamento do concreto comprimido;
- (d) Destacamento do cobrimento de concreto;
- (e) Descolamento do FRP da superfície de concreto.

Se o substrato de concreto não for capaz de sustentar as tensões atuando no FRP pode ocorrer destacamento do concreto do cobrimento ou descolamento do FRP, conforme ilustra a Figura 2.14 (ACI 440.2R, 2017).

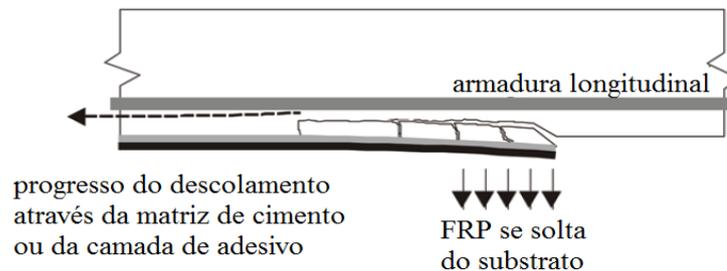
Figura 2.14: Descolamento e destacamento de sistemas de reforço externo em FRP



(a) Comportamento de um elemento de concreto armado reforçado à flexão com FRP



(b) Descolamento do FRP iniciado por fissuras de flexão e/ou cisalhamento



(c) Destacamento do concreto de cobrimento tendo início na extremidade do FRP

Fonte: ACI 440.2R (2017)

Conforme ilustra a Figura 2.14 (b), fora da região de ancoragem do FRP pode ocorrer

um modo de falha controlado pelo descolamento do FRP. Em regiões próximas aos maiores momentos de flexão, a abertura das fissuras induz tensões de cisalhamento na interface FRP-concreto, dando início ao descolamento do FRP. Esse descolamento se propaga pelo substrato de concreto através de uma fina camada da matriz de cimento em direção aos menores momentos atuantes na seção (ACI 440.2R, 2017).

Como forma de prevenir esse modo de falha a norma limita a deformação efetiva no FRP (ε_{fd}) conforme a Equação 2.4, em que f'_c é a resistência à compressão do concreto, n é o número de camadas de FRP empregadas no sistema de reforço e t_f é a espessura nominal de uma camada de FRP. Essa equação se baseia nas análises experimentais de Teng *et al.* (2003) que propuseram uma equação para a deformação efetiva do FRP em vigas reforçadas à flexão apresentando falha por descolamento do FRP (ACI 440.2R, 2017).

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9\varepsilon_{fu} \quad (2.4)$$

Ainda conforme a Figura 2.14 (c) na região de ancoragem do FRP pode ocorrer o destacamento do substrato de concreto, devido às tensões normais que se desenvolvem na extremidade do FRP. Nesse modo de falha, as barras de armadura fornecem um plano horizontal de ruptura ao longo do qual o concreto do substrato se solta do restante da viga (ACI 440.2R, 2017).

O ACI 440.2R (2017) indica que a capacidade de aderência do FRP é desenvolvida ao longo de um comprimento crítico ℓ_{fd} dado pela Equação 2.5 (TENG *et al.*, 2003). Dessa forma, o comprimento de ancoragem do FRP deve exceder o comprimento crítico para que seja garantido o desenvolvimento das tensões de aderência entre o FRP e o concreto.

$$\ell_{fd} = \sqrt{\frac{nE_f t_f}{\sqrt{f'_c}}} \quad (2.5)$$

2.2.1.2 Reforço ao cisalhamento

Os sistemas FRP também têm sido empregados para reforço de vigas e pilares ao cisalhamento. Nesse caso as fibras são orientadas transversalmente ao eixo do

elemento estrutural ou perpendicularmente às possíveis fissuras provocadas pelo cisalhamento (ACI 440.2R, 2017).

Três tipos de encamisamentos com FRP podem ser empregadas para reforço ao cisalhamento de vigas e pilares com seção retangular: a seção transversal pode ser completamente envolvida com o FRP, ou então apenas duas ou três faces serem reforçadas com FRP, conforme ilustra a Figura 2.15.

Figura 2.15: Tipos de aplicações para reforço ao cisalhamento com FRP



Fonte: ACI 440.2R (2017)

Para os elementos de concreto completamente envolvidos com FRP geralmente, antes que o FRP tenha atingido a sua deformação última, ocorre a perda da resistência devido ao engrenamento dos agregados do concreto. Dessa forma, o ACI 440.2R (2017) limita a deformação máxima do FRP para fins de dimensionamento do reforço ao cisalhamento, conforme indica a Equação 2.6.

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,75\varepsilon_{fu} \quad (2.6)$$

Essa limitação de deformação atuando no FRP é baseada em observações experimentais realizadas por Priestley, Seible e Calvi (1996)² *apud*. ACI 440.2R (2017).

No caso das aplicações que não envolvem toda a seção transversal de concreto (três e dois lados reforçados com FRP) observa-se modo de falha governado pelo descolamento do FRP da superfície de concreto antes da perda da resistência devido ao engrenamento dos agregados do concreto. Nesse caso, a deformação efetiva atuando no FRP é calculada empregando um coeficiente de redução de aderência K_v , conforme apresenta a Equação 2.7 (ACI 440.2R, 2017).

² PRIESTLEY, M.; SEIBLE, F.; CALVI, G. **Seismic design and retrofit of bridges**. John Wiley and Sons, New York, 704 p., 1996.

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_v \varepsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (2.7)$$

O coeficiente de redução da aderência foi proposto por Khalifa *et al.* (1998) com base em resultados analíticos e experimentais, sendo calculado conforme a Equação 2.8.

$$\kappa_v = \frac{\kappa_1 \kappa_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75 \quad (2.8)$$

Na Equação 2.8, o comprimento de aderência efetivo L_e é dado pela Equação 2.9.

$$L_e = \frac{23300}{(n t_f E_f)^{0,58}} \quad (2.9)$$

O coeficiente de redução da aderência κ_v depende ainda de outros dois fatores que levam em consideração a resistência à compressão do concreto e o esquema de reforço com FRP empregado (Equação 2.10 e Equação 2.11)

$$\kappa_1 = \left(\frac{f'_c}{27} \right)^{2/3} \quad (2.10)$$

$$\kappa_2 = \begin{cases} \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} & \text{para 3 lados reforçados} \\ \frac{d_{fv} - 2L_e}{d_{fv}} & \text{para 2 lados reforçados} \end{cases} \quad (2.11)$$

Na Equação 2.11, d_{fv} indica o comprimento efetivo do reforço ao cisalhamento.

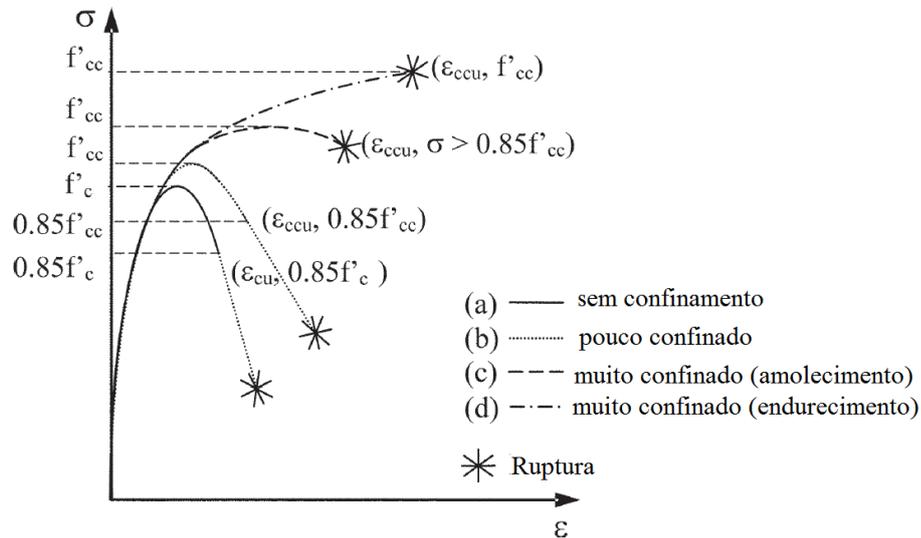
2.2.1.3 Confinamento

O confinamento de pilares de concreto armado por meio de encamisamento com compósitos de FRP pode ser utilizado para aumentar a sua resistência e ductilidade. As fibras orientadas transversalmente ao eixo longitudinal do pilar promovem um confinamento passivo na estrutura de concreto, sendo solicitadas apenas quando a estrutura comprimida inicia a sua

dilatação e fissuração (ACI 440.2R, 2017).

Dependendo do nível de confinamento a curva tensão-deformação para um pilar de concreto armado é descrita por uma das curvas da Figura 2.16.

Figura 2.16: Curvas tensão-deformação para pilares de concreto armado sem e com confinamento



Fonte: ROCCA *et al.* (2008)³ apud. ACI 440.2R (2017)

Na Figura 2.16 f'_c e f'_{cc} representam as tensões máximas para o concreto sem confinamento e confinado, respectivamente. A deformação axial última da estrutura sem confinamento (ϵ_{cu}) corresponde a $0,85f'_c$, já a deformação axial última para a estrutura confinada (ϵ_{ccu}) corresponde a $0,85f'_{cc}$ no caso de estrutura de concreto pouco confinada e corresponde à deformação de ruptura para estruturas de concreto muito confinadas (tensão superior a $0,85f'_{cc}$ para o amolecimento e f'_{cc} para o caso de endurecimento).

O modelo de tensão-deformação axial utilizado pelo ACI 440.2R (2017) para descrever o comportamento do concreto confinado com FRP é o proposto por Lam e Teng (2003).

O modelo emprega como deformação efetiva atuando no FRP no momento de ruptura, ϵ_{fe} , a Equação 2.12, em que K_ϵ é o fator de eficiência da deformação do FRP que considera a falha prematura do sistema de reforço com FRP relacionada à concentração de tensões

³ ROCCA, S.; GALATI, N.; NANNI, A. Review of design guidelines for FRP confinement of reinforced concrete columns of noncircular cross sections. **Journal of Composites for Construction**, v.12, n.1, p.80-92, 2008.

causadas pela fissuração do concreto. Com base em observações experimentais como as realizadas por Lam e Teng (2003) e outros autores esse fator foi calibrado em 0,586.

$$\varepsilon_{fe} = K_{\varepsilon} \varepsilon_{fu} \quad (2.12)$$

2.2.2 FIB Bulletin nº 90 (2019)

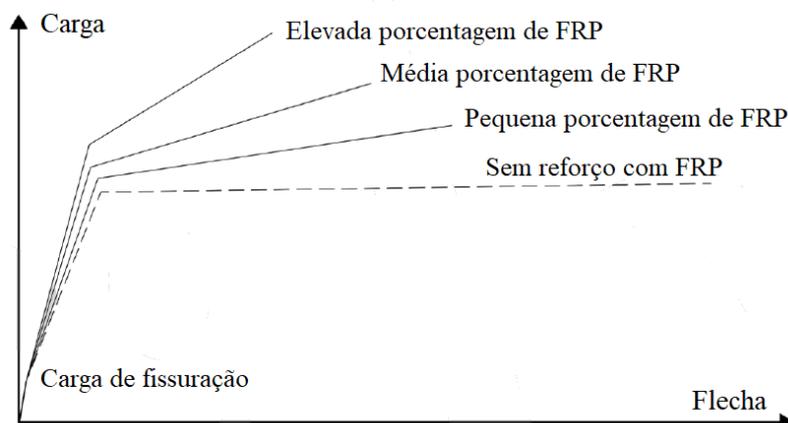
A norma europeia que trata do dimensionamento de reforço externo com FRP de estruturas de concreto armado é a FIB *Bulletin* 90 (2019).

2.2.2.1 Reforço à flexão

Estruturas de concreto armado como vigas, lajes e pilares podem ser reforçadas à flexão por meio da colagem de FRP nas regiões em que atuam as tensões de tração. Nesse caso, as fibras do FRP deverão estar alinhadas paralelamente à direção em que atuam as tensões de tração no elemento (FIB *Bulletin* 90, 2019).

A Figura 2.17 apresenta diferentes curvas de carregamento *versus* flecha para vigas de concreto armado sem reforço com FRP e com diferentes taxas de reforço com FRP. É possível notar com o aumento da taxa de reforço com FRP o aumento da capacidade de carga à flexão da viga, em contrapartida, observa-se também a redução da flecha no momento de falha da viga reforçada com FRP. Destaca-se que esse modo de falha tende a ser frágil e corresponde à perda de aderência do FRP da superfície de concreto (FIB *Bulletin* 90, 2019).

Figura 2.17: Curvas força *versus* flecha para diferentes taxas de reforço à flexão



Fonte: FIB *Bulletin* 90 (2019)

A FIB *Bulletin* 90 (2019) considera os seguintes modos de falha à flexão para uma viga reforçada com FRP:

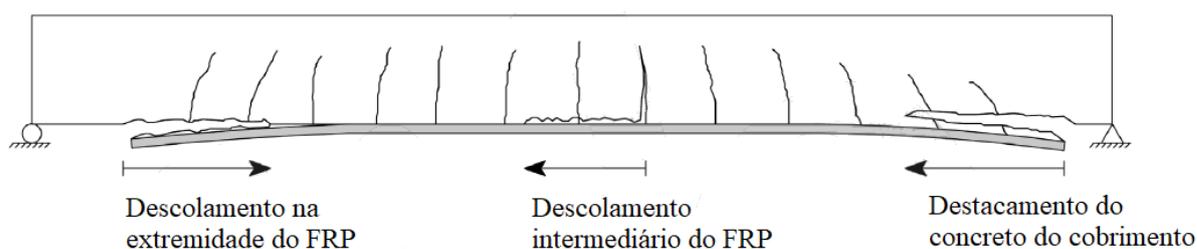
- (a) Escoamento do aço seguido do esmagamento do concreto;
- (b) Escoamento do aço seguido de ruptura do FRP;
- (c) Esmagamento do concreto;
- (d) Perda de aderência do FRP após o escoamento da armadura, sendo este o modo de falha mais comumente observado.

Nos casos em que o FRP atinge a deformação efetiva antes do esmagamento do concreto, a falha normalmente ocorre pela perda de aderência do FRP e não pela sua ruptura (FIB *Bulletin* 90, 2019).

A perda de aderência do FRP pode acontecer em diferentes interfaces do sistema FRP-adesivo-concreto, dependendo das propriedades do substrato de concreto, do compósito de FRP e do adesivo. Assim, o termo “descolamento” é adotado quando se refere aos modos de falha que acontecem no adesivo, no FRP ou na interface FRP-adesivo e adesivo-concreto (FIB *Bulletin* 90, 2019).

Segundo a FIB *Bulletin* 90 (2019), os modos de falha associados ao descolamento do FRP em vigas de concreto armado reforçadas podem ser classificados com base na região em que o descolamento ou perda de aderência tem início, conforme ilustrado na Figura 2.18 e detalhado na sequência.

Figura 2.18: Modos de falha associados ao descolamento do FRP em uma viga de concreto armada reforçada



Fonte: FIB *Bulletin* 90 (2019)

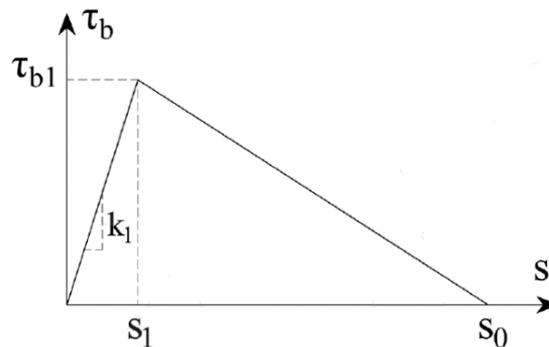
- (a) Descolamento na extremidade do FRP (*end debonding*) tem início na região de ancoragem do FRP e está relacionado com as elevadas tensões normais e de cisalhamento que atuam nessa região. Outro modo de falha observado na extremidade do FRP é a falha ao cisalhamento da viga em concreto armado. Nesse caso é observado destacamento do concreto do cobrimento ao longo do nível das barras de armadura;

- (b) Descolamento intermediário do FRP (*intermediate crack debonding*), que ocorre nas fissuras de flexão ou cisalhamento intermediárias devido ao efeito da tensão de cisalhamento na interface FRP-concreto.

A aderência FRP-concreto geralmente é expressa pela relação entre a tensão de cisalhamento na interface (τ_b) e o respectivo deslizamento (s). Em termos de significado físico para o deslizamento, a relação $\tau_b - s$ representa a transferência da tensão de cisalhamento e o processo de descolamento do FRP do substrato de concreto (FIB *Bulletin* 90, 2019).

A Figura 2.19 apresenta uma curva bi-linear simplificada para a relação $\tau_b - s$. Os valores dos parâmetros apresentados geralmente são definidos por meio de análises experimentais da resistência ao cisalhamento e energia de fratura da interface. A curva bi-linear é definida por uma relação linear entre a tensão de cisalhamento τ_b e o deslizamento s , até ser atingida a resistência ao cisalhamento τ_{b1} , seguido então por uma queda linear até o deslizamento máximo s_0 (FIB *Bulletin* 90, 2019).

Figura 2.19: Curva tensão de cisalhamento *versus* deslizamento na interface FRP-concreto



Fonte: FIB *Bulletin* 90 (2019)

Zilch, Niedermeier e Finckh (2012)⁴ *apud*. FIB *Bulletin* 90 (2019) propuseram os valores apresentados na Tabela 2.2 para os parâmetros da curva $\tau_b - s$. Em que f_{cm} é a resistência média à compressão do concreto e f_{ctm} é a resistência média à tração do concreto do substrato.

Tabela 2.2: Valores dos parâmetros da curva tensão de cisalhamento *versus* deslizamento

⁴ ZILCH, K.; NIEDERMEIER, R.; FINCKH, W. Praxisgerechte Bemessungsansätze für das wirtschaftliche Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung – Verbundtragfähigkeit unter statischer Belastung, DAFsb Heft 592, Berlin, 2012.

Tipo		τ_{b1}	S_1 (mm)	S_0 (mm)
Laminado de CFRP (pré-fabricado)	Valor médio	$0,53\sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}}$	0,0063	0,21
	Valor característico	$0,37\sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}}$	-	0,2
Mantas de CFRP (laminado <i>in-situ</i>)	Valor médio	$0,72\sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}}$	0,0107	0,24
	Valor característico	$0,44\sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}}$	-	0,23

Fonte: FIB *Bulletin* 90 (2019)

Bilotta *et al.* (2011)⁵ *apud.* FIB *Bulletin* 90 (2019) propuseram os seguintes valores para os parâmetros da curva $\tau_b - s$ (Tabela 2.3). Em que G_f é a energia de fratura da interface FRP-concreto.

Tabela 2.3: Valores dos parâmetros da curva tensão de cisalhamento *versus* deslizamento

Tipo		G_f (MPa.mm)	τ_{b1} (MPa)	S_0 (mm)
Laminado e mantas de CFRP	Valor médio	$0,25^2 \cdot k_b^2 \cdot f_{cm}^{2/3}$	$0,5 \cdot k_b^2 \cdot f_{cm}^{2/3}$	0,25
	Valor característico	$0,17^2 \cdot k_b^2 \cdot f_{cm}^{2/3}$	$0,23 \cdot k_b^2 \cdot f_{cm}^{2/3}$	0,25

Fonte: FIB *Bulletin* 90 (2019)

Na Tabela 2.3, k_b é chamado de fator de forma e pode ser calculado por meio da Equação 2.13, em que b_f é a largura do FRP e b é a largura do substrato de concreto em que o FRP está aderido.

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - b_f/b}{1 + b_f/b}} \quad (2.13)$$

Na análise da capacidade resistente à flexão deve ser garantido que a resistência

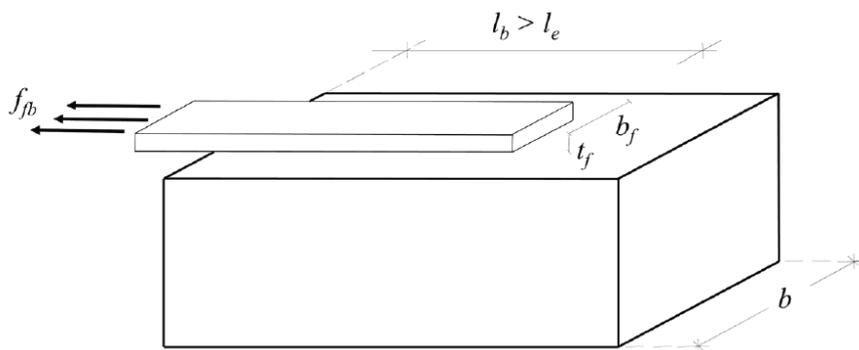
⁵ BILOTTA, A.; CERONI, F.; NIGRO, E.; PECCE, M. Design by testing procedure of debonding load for RC strengthened with EBR FRP materials. Proceedings of 10 FRPRCS International Symposium, Tampa, Florida, 2011

projetada para o elemento seja superior ao carregamento de projeto. A resistência à flexão da seção de concreto armada reforçada é determinada com base na compatibilização das deformações atuando na seção transversal e no equilíbrio das forças horizontais e momentos. Além disso, no estado limite último ainda deve ser verificado o descolamento do FRP (FIB *Bulletin* 90, 2019).

A verificação com relação à segurança ao descolamento do FRP requer a avaliação da tensão máxima de tração que pode atuar no FRP e ser transferida para o substrato de concreto (FIB *Bulletin* 90, 2019).

Com base em observações experimentais de testes de aderência (Figura 2.20) a tensão máxima atuando no FRP f_{fb} depende do comprimento de ancoragem l_b . O comprimento l_e é chamado de comprimento de ancoragem efetivo e corresponde ao comprimento mínimo capaz de garantir a transferência da tensão máxima entre o FRP e o concreto (FIB *Bulletin* 90, 2019).

Figura 2.20: Tensão máxima de tração transmitida pelo FRP



Fonte: FIB *Bulletin* 90 (2019)

Assumindo a curva bi-linear apresentada na Figura 2.19 para o comportamento da interface, o comprimento de ancoragem efetivo l_e é calculado por meio da Equação 2.14, em que E_f é o módulo de elasticidade do FRP (em MPa), t_f é a espessura do FRP (em mm).

$$l_e = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{E_f \cdot s_0 \cdot t_f}{\tau_{b1}}} \quad (2.14)$$

Considerando que a resistência ao cisalhamento máxima τ_{b1} está diretamente relacionada à resistência à tração do concreto do substrato, pode-se reescrever a Equação 2.14 na forma de Equação 2.15 para valores médios e 2.16 para valores característicos.

$$l_e = \frac{\pi}{k_b} \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{8 f_{cm}^{2/3}}} \quad (2.15)$$

$$l_e = 1,5 \frac{\pi}{k_b} \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{8 f_{cm}^{2/3}}} \quad (2.16)$$

Ensaio de aderência conforme os ilustrados na Figura 2.19 representam bem o comportamento do FRP em região de ancoragem, nesse caso as tensões de cisalhamento prevalecem e as tensões normais podem ser desprezadas. Dessa forma, a tensão máxima do FRP, f_{fb} considerando a possibilidade do seu descolamento é dada pela Equação 2.17.

$$f_{fb}(l_b) = \beta_1(l_b) \sqrt{\frac{E_f \cdot s_0 \cdot \tau_{b1}}{t_f}} \quad (2.17)$$

β_1 é um coeficiente que depende do comprimento de ancoragem l_b e do comprimento de ancoragem efetivo l_e (Equação 2.18).

$$\beta_1 = \begin{cases} \frac{l_b}{l_e} \left(2 - \frac{l_b}{l_e} \right) & \text{se } l_b < l_e \\ 1 & \text{se } l_b \geq l_e \end{cases} \quad (2.18)$$

A fim de prevenir o descolamento intermediário do FRP, a tensão de projeto do FRP σ_{fd} deverá ser limitada conforme apresenta a Equação 2.19 em regiões de máximo momento fletor (assumindo que nessas regiões provavelmente serão formadas fissuras por flexão ou flexo-cisalhamento). Em que $f_{fbd,IC}$ é o valor de projeto da resistência à aderência do FRP e f_{fd} é o valor de projeto da resistência à tração do FRP (FIB *Bulletin* 90, 2019).

$$\sigma_{fd} = \min(f_{fbd,IC}, f_{fd}) \quad (2.19)$$

$f_{fbd,IC}$ é calculado por meio da Equação 2.20, em que $k_{cr,k} = 1,8$, $k_k = 0,17$, e $\gamma_{fb} = 1,5$ é o coeficiente de segurança para modo de falha governado pelo descolamento do FRP. A FIB *Bulletin* 90 (2019) indica que os coeficientes $k_{cr,k}$ e k_k são determinados com base em observações experimentais.

$$f_{fbd,IC} = \frac{k_{cr,k} \cdot k_k \cdot k_b \sqrt{\frac{2E_f}{t_f} f_{cm}^{2/3}}}{\gamma_{fb}} \quad (2.20)$$

f_{fd} é calculado por meio da Equação 2.21, em que f_{fk} é a resistência à tração característica do FRP, $\gamma_f = 1,25$ é um coeficiente de segurança associado ao FRP.

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f} \quad (2.21)$$

2.2.2.2 Reforço ao cisalhamento

O reforço à força cortante de elementos de concreto armado é promovido por meio do emprego de FRP aderido ortogonalmente ao eixo do elemento estrutural. O reforço é promovido por meio de sistemas de FRP abertos (três lados da seção transversal reforçados) ou fechados (encamisamento completo seção transversal). A FIB *Bulletin* 90 (2019) ressalta que sistemas de reforço que consistem em três lados da seção transversal reforçados com FRP podem ser empregados, apesar da eficiência do FRP ser reduzida devido à possibilidade de ocorrer o descolamento.

A parcela de força cortante resistida pelo FRP depende diretamente da tensão média de projeto atuando no FRP f_{fvd} . O valor de f_{fvd} depende da configuração do reforço em FRP (encamisamento completo, três lados reforçados ou dois lados reforçados) (FIB *Bulletin* 90, 2019):

- (a) Encamisamento completo com FRP: nesse a tensão f_{fvd} deverá ser calculada

conforme a Equação 2.22, em que $a_t = 0,8$ é fator associado aos carregamento de longa duração e k_r é um fator de redução que leva em conta tanto a distribuição não uniforme de tensão atuando na faixa de FRP interceptada por fissuras de cisalhamento quanto a redução da resistência do FRP em função do raio de curvatura R dos cantos da seção transversal (Equação 2.23).

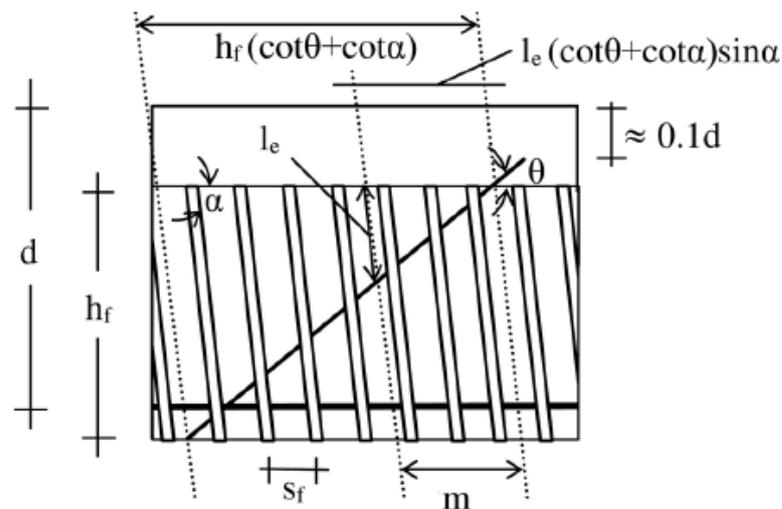
$$f_{fwd} = f_{fwd,c} = k_r \cdot a_t \cdot f_{fd} \quad (2.22)$$

$$k_r = \begin{cases} 0,5 \frac{R}{50} \left(2 - \frac{R}{50} \right) & R < 50mm \\ 0,5 & R \geq 50mm \end{cases} \quad (2.23)$$

- (b) Três lados reforçados com FRP: a tensão f_{fwd} é determinada conforme a Equação 2.24, em que $f_{fwd,c}$ é a tensão no FRP assumindo o encamisamento completo e f_{fbwd} é a tensão de aderência do FRP calculada em função de relações geométricas representadas na Figura 2.21.

$$f_{fwd} = \min(f_{fbwd}, f_{fwd,c}) \quad (2.24)$$

Figura 2.21: Faixas de FRP interceptadas por fissura de cisalhamento



Fonte: FIB *Bulletin* 90 (2019)

- Para $h_f / \sin \alpha \geq l_e$ e $l_e \leq s_f / (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \leq h_f / \sin \alpha$, ou seja, se todas as faixas de FRP apresentarem comprimento de ancoragem $\geq l_e$, f_{fbwd} é calculada pela Equação 2.25, em que f_{fbk} é o valor característico da resistência à aderência do FRP (Equação 2.26) e l_e é o comprimento de ancoragem calculado conforme a Equação 2.27.

$$f_{fbwd} = \frac{f_{fbk}}{\gamma_{fb}} \quad (2.25)$$

$$f_{fbk} = \sqrt{\frac{E_f \cdot s_{0k} \cdot \tau_{b1k}}{t_f}} \quad (2.26)$$

$$l_e = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{E_f \cdot s_{0k} \cdot t_f}{\tau_{b1k}}} \quad (2.27)$$

Na Equação 2.26 e 2.27, os valores característicos para s_{0k} e τ_{b1k} são os apresentados na Tabela 2.2.

- Para $h_f / \sin \alpha \geq l_e$ e $s_f / (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \leq l_e$, ou seja, se algumas das faixas de FRP apresentarem comprimento de ancoragem $\geq l_e$ e outras $< l_e$, f_{fbwd} é calculada pela Equação 2.28.

$$f_{fbwd} = \left[1 - \left(1 - \frac{2ms_f}{3l_e} \right) \frac{m}{n} \right] \frac{f_{fbk}}{\gamma_{fb}} \quad (2.28)$$

- Para $h_f / \sin \alpha \leq l_e$ e $s_f / (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \leq h_f / \sin \alpha$, ou seja, se todas as faixas de FRP apresentarem comprimento de ancoragem $< l_e$, f_{fbwd} é calculada pela Equação 2.29.

$$f_{fbwd} = \frac{2}{3} \frac{(ns_f) / [(\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha]}{l_e} \frac{f_{fbk}}{\gamma_{fb}} \quad (2.29)$$

Nas Equações 2.28 e 2.29, n é o número de faixas de FRP interceptadas pela fissura de cisalhamento e m é o número de faixas de FRP com comprimento de ancoragem inferior a l_e .

- (c) Dois lados paralelos reforçados com FRP: esse esquema de reforço deve ser evitado segundo a FIB *Bulletin* 90 (2019).

2.2.2.3 Confinamento

O encamisamento de pilares de concreto armado com mantas ou faixas de FRP pode ser empregado para promover o confinamento do concreto, o que aumenta a sua capacidade de carga axial. As fibras do FRP alinhadas em sentido circunferencial ao entorno da seção transversal de concreto resistem à tendência de expansão lateral do concreto comprimido, resultando em tensões de confinamento, retardando a fissuração e aumentando a resistência à compressão e a deformação última do concreto (FIB *Bulletin* 90, 2019).

O modelo constitutivo para o concreto confinado com FRP empregado pela FIB *Bulletin* 90 (2019) também é o proposto por Lam e Teng (2003).

A resistência à compressão e a deformação última do concreto confinado com FRP dependem diretamente da rigidez e da deformação última do FRP. A tensão de projeto do FRP na direção circunferencial $f_{fd,h}$ é calculada pela Equação 2.30, em que $\varepsilon_{fu,h}$ é a deformação última do FRP na direção circunferencial (FIB *Bulletin* 90, 2019).

$$f_{fd,h} = E_f \cdot \varepsilon_{fu,h} \quad (2.30)$$

A deformação última do FRP na direção circunferencial depende de inúmeros fatores, dentre eles as ações ambientais (temperatura e umidade) no caso do FRP diretamente exposto a essas condições. Assim, $\varepsilon_{fu,h}$ pode ser calculado conforme a Equação 2.31, em que η_h é o fator de redução, função do raio R do pilar de concreto confinado (Equação 2.32).

$$\varepsilon_{fu,h} = \eta_h \cdot \varepsilon_{fu} = \eta_h \cdot \frac{f_{fd}}{E_f} \quad (2.31)$$

$$\eta_h = \begin{cases} 0,5 \frac{R}{50} \left(2 - \frac{R}{50} \right) & R < 50mm \\ 0,5 & R \geq 50mm \end{cases} \quad (2.32)$$

2.2.3 ACI 440.9R (2015)

O ACI 440.9R (2015) é um manual que trata dos procedimentos para avaliação da durabilidade de compósitos de FRP empregados como reforço externo ou interno de estruturas de concreto.

O objetivo do manual é definir protocolos de acondicionamento acelerados (*ACPs - Accelerated Conditioning Protocols*, em língua inglesa) em combinação com métodos de ensaio mecânicos padronizados.

Os protocolos de acondicionamento acelerados têm por objetivo acelerar a degradação das propriedades mecânicas de barras, mantas e laminados de FRP.

Os ambientes de exposição propostos pela norma são (ACI 440.9R, 2015):

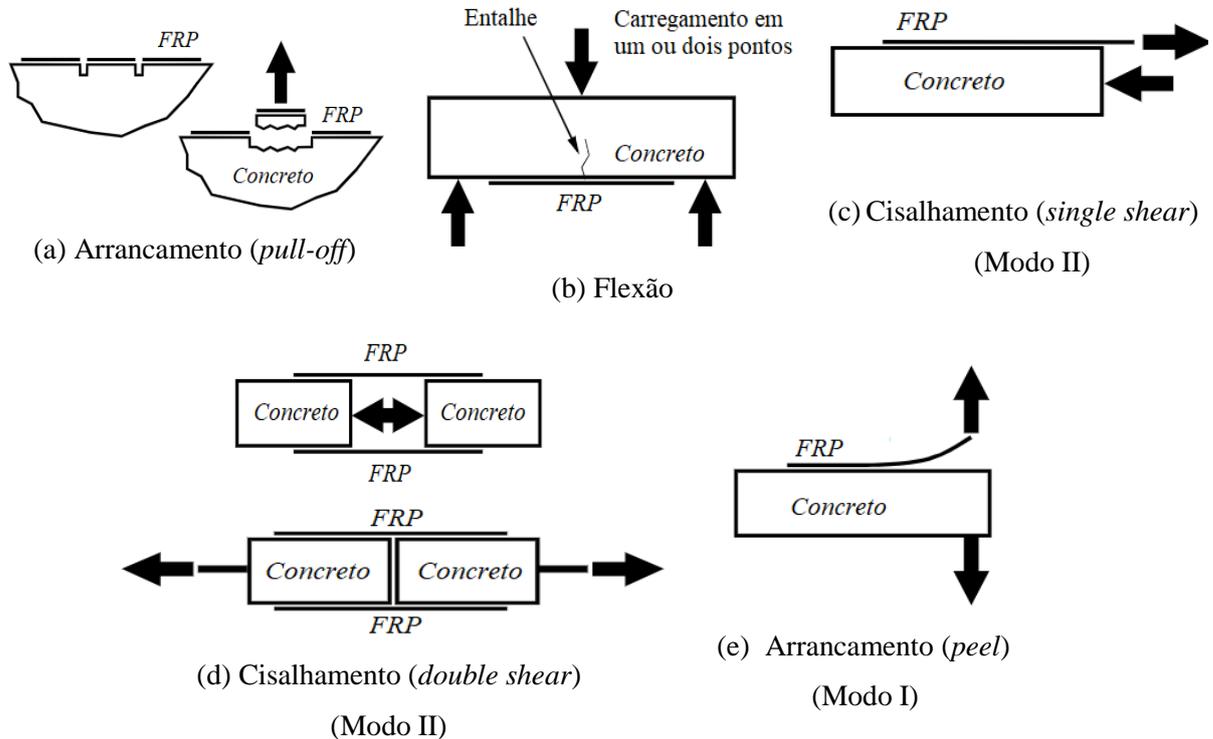
- (a) Ambiente laboratorial (referência): ambiente laboratorial de referência, em que a temperatura e umidade relativa são de $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ e $50\% \pm 10\%$, respectivamente;
- (b) Imersão em água: imersão contínua em água potável com temperatura de $50^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$;
- (c) Exposição à umidade: exposição contínua à umidade de 100% com temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$;
- (d) Imersão em solução alcalina: imersão contínua em solução alcalina com temperatura de $50^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.

Especificamente para os sistemas de reforço externo com FRP o ACI 440.9R (2015) propõe que as propriedades mecânicas dos compósitos de FRP e da aderência FRP-concreto sejam analisadas após 3000 horas de imersão em água à temperatura de $50^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.

O ACI 440.9R (2015) propõe que a aderência FRP-concreto deve ser avaliada por meio de ensaios de flexão à três pontos e arrancamento direto (*pull-off*). Além disso, os compósitos laminados de FRP também devem ser ensaiados à tração.

Com relação aos métodos de ensaio mecânicos para avaliação da aderência FRP-concreto, um resumo dos principais ensaios propostos pela literatura é indicado na Figura 2.22 a seguir.

Figura 2.22: Métodos para ensaio da aderência FRP-concreto



Fonte: Gartner *et al.* (2011)

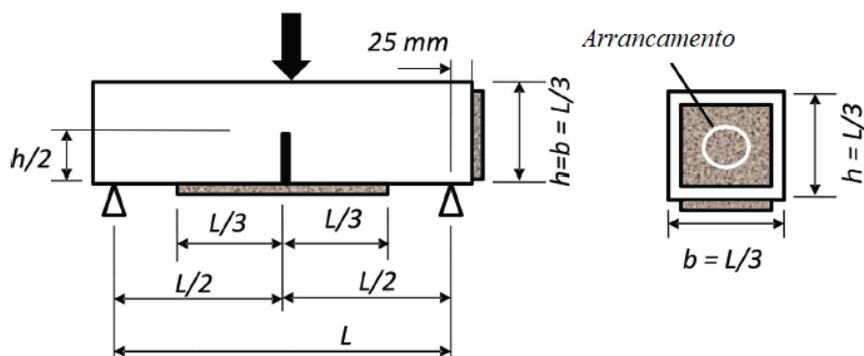
O ensaio de arrancamento (*pull-off*), Figura 2.21 (a), é um ensaio padronizado conforme a ASTM D7522/D7522M (2021), sendo um dos métodos de ensaio mais comuns para avaliação da aderência FRP-concreto. Consiste na colagem de um disco metálico na superfície do FRP; uma serra copo é então empregada para fazer um furo ao entorno do disco e uma força de tração é aplicada para arrancá-lo da superfície de concreto. Apesar da facilidade e ampla utilização do ensaio, é necessário destacar que em campo, nas aplicações em elementos estruturais reais, as tensões entre o FRP e o concreto são transferidas principalmente por cisalhamento e não por tração (GARTNER *et al.*, 2011; MUKHTAR; FAYSAL, 2018).

Os ensaios de flexão em vigas carregadas em um ou dois pontos, Figura 2.21 (b), também são comumente encontrados na literatura. Consiste em uma viga de concreto reforçada à flexão com mantas ou laminados de FRP e aplicação de carregamento de modo a causar flexão até a falha do elemento reforçado. Como vantagens desse procedimento de ensaio, destaca-se que vigas dos mais diversos tamanhos e configurações podem ser ensaiadas, entretanto, como desvantagem é necessário destacar que na interface FRP-concreto, quando a viga é ensaiada à flexão, atuam simultaneamente tensões de cisalhamento e de compressão normal na interface FRP-concreto (GARTNER *et al.*, 2011; MUKHTAR; FAYSAL, 2018).

Os ensaios de cisalhamento, Figura 2.21 (c) e (d), são empregados para avaliação da resistência ao cisalhamento e Modo II de energia de fratura da interface FRP-concreto. Os ensaios consistem em aplicação de força de tração nas mantas ou laminados de FRP aderidos em um (*single*) ou então dois lados simétricos (*double*) de um bloco de concreto. Apesar de serem úteis na obtenção da energia de fratura, apresentam algumas desvantagens associadas à dificuldade em manter a simetria e alinhamento dos aparatos e modelos de ensaio (GARTNER *et al.*, 2011; MUKHTAR; FAYSAL, 2018).

O ensaio de flexão a três pontos recomendado pela norma se baseia na pesquisa realizada por Gartner *et al.* (2011), os autores propuseram um esquema de ensaio similar ao ensaio para obtenção da resistência à flexão de prismas de concreto já padronizado pela ASTM C78/C78M (2010), com a diferença que os prismas reforçados devem apresentar um entalhe na região central, onde haverá um único ponto de aplicação de força. A Figura 2.23 ilustra o esquema de ensaio proposto.

Figura 2.23: Ensaio de flexão a três pontos



Fonte: ACI 440.9R (2015)

Os prismas devem ter dimensões 350 mm x 100 mm x 100 mm, com vão livre de 300 mm e entalhe central com profundidade de 50 mm. A manta ou laminado de FRP a ser aderida na face inferior do prisma consiste em uma única camada com largura de 25 mm e 200 mm de comprimento. O concreto deve apresentar resistência entre 46 e 60 MPa, de maneira a garantir que o modo de falha antes da exposição ao protocolo de condicionamento acelerado seja adesivo, dessa forma é possível identificar a degradação da aderência do adesivo e evitar modos de falha caracterizados pela ruptura ao cisalhamento (ACI 440.9R, 2015).

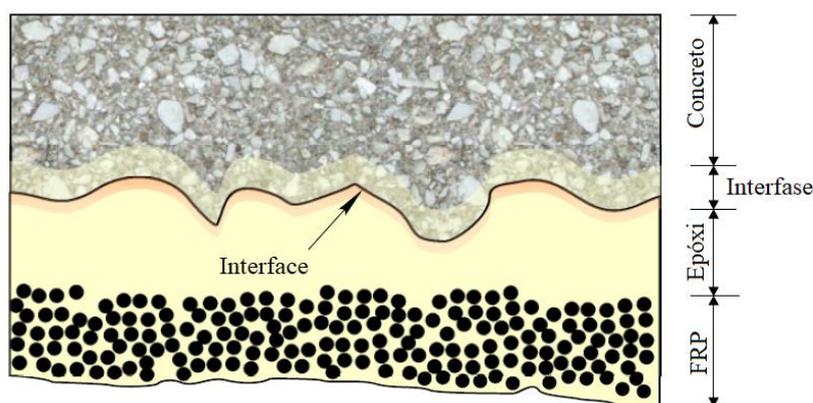
Por fim o manual destaca que têm como objetivo incentivar fabricantes e pesquisadores a empregar procedimentos de ensaio comuns, gerando assim um banco de dados consistente de resultados de degradação do FRP. Dessa forma, futuramente, quando a correlação entre o

comportamento do material a partir do acondicionamento acelerado e em campo for melhor entendida, os resultados podem ser empregados para atualizar o fator de redução ambiental C_E (ACI 440.9R, 2015).

2.3 Estado da arte da durabilidade dos sistemas de reforço EBR-FRP

O sistema de reforço EBR-FRP é um sistema complexo composto de três materiais constituintes e suas respectivas interfases. Conforme ilustra a Figura 2.24 o sistema de reforço é constituído de compósito de FRP, adesivo epóxi e substrato de concreto. Além das fases principais, devido à porosidade do substrato de concreto, uma região de interfase (região de transição) é formada entre o substrato de concreto e a camada de adesivo; entre as fibras e a matriz polimérica, também existe uma região de interfase (TATAR; MILEV, 2021).

Figura 2.24: Representação de uma seção transversal de concreto reforçado pela técnica EBR-FRP



Fonte: Tatar e Milev (2021)

Tatar e Milev (2021) destacam que o problema da durabilidade frente às ações ambientais do sistema EBR-FRP requer análises tanto do material quanto do sistema, tendo em vista que qualquer fator ou condição que leve à alteração das propriedades físicas e mecânicas do FRP, do concreto, do adesivo epóxi ou das interfases afeta o comportamento do sistema EBR-FRP como um todo.

A seguir são apresentadas algumas pesquisas que tiveram por objetivo avaliar o comportamento de elementos e estruturas de concreto externamente reforçadas com FRP quando expostas aos diversos fatores e condições ambientais.

2.3.1 Degradação de elementos de concreto confinados com FRP

Micelli e Myers (2008) avaliaram o comportamento de corpos de prova de concreto reforçados com compósitos de CFRP e GFRP quando expostos a ciclos de envelhecimento acelerado e quando imersos em solução salina (NaCl).

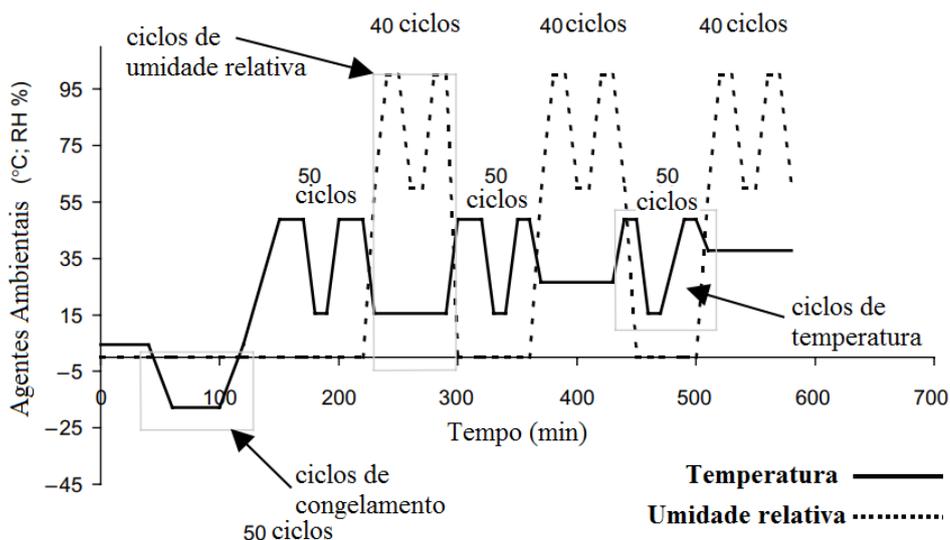
Trinta e dois cilindros de concreto foram moldados com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura com concreto apresentando resistência à compressão de 37 e 32 MPa. Vinte e quatro destes cilindros foram reforçados com uma camada de tecido unidirecional de CFRP (300g/m², resistência à tração de 4,1GPa e módulo de elasticidade de 226GPa) e tecido unidirecional de GFRP (600g/m², resistência à tração de 1,6GPa e módulo de elasticidade de 74GPa) laminados *in-situ* com resina epoxídica.

Os cilindros moldados com concreto apresentando 37 MPa de resistência à compressão foram reforçados com os compósitos de CFRP e os com concreto apresentando 32 MPa de resistência foram reforçados com GFRP.

Os corpos de prova foram então expostos aos seguintes ambientes:

- Ambiente interno (22°C de temperatura e 40% de umidade relativa);
- Imersão em solução salina (15% de NaCl a 21°C) por 2880 horas;
- 4 ciclos de envelhecimento acelerado, conforme indica a Figura 2.25.

Figura 2.25: Ciclos de envelhecimento acelerados



Fonte: Micelli e Myers (2008)

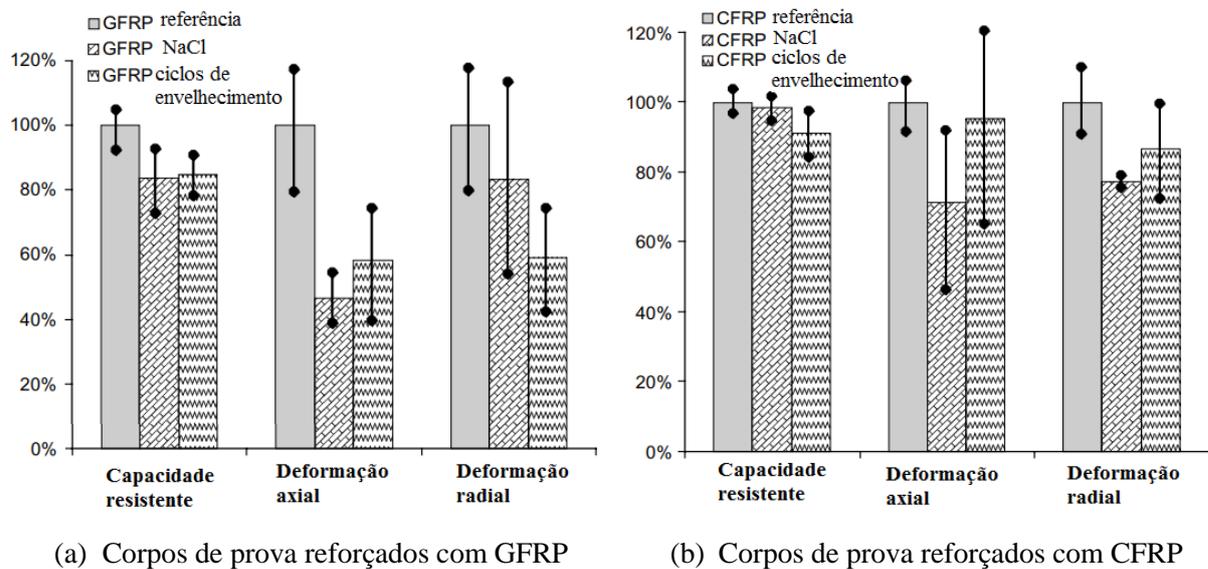
Cada ciclo de envelhecimento foi composto por 50 ciclos de congelamento com temperaturas variando de -18°C a 4°C, 150 ciclos de temperatura (variando de 16°C a 49°C)

em conjunto com exposição à radiação UV e 120 ciclos de umidade relativa (variando de 60% a 100%).

Ao final da exposição os cilindros foram mantidos em uma câmara com temperatura de 30°C por 2 dias e então ensaiados à compressão uniaxial. Os cilindros foram instrumentados com extensômetros axiais e radiais para a determinação das deformações.

A Figura 2.26 apresenta as propriedades mecânicas residuais para os cilindros reforçados com CFRP e GFRP quando expostos em diferentes ambientes.

Figura 2.26: Propriedades mecânicas residuais para os corpos de prova confinados com CFRP e GFRP



Fonte: Micelli e Myers (2008)

Os resultados dos ensaios de compressão dos cilindros reforçados com GFRP indicaram reduções de 17% e 15% em sua capacidade resistente quando expostos a solução salina e ciclos de envelhecimento, respectivamente. Já os corpos de prova reforçados com CFRP não apresentaram modificação em sua capacidade resistente após a exposição a ciclos de envelhecimento e solução salina (MICELLI; MYERS, 2008).

Com base nas deformações obtidas pelos extensômetros, observou-se significativa redução nas deformações axiais e radiais dos cilindros reforçados com GFRP, 54% e 17% de redução na deformação axial e radial dos cilindros mantidos em solução salina e 42% e 41% de redução na deformação axial e radial dos cilindros expostos a ciclos de envelhecimento (MICELLI; MYERS, 2008).

Os cilindros reforçados com CFRP também apresentaram redução em suas deformações, destacando-se reduções de 28% e 23% na deformação axial e radial dos cilindros

mantidos em solução salina e 5% e 13% na deformação axial e radial dos cilindros expostos a ciclos de envelhecimento (MICELLI; MYERS, 2008).

De acordo com a pesquisa, no caso de confinamento de pilares circulares ou quadrados com FRP, nos quais as propriedades mecânicas da fibra e não da aderência FRP-concreto determinam o modo de falha, o emprego de coeficientes de redução das propriedades mecânicas do FRP no dimensionamento do reforço garante a segurança a longo-prazo dos pilares reforçados, mesmo quando expostos a ambientes agressivos (MICELLI; MYERS, 2008).

Os autores ainda afirmam que os coeficientes de exposição ambiental propostos pelo ACI 440.2R (2017) geram resultados conservadores quando comparados com resultados experimentais obtidos na literatura (MICELLI; MYERS, 2008).

Pesquisa de Xie *et al.* (2017) teve por objetivo avaliar o efeito da exposição natural a ambiente quente e úmido em cilindros de concreto confinados com CFRP.

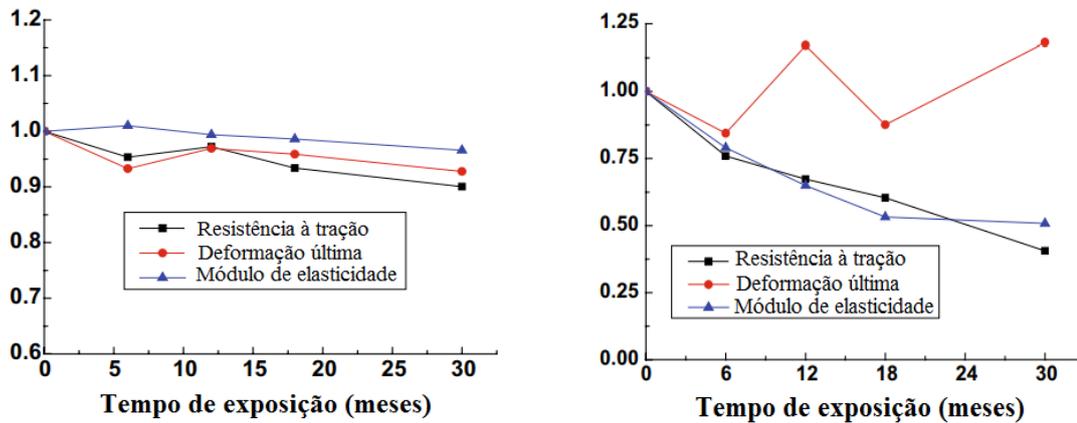
Para isso os autores avaliaram as propriedades mecânicas residuais tanto de corpos de prova de CFRP e de resina epóxi quanto de cilindros de concreto reforçados por confinamento com CFRP após 30 meses de exposição natural a um ambiente subtropical da Coreia do Sul.

Com relação ao comportamento isolado dos materiais constituintes do sistema de reforço, trinta e cinco corpos de prova de CFRP unidirecional laminado *in-situ* (4,6 GPa de resistência à tração e 232 GPa de módulo de elasticidade) e trinta e cinco corpos de prova de resina epóxi (36 MPa de resistência à tração e 2,5 GPa de módulo de elasticidade) foram ensaiados à tração após 30 meses de exposição ambiental.

Os resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova de CFRP indicam redução de 10% na resistência à tração e 7% na deformação última após os 30 meses de exposição ambiental, entretanto não foi constatada nenhuma modificação no módulo de elasticidade. Para os corpos de prova de resina epóxi, os resultados dos ensaios de tração indicam redução de 59% na resistência à tração e 49% no módulo de elasticidade após os 30 meses de exposição ambiental (XIE *et al.*, 2017).

A Figura 2.27 ilustra, em porcentagem, as propriedades mecânicas residuais referentes aos ensaios de tração dos corpos de prova de resina epóxi e CFRP.

Figura 2.27: Propriedades mecânicas residuais para os corpos de prova de CFRP e resina epóxi



(a) Para os corpos de prova de CFRP

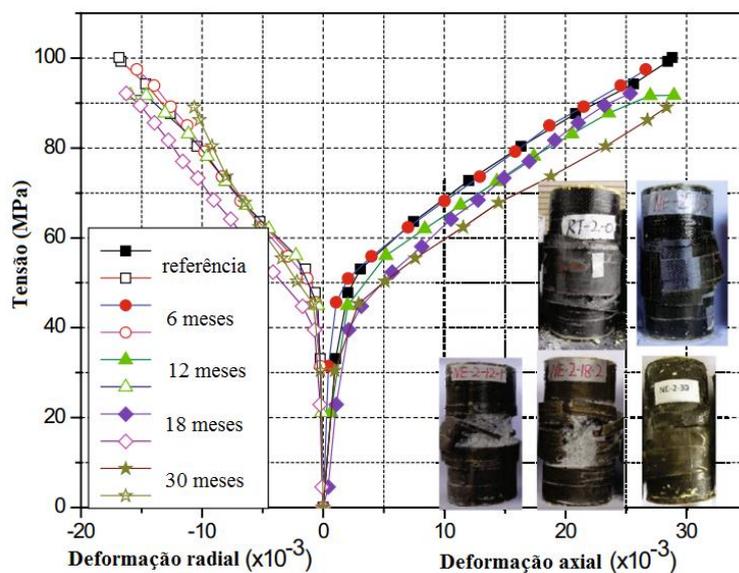
(b) Para os corpos de prova de resina epóxi

Fonte: Xie *et al.* (2017)

Para avaliar o comportamento dos corpos de prova de concreto confinados com CFRP quando expostos ao intemperismo, sessenta cilindros de concreto com dimensões 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura foram moldados com concreto apresentando 47 MPa de resistência à compressão e divididos em quatro grupos, o primeiro grupo, de referência não apresentou reforço, já os demais grupos foram encamisados com 1, 2 e 3 camadas de CFRP com resina epóxi (XIE *et al.*, 2017).

Ao final dos 30 meses de exposição os cilindros de concreto foram ensaiados à compressão uniaxial. A Figura 2.28 apresenta as curvas tensão *versus* deformação para os corpos de prova confinados com 2 camadas de CFRP.

Figura 2.28: Curvas tensão *versus* deformação para os cilindros de concreto reforçados com 2 camadas de CFRP



Fonte: Xie *et al.* (2017)

Ao final do período de exposição, os cilindros reforçados com 1, 2 e 3 camadas de CFRP apresentaram redução de 14%, 10% e 10%, respectivamente. Foi possível concluir, portanto, que a redução da capacidade resistente dos cilindros reforçados foi próxima da redução observada para a resistência à tração do CFRP (10%), o que resulta, segundo os autores, em um coeficiente de redução da resistência à tração do CFRP de 0,9 (XIE *et al.*, 2017).

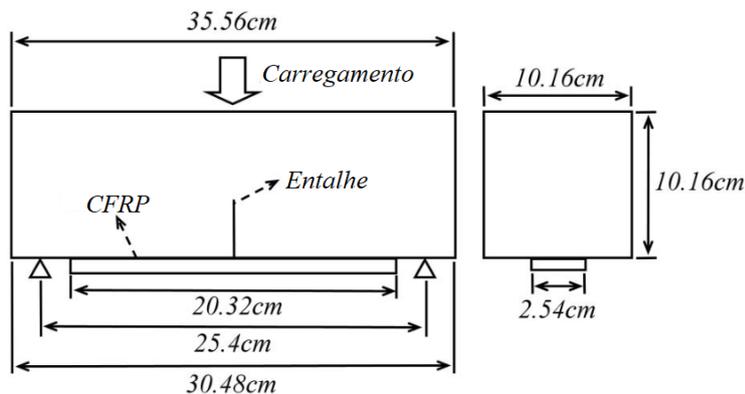
Com relação às deformações axiais e radiais dos corpos de prova, observou-se, após 12 meses de exposição, redução das deformações radiais com o aumento do tempo de exposição. Após 30 meses de exposição foram constatadas reduções de 12%, 25% e 15% nas deformações radiais dos corpos de prova reforçados com 1, 2 e 3 camadas de CFRP, respectivamente (XIE *et al.*, 2017).

Os autores determinaram ao final do estudo o coeficiente de 0,65 para redução da deformação última do CFRP quando aplicado no confinamento de elementos de concreto expostos ao ambiente analisado (XIE *et al.*, 2017).

2.3.2 Degradação da aderência FRP-concreto

Pesquisa realizada por Choi *et al.* (2012) teve por objetivo avaliar o comportamento da aderência FRP-concreto para diferentes sistemas de reforço em FRP sob variadas condições de exposição. Duzentos e vinte e nove corpos de prova de concreto foram preparados de acordo com as dimensões e procedimentos de ensaio proposto por Gartner *et al.* (2011), conforme ilustra a Figura 2.29.

Figura 2.29: Dimensões e esquema de ensaio dos corpos de prova



Fonte: Choi *et al.* (2012)

Após os 28 dias, os prismas (moldados com concreto de 117 MPa de resistência à compressão) passaram por um tratamento superficial utilizando jato de areia e foram reforçados

com cinco diferentes sistemas de reforço em CFRP comercialmente disponíveis nos Estados Unidos.

O sistema C consistiu em um laminado pré-fabricado de CFRP unidirecional (2,8 GPa de resistência à tração e 165 GPa de módulo de elasticidade) colado por meio de um adesivo epoxídico (25 MPa de resistência à tração e 4 GPa de módulo de elasticidade) ao substrato de concreto; os sistemas A, B, D e E consistiram em mantas laminadas *in-situ*.

Para o sistema A, o tecido unidirecional de fibra de carbono (3,8 GPa de resistência à tração e 234 GPa de módulo de elasticidade) foi saturado e aderido à superfície do concreto com resina epóxi (55 MPa de resistência à tração e 1,7 GPa de módulo de elasticidade) e finalizado com a aplicação de um revestimento para promover a proteção contra radiação UV, sais, cloretos e dióxido de carbono.

Para o sistema B, a superfície de concreto recebeu um tratamento com dois tipos de resina epóxi (17 MPa de resistência à tração e 0,7 GPa de módulo de elasticidade; 15 MPa de resistência à tração e 1,8 GPa de módulo de elasticidade) a fim reduzir os defeitos e irregularidades de sua superfície; na sequência, o tecido unidirecional de fibra de carbono (3,8 GPa de resistência à tração e 228 GPa de módulo de elasticidade) foi saturado e aderido à superfície com resina epóxi (55 MPa de resistência à tração e 3 GPa de módulo de elasticidade) e finalizado com a aplicação de uma camada de revestimento para proteção contra radiação UV.

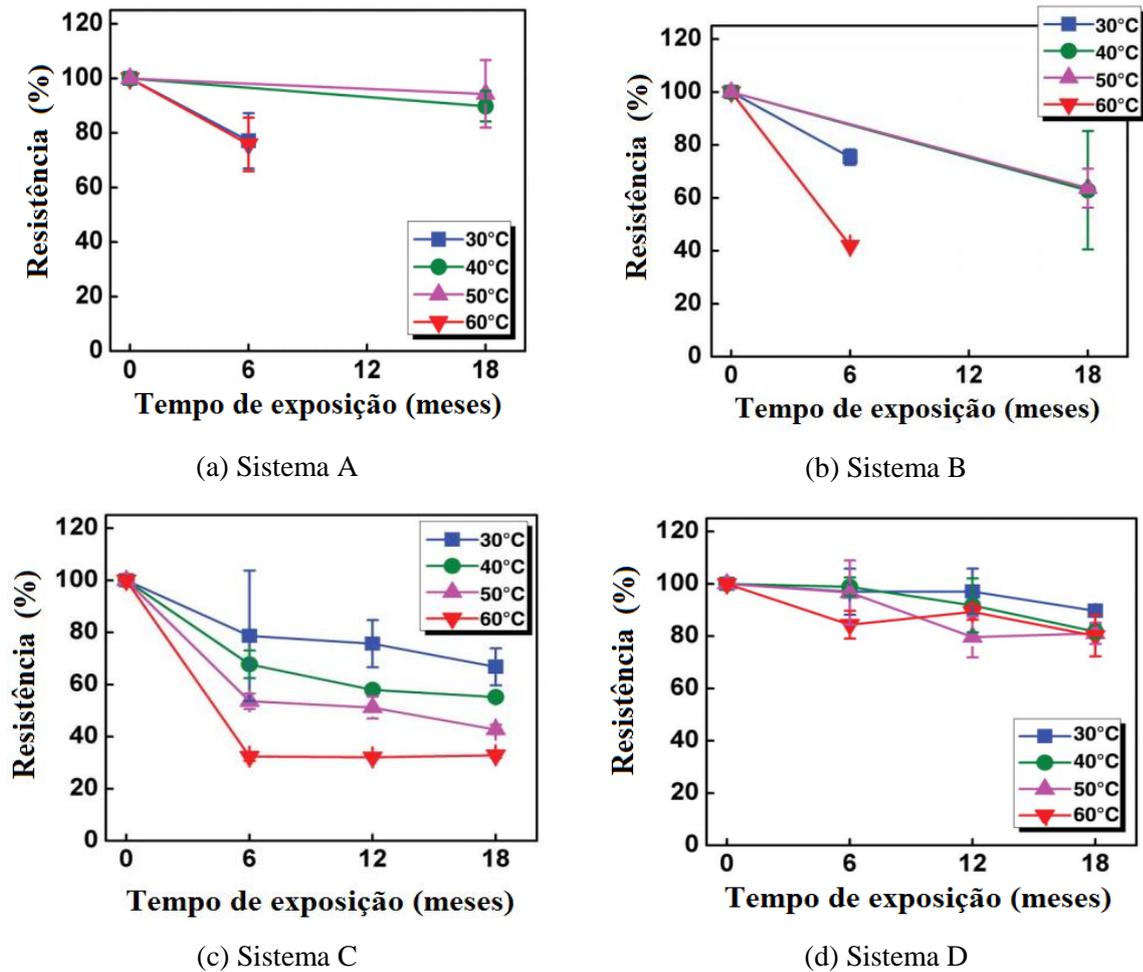
Para os sistemas D e E, o tecido unidirecional de fibra de carbono (3,8 GPa de resistência à tração e 228 GPa de módulo de elasticidade) foi saturado e aderido à superfície de concreto com resina epóxi (35 MPa de resistência à tração e 2,4 GPa de módulo de elasticidade), entretanto, para o sistema E, a mistura empregada entre os dois componentes da resina epóxi foi diferente da proporção estabelecida pelo fabricante.

Após reforçados, os corpos de prova foram expostos por 18 meses às seguintes condições:

- a) Imersão em água com temperaturas de 30°C, 40°C e 50°C;
- b) Imersão em solução alcalina com temperatura de 50°C;
- c) Imersão em solução de cloretos com temperatura de 50°C;
- d) Ciclos de exposição à radiação UV e água com temperaturas de 50°C;
- e) Exposição natural à água salgada.

Ao final do período de exposição os corpos de prova foram ensaiados à flexão por meio de flexão a três pontos. A Figura 2.30 apresenta a capacidade de carga residual para os sistemas de reforço A, B, C e D quando imerso em água com diferentes temperaturas.

Figura 2.30: Redução da capacidade de carga para cada sistema de reforço



Fonte: Choi *et al.* (2012)

É possível observar que após 6 meses de exposição em água, os corpos de prova reforçados com os sistemas A, B e C apresentaram redução de cerca de 20% em suas capacidades resistentes quando mantidos a uma temperatura de 30°C, enquanto o sistema D não apresentou redução significativa em sua capacidade resistente para as mesmas condições. Aumentando o tempo de exposição para 18 meses, a capacidade resistente dos corpos de prova reforçados com os sistemas B, C e D apresentaram redução de 37%, 45% e 13%, respectivamente, após serem mantidos em água a uma temperatura de 40°C (CHOI *et al.*, 2012).

Da Figura 2.30 ainda é possível constatar que o sistema C (laminado pré-fabricado) foi o que apresentou maior redução na capacidade resistente ao longo do período de exposição, com modo de falha passando de adesivo nos corpos de prova de referência para interlaminar após a degradação (CHOI *et al.*, 2012).

Além disso, ainda é possível destacar que o sistema D apresentou uma menor redução da capacidade resistente quando comparado aos demais. Choi *et al.* (2012) indicam que isso se deve ao fato desse sistema ter passado por um menor período de cura (3 semanas) em comparação com os outros sistemas (16 semanas), nesse caso, a resina epóxi pode ter sofrido um processo de pós-cura quando mantida em água à temperatura elevada, melhorando a sua capacidade de aderência ao substrato de concreto.

Os resultados da pesquisa mostram que o emprego de diferentes resinas epoxídicas resulta em diferentes comportamentos relacionados à durabilidade do sistema de reforço, por exemplo, apesar dos tecidos de fibra de carbono empregados nos sistemas A e B apresentarem propriedades mecânicas similares, o comportamento e durabilidade dos corpos de prova reforçados com cada um destes sistemas de reforço foi diferente por empregarem resinas epoxídicas diferentes (CHOI *et al.*, 2012).

Com relação à exposição a cloretos, os corpos de prova reforçados com os sistemas A, B e C apresentaram redução de 16%, 40% e 71%, respectivamente, em sua capacidade resistente após 12 meses de exposição. Os corpos de prova reforçados com os sistemas A, B e C mantidos em solução alcalina, apresentaram redução em sua capacidade resistente de 18%, 49% e 63%, respectivamente, após 12 meses de exposição (CHOI *et al.*, 2012).

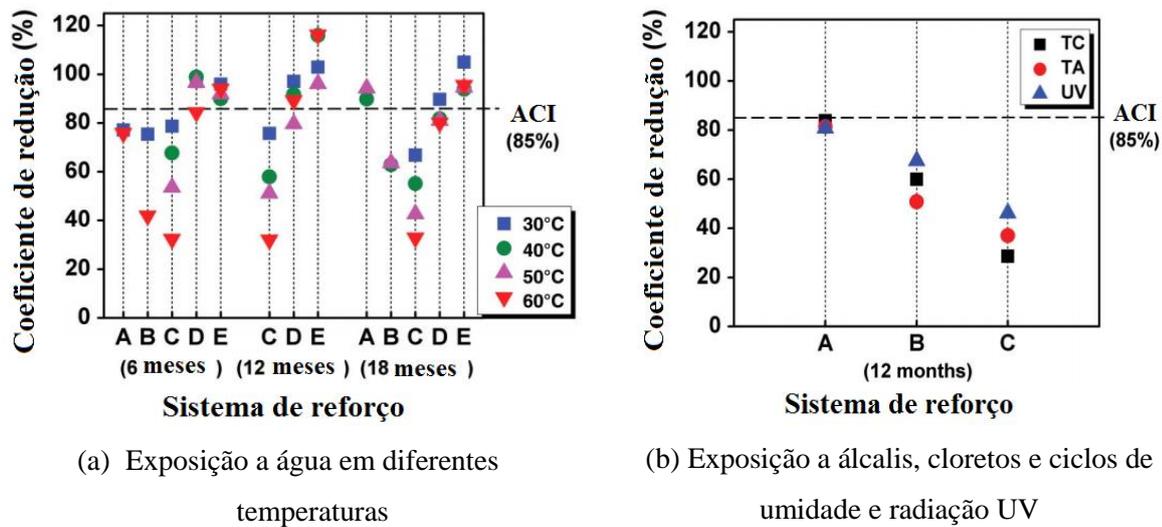
A exposição a ciclos e umidade e radiação UV reduziu em 19%, 32% e 54% a capacidade resistente das vigas reforçadas com os sistemas A, B e C, respectivamente, após 12 meses de exposição (CHOI *et al.*, 2012).

Os autores ainda concluíram que a exposição a cloretos, álcalis e ciclos e umidade e radiação UV causaram maior degradação do que a exposição contínua à água, além disso, a exposição a ciclos de umidade e radiação UV causou maior degradação no CFRP do que a exposição constante a umidade devido à formação de defeitos e fissuras pela radiação UV (CHOI *et al.*, 2012).

A Figura 2.31 traz uma comparação entre o coeficiente de redução ambiental apresentado pelo ACI 440.2R (2017) com os coeficientes obtidos para as diferentes condições de exposição avaliadas.

Pode-se concluir que o coeficiente de redução obtido pela pesquisa para os sistemas de reforço D e E foi cerca de 80%, mesmo após exposição por 18 meses em temperaturas elevadas, valor muito próximo do coeficiente empregado pelo ACI 440.2R (2017), entretanto, o coeficiente de redução obtido para o sistema C variou em torno de 50 a 60% (CHOI *et al.*, 2012).

Figura 2.31: Coeficientes de redução para cada ambiente de exposição



Fonte: Choi *et al.* (2012)

Tatar e Hamilton (2016a) desenvolveram pesquisa com o objetivo de comparar o efeito da exposição natural com o efeito de condições de exposição aceleradas em laboratório (ACPs).

A avaliação do comportamento da aderência FRP-concreto foi obtida por meio de ensaios de flexão em três pontos conforme proposto por Gartner *et al.* (2011) e ensaios de arrancamento (*pull-off*).

Os corpos de prova foram moldados com concreto apresentando resistência à compressão de 70 MPa e reforçados com mantas de CFRP unidirecional (600g/m², 3,8 GPa de resistência à tração e 227 GPa de módulo de elasticidade) laminadas *in-situ* com resina epóxi (55 MPa de resistência à tração e 3 GPa de módulo de elasticidade) e aderidas a uma superfície de concreto regularizada com uma combinação de resinas epoxídicas (17 MPa de resistência à tração e 0,7 GPa de módulo de elasticidade; 15 MPa de resistência à tração e 1,8 GPa de módulo de elasticidade).

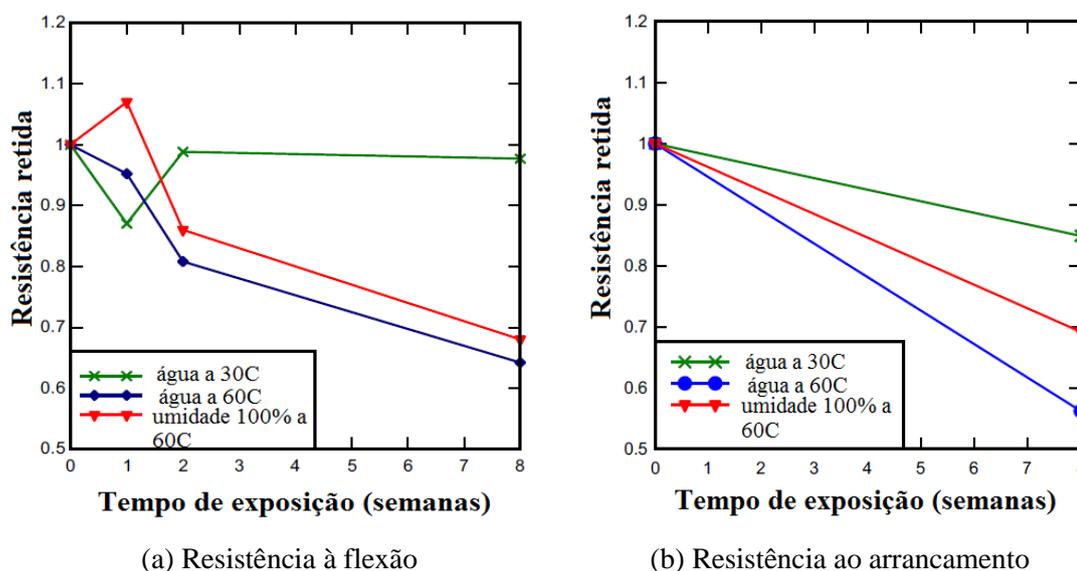
Os corpos de prova reforçados foram então divididos em seis grupos, três expostos a condições controladas em laboratório por 8 semanas e três expostos a condições naturais na *Sunshine Skyway Bridge*, Flórida por 18 meses:

- Exposição laboratorial: imersão em água à 30°C;
- Exposição laboratorial: imersão em água à 60°C;
- Exposição laboratorial: 100% de umidade a uma temperatura de 60°C;
- Exposição natural: exposição à radiação UV sem proteção à radiação UV;
- Exposição natural: exposição à radiação UV com proteção à radiação UV;

f) Exposição natural: sem exposição à radiação UV com proteção à radiação UV.

A Figura 2.32 apresenta os resultados dos ensaios de flexão e arrancamento dos corpos de prova mantidos por 8 semanas em condições de exposição acelerada em laboratório.

Figura 2.32: Resistência retida após ensaio de flexão e arrancamento acelerados em laboratório



Fonte: Tatar e Hamilton (2016a)

Da Figura 2.32 é possível observar, ao final das 8 semanas de exposição, redução de 30% na capacidade de carga à flexão dos corpos de prova mantidos à 60°C, enquanto os que foram mantidos imersos em água à 30°C não apresentaram modificação em sua capacidade de carga. Além disso, foram observadas reduções de 45% e 30% na resistência ao arrancamento dos corpos de prova mantidos imersos em água e a 100% de umidade à 60°C. Os corpos de prova que foram mantidos imersos em água à 30°C apresentaram redução de 15% na resistência ao arrancamento (TATAR; HAMILTON, 2016a)

Os resultados dos ensaios de arrancamento conduzidos nos corpos de prova mantidos em exposição ambiental natural resultaram em ganho de resistência ao arrancamento mesmo após 18 meses de exposição, entretanto estes resultados apresentaram coeficientes de variação elevados, variando de 0,2 a 0,4. Apesar disso, foi observado aumento nas porcentagens de falha adesivas, com 20% e 70% de falha adesiva observada nos corpos de prova expostos ao intemperismo com e sem proteção UV, indicando que a radiação UV contribuiu como fator de degradação da aderência FRP-concreto (TATAR; HAMILTON, 2016a).

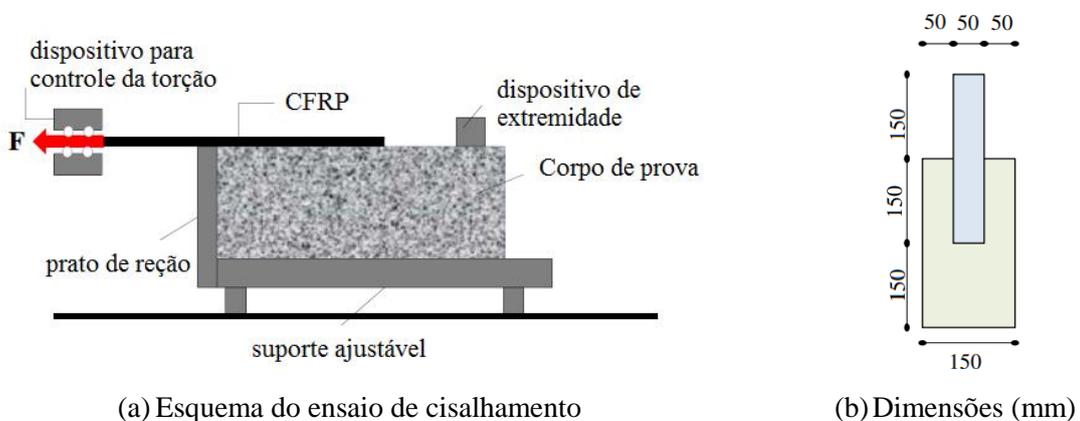
A partir dos resultados dos ensaios de flexão dos corpos de prova mantidos em exposição ambiental natural não foram apontadas reduções na capacidade resistente à flexão,

observando-se uma redução na porcentagem de falha adesiva nos corpos de prova expostos à radiação UV quando em comparação com a porcentagem de falha adesiva observada nos corpos de prova de referência (de 75% para 45% de falha adesiva). Os autores sugerem que o tempo e a exposição ambiental resultaram em melhores condições de cura para estes corpos de prova quando em comparação com os corpos de prova de referência (TATAR; HAMILTON, 2016a).

Ao final os autores concluíram que a exposição a uma temperatura de 60°C produz resultados de durabilidade pessimistas quando em comparação com os resultados obtidos da exposição ambiental por um curto período de tempo (18 meses) embora não seja possível afirmar se os resultados ainda podem ser considerados pessimistas quando em comparação com amostras mantidas por longos períodos de tempo (10 anos) expostas ao meio ambiente (TATAR; HAMILTON, 2016a).

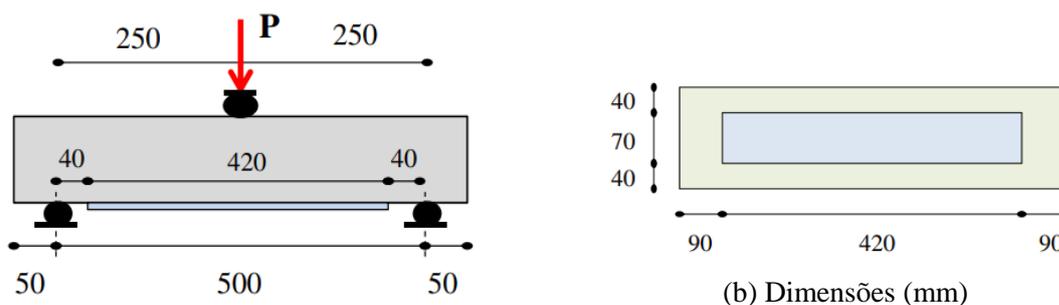
Pesquisa realizada por Ceroni *et al.* (2018) também teve por objetivo avaliar a aderência FRP-concreto por meio de ensaios de cisalhamento entre o FRP e o concreto e flexão em vigas de concreto reforçadas com FRP quando expostas a diferentes ambientes. As Figuras 2.33 e 2.34 representam as dimensões e características dos ensaios desenvolvidos.

Figura 2.33: Dimensões e esquema do ensaio de cisalhamento (*push-pull*)



Fonte: Ceroni *et al.* (2018)

Figura 2.34: Dimensões e esquema do ensaio de flexão



(a) Esquema do ensaio de flexão

Fonte: Ceroni *et al.* (2018)

Após moldados com concreto apresentando resistência à compressão de 33 MPa, os corpos de prova foram reforçados com mantas de fibra de carbono (resistência à tração de 4,4 GPa e módulo de elasticidade de 260 GPa) laminadas *in-situ* e aderidas à superfície de concreto por meio de resina epóxi.

Os corpos de prova reforçados foram mantidos nas seguintes condições de exposição, sendo ao final ensaiados à flexão e ao cisalhamento.

- a) Imersão em água com temperatura de 23°C por 9, 40 e 74 dias;
- b) Imersão em água com temperatura de 30°C por 5 e 74 dias;
- c) Imersão em água com temperatura de 40°C por 4 dias;
- d) Ambiente com 100% de umidade com temperatura de 30°C por 9 dias;
- e) Imersão em água à 30°C por 74 dias e posterior secagem no ar a uma umidade de 50% à temperatura de 23°C por 30 dias.

Para os modelos ensaiados ao cisalhamento, dois modos de falha foram observados: descolamento do reforço com desprendimento do concreto da superfície e descolamento do reforço apresentando falha no adesivo (Figura 2.35). No geral os corpos de prova de referência apresentaram modos de falha caracterizados por desprendimento do concreto superficial, enquanto os corpos de prova mantidos em diferentes condições de exposição passaram a apresentar modos de falha caracterizados pelo descolamento do adesivo (CERONI *et al.*, 2018).

Figura 2.35: Modos de falha dos corpos de prova ensaiados ao cisalhamento



(a) Falha coesiva no concreto

(b) Falha adesiva

Fonte: Ceroni *et al.* (2018)

Com relação aos resultados dos ensaios de cisalhamento, foram constatadas reduções de 38% e 67% na resistência ao cisalhamento dos corpos de prova mantidos por 74 dias imersos em água à 23°C e 30°C, respectivamente. Já os corpos de prova que foram mantidos apenas 4

dias imersos em água à 40°C apresentaram redução de 72% em sua resistência ao cisalhamento (CERONI *et al.*, 2018).

A fim de avaliar a reversibilidade do efeito de degradação da resistência ao cisalhamento, foi analisado o comportamento da aderência FRP-concreto após a imersão em água à 30°C por 74 dias e posterior secagem no ar a uma umidade de 50% à temperatura de 23°C por 30 dias. Os resultados indicam que os corpos de prova expostos a essa condição apresentaram redução de 52% na resistência ao cisalhamento (CERONI *et al.*, 2018).

Para os corpos de prova ensaiados à flexão, três modos de falha foram observados: descolamento do reforço com desprendimento do concreto da superfície, ruptura do FRP e descolamento do reforço apresentando falha no adesivo (Figura 2.36). Assim como observado nos corpos de prova ensaiados ao cisalhamento, os corpos de prova de referência apresentaram modos de falha caracterizados por desprendimento do concreto superficial, enquanto os corpos de prova mantidos em diferentes condições de exposição passaram a apresentar modos de falha caracterizados pelo descolamento do adesivo (CERONI *et al.*, 2018).

Figura 2.36: Modos de falha dos corpos de prova ensaiados à flexão



(a) Falha coesiva no concreto

(b) Falha adesiva

(c) Ruptura do FRP

Fonte: Ceroni *et al.* (2018)

Os resultados dos ensaios de flexão indicam redução de 18% e 45% na capacidade resistente dos corpos de prova mantidos por 74 dias imersos em água à 23°C e 30°C, respectivamente. Os corpos de prova que foram mantidos por 4 dias imersos em água à 40°C apresentaram redução de 26% em sua capacidade resistente à flexão (CERONI *et al.*, 2017).

A análise de reversibilidade do efeito de degradação da resistência à flexão dos corpos resultou em uma redução de 34% na resistência à flexão (CERONI *et al.*, 2018).

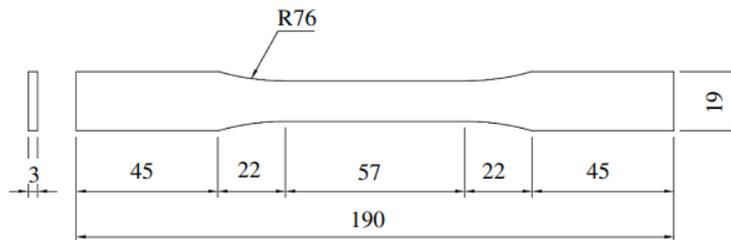
Os autores concluíram, com base nos resultados obtidos, que a aderência FRP-concreto pode ser restituída parcialmente quando as condições ambientais se normalizam, além disso, também foi apontado que o ensaio de cisalhamento se mostrou mais sensível aos efeitos da

degradação ambiental do que os ensaios de flexão (CERONI *et al.*, 2018).

Pesquisa desenvolvida por Chotickai e Somana (2018) teve por objetivo avaliar o comportamento da aderência FRP-concreto quando exposta a ciclos de umidade em água e solução salina. Os autores realizaram tanto ensaios de tração em corpos de prova confeccionados com a resina epóxi empregada no reforço, como ensaios de flexão a três pontos em prismas de concreto reforçados com CFRP.

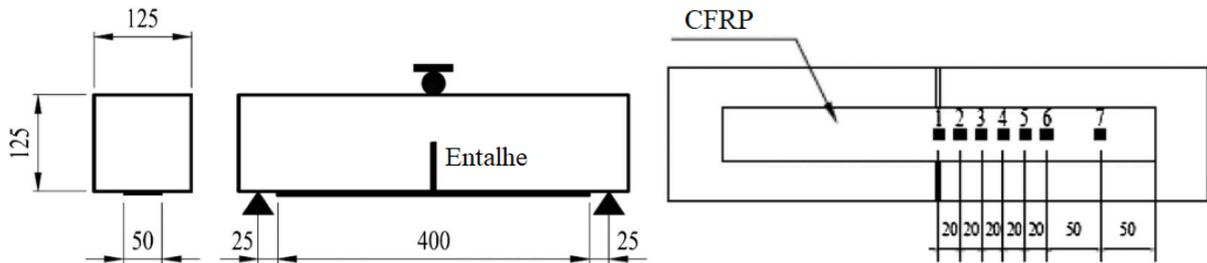
A Figura 2.37 indica as dimensões dos corpos de prova de resina epóxi e a Figura 2.38 apresenta as dimensões e características do ensaio de flexão a três pontos.

Figura 2.37: Dimensão (mm) dos corpos de prova de tração para as resinas



Fonte: Chotickai e Somana (2018)

Figura 2.38: Esquema dos corpos de prova para ensaio de flexão



(a) Dimensões em mm

(b) Distribuição dos extensômetros no CFRP

Fonte: Chotickai e Somana (2018)

Os corpos de prova foram moldados com dois tipos de concreto, o tipo 1 com resistência à compressão de 29 MPa e o tipo 2 com resistência à compressão de 49 MPa e reforçados com uma ou duas camadas de compósito unidirecional de CFRP (4,3 GPa de resistência à tração e 234 GPa de módulo de elasticidade) laminado *in-situ* com resina epóxi (30 MPa de resistência à tração e 4,5 GPa de módulo de elasticidade).

Um total de quinze corpos de prova de resina epóxi e oitenta e quatro prismas de concreto reforçados com CFRP, foram expostos por um período total de 12 meses às seguintes condições:

- a) Ambiente seco controlado em laboratório (referência);

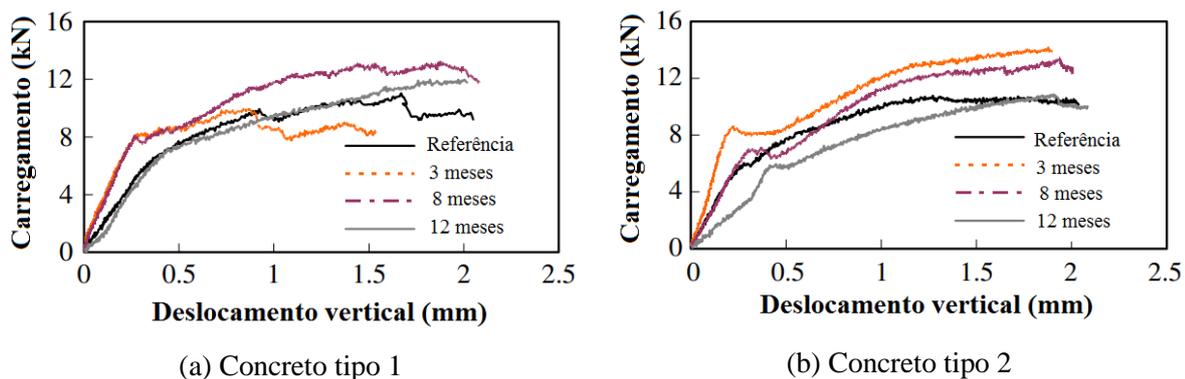
- b) Ciclos em água, 4 dias em água à 25°C-27°C e 3 dias exposto ao ar;
- c) Ciclos em solução salina (3,5% de NaCl), 4 dias em solução à 25°C-27°C e 3 dias exposto ao ar.

Ao final dos 12 meses de exposição, os corpos de prova de resina epóxi foram ensaiados à tração, indicando redução de 25% e 15% na resistência à tração dos corpos de prova que foram mantidos em ciclos com água e solução salina, respectivamente. Da mesma forma, o módulo de elasticidade dos corpos de prova mantidos em ciclos com água e solução salina apresentaram reduções de 5% e 2%, respectivamente (CHOTICKAI; SOMANA, 2018).

Os autores concluíram que as resinas expostas à água apresentaram maior degradação em suas propriedades mecânicas do que as expostas a soluções salinas pois as resinas expostas a soluções salinas absorveram menor quantidade de água (CHOTICKAI; SOMANA, 2018).

A Figura 2.39 apresenta a relação entre a força aplicada e o deslocamento no meio do vão dos prismas de concreto reforçados com uma camada de CFRP expostos a ciclos em água.

Figura 2.39: Curvas força *versus* deslocamento vertical para os prismas de concreto reforçados com CFRP



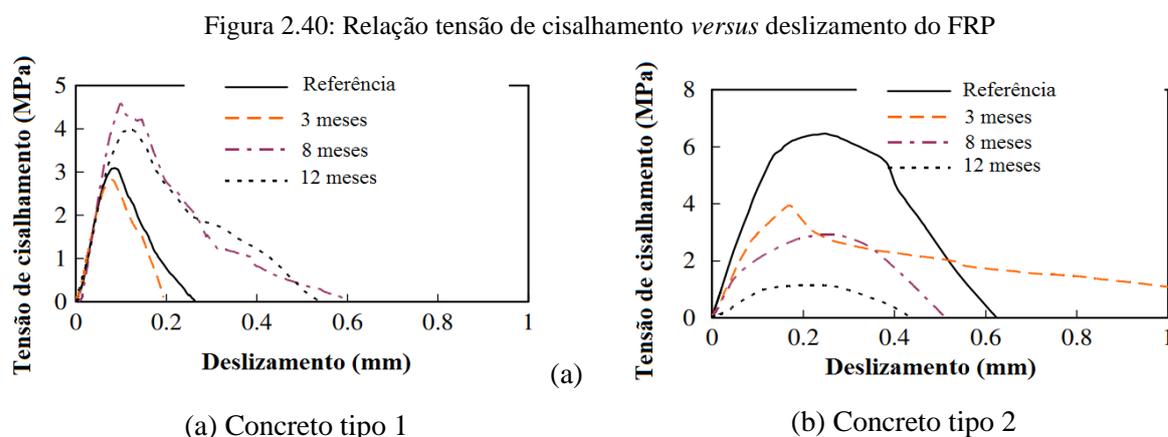
Fonte: Chotickai e Somana (2018)

Com relação aos ensaios de flexão, foram observados modos de falha dominados pelo desprendimento do concreto da superfície para os prismas moldados com o concreto tipo 1 (resistência normal) e modos de falha dominados pelo descolamento do FRP na interface adesivo-concreto para os prismas moldados com concreto do tipo 2 (alta resistência) (CHOTICKAI; SOMANA, 2018).

Os resultados dos ensaios de flexão não indicaram nenhuma mudança significativa na capacidade de carga das vigas reforçadas após a exposição pois o comprimento do CFRP empregado no reforço foi maior do que o comprimento requerido pelo sistema de reforço. Sendo assim, o comprimento extra resistiu às tensões de cisalhamento redistribuídas do meio do vão, região onde a falha teve início (CHOTICKAI; SOMANA, 2018).

Com base nos resultados de deformação obtidos por meio de extensômetros instalados na superfície do CFRP os autores puderam relacionar a tensão de cisalhamento atuando na interface FRP-concreto e o respectivo deslizamento entre o FRP e o concreto. A tensão de cisalhamento é calculada com base nas deformações obtidas em dois extensômetros posicionados no meio do prisma, enquanto o deslizamento é obtido utilizando as deformações obtidas em todos os extensômetros colados no CFRP, conforme ilustra a Figura 2.38 (b).

A Figura 2.40 apresenta os gráficos de tensão de cisalhamento *versus* deslizamento para os corpos de prova de concreto expostos a ciclos em água.



Fonte: Chotickai e Somana (2018)

Da Figura 2.40 pode-se observar que para o concreto do tipo 1, maiores tensões de cisalhamento foram obtidas após 8 meses de exposição, aumento este associado à cura da resina e do concreto com a exposição, entretanto, com o aumento do tempo de exposição e aumento da degradação da interface FRP-concreto, nota-se a redução da tensão de cisalhamento (CHOTICKAI; SOMANA, 2018).

Para os corpos de prova de concreto do tipo 2, a tensão de cisalhamento reduz após 3 meses de exposição, chegando a apresentar, após 12 meses, redução de 82% e 65% na tensão de cisalhamento da interface FRP-concreto quando expostos a ciclos de água e solução salina. Entretanto, para os corpos de prova do tipo 2 reforçados com 2 camadas de CFRP, após 12 meses de exposição a tensão de cisalhamento reduziu apenas 15% e 1% quando expostos a ciclos de água e solução salina (CHOTICKAI; SOMANA, 2018).

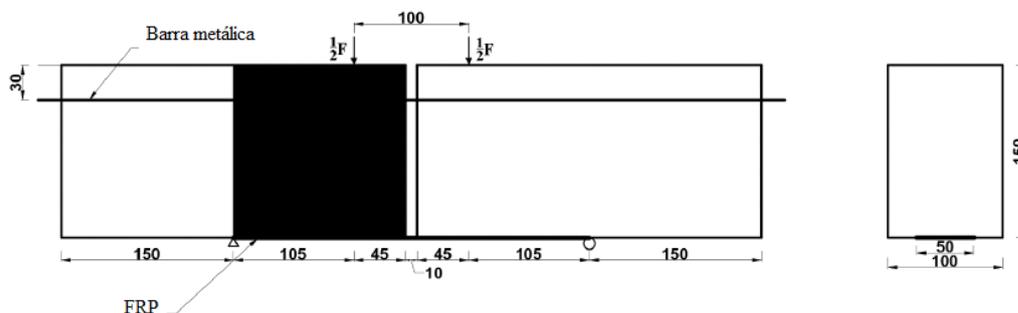
Da curva tensão de cisalhamento *versus* deslizamento fica evidente a degradação da interface FRP-concreto para os corpos de prova moldados com o concreto do tipo 2, apesar disso, a capacidade de carga à flexão dos prismas não foi afetada. Os autores sugerem que o comprimento excessivo de CFRP ou a dispersão dos resultados dos ensaios possa ter camuflado

o efeito da degradação da capacidade de carga à flexão dos corpos de prova reforçados (CHOTICKAI; SOMANA, 2018).

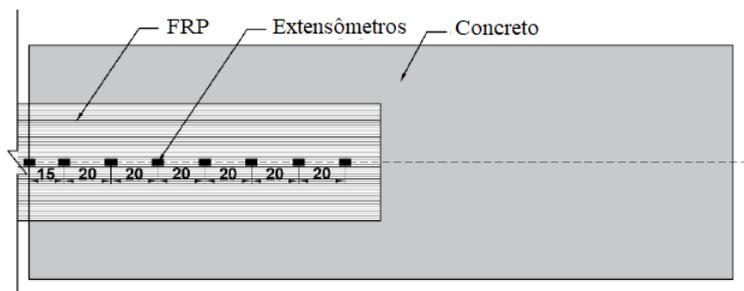
Guo *et al.* (2020) conduziram pesquisa com o objetivo de avaliar o comportamento da interface FRP-concreto quando exposta a clima subtropical chinês, marcado pelo verão quente e chuvoso.

Os autores realizaram ensaios de flexão empregando modelos cujas dimensões e configurações estão indicadas na Figura 2.41. Cada modelo consistia de dois blocos de concreto de 300 mm de comprimento com uma seção transversal de 100 mm por 150 mm, os dois blocos de concreto eram conectados por duas barras metálicas nervuradas de 650 mm de comprimento e 12 mm de diâmetro.

Figura 2.41: Esquema dos corpos de prova ensaiados à flexão (dimensões em mm)



(a) Geometria dos modelos



(b) Distribuição dos extensômetros no FRP

Fonte: Guo *et al.* (2020)

Para a moldagem dos corpos de prova foi empregado concreto com 30,5 MPa de resistência à compressão enquanto para o reforço foram avaliados dois tipos de fibra, CFRP (4,1 GPa de resistência à tração e 231 GPa de módulo de elasticidade) e BFRP (2,1 GPa de resistência à tração e 91 GPa de módulo de elasticidade) laminados *in-situ* com resina epóxi (48 MPa de resistência à tração e 2,4 GPa de módulo de elasticidade).

Os prismas reforçados foram então ensaiados ao final de 180 e 360 dias de exposição. Ao final de 180 dias os prismas reforçados com CFRP e BFRP apresentaram redução de 13,6%

e 26,9% na sua capacidade de carga, respectivamente, mantendo essa taxa de redução ao final dos 360 dias de exposição (GUO *et al.*, 2020).

Com base nas deformações medidas nos extensômetros aderidos à manta de FRP os autores puderam obter a tensão de cisalhamento na interface FRP-concreto. Os prismas de referência, antes da exposição, apresentaram tensão de cisalhamento máxima de 4,26 MPa e 1,94 MPa quando reforçados com CFRP e BFRP, respectivamente. Ao final de 180 dias de exposição foi possível constatar redução de 26,8% e 31,9% na tensão de cisalhamento máxima para os corpos de prova reforçados com CFRP e BFRP, essas taxas de redução na tensão de cisalhamento pouco alteraram ao final dos 360 dias de exposição (redução de 34% e 38% para reforço com CFRP e BFRP) (GUO *et al.*, 2020).

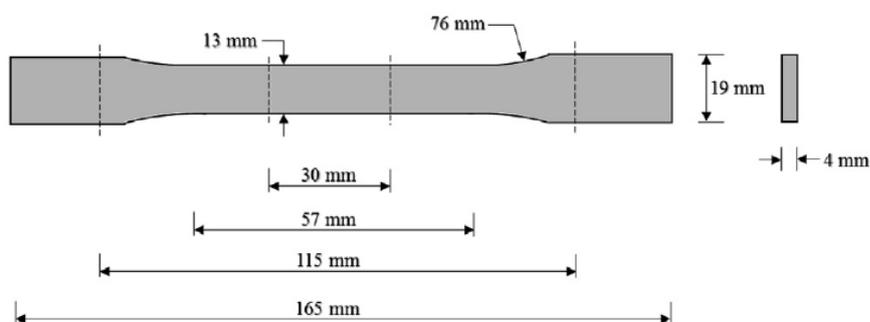
Os autores concluíram que a exposição ao clima subtropical afeta a aderência FRP-concreto, principalmente em períodos iniciais de exposição (180 dias), além disso a interface BFRP-concreto foi mais afetada do que a interface CFRP-concreto (GUO *et al.*, 2020).

Mukhtar e Peiris (2021) avaliaram o efeito de diversas condições de exposição aceleradas na aderência FRP-concreto.

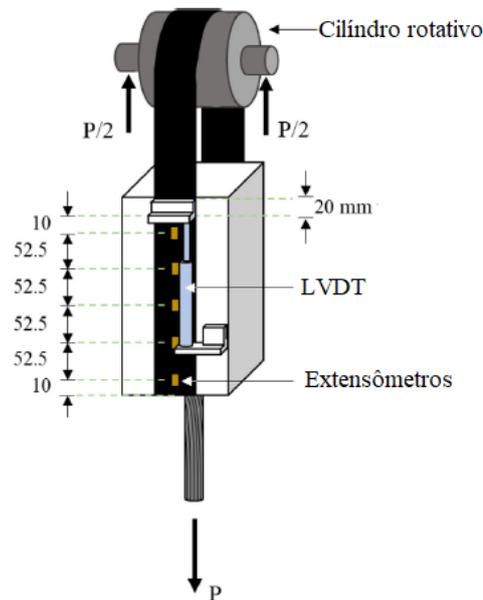
Os autores realizaram tanto ensaios de tração com corpos de prova confeccionados com a resina epóxi empregada no reforço (Figura 2.42), como ensaios de cisalhamento do tipo *double-shear* (Figura 2.43).

Da Figura 2.43 é possível observar o esquema de ensaio de cisalhamento empregado, o modelo consiste em um prisma de concreto com dimensões de 10 cm x 10 cm x 25 cm reforçado em duas faces opostas com faixas de manta de FRP com 5 cm de largura. As duas faixas de FRP são solicitadas ao cisalhamento direto por meio de um cilindro metálico acoplado à máquina de ensaios universais.

Figura 2.42: Dimensões (em mm) dos corpos de prova de resina epóxi para ensaio de tração



Fonte: Mukhtar e Peiris (2021)

Figura 2.43: Dimensões (em mm) e esquema do ensaio de cisalhamento (*double-shear*)

Fonte: Mukhtar e Peiris (2021)

Foram avaliados ainda dois tipos de concreto, um deles empregando agregados convencionais e outro empregando agregados provenientes de escória de alto-forno em substituição aos agregados convencionais; os dois tipos de concreto resultaram em resistência à compressão de 39 MPa e 45 MPa, respectivamente.

Após concretados, os prismas foram reforçados com mantas de fibra de carbono (resistência à tração de 4 GPa e módulo de elasticidade de 230 GPa) laminadas *in-situ* e aderidas à superfície de concreto por meio de resina epóxi (resistência à tração de 30 MPa e módulo de elasticidade de 4,5 GPa).

Os corpos de prova foram mantidos nas seguintes condições de exposição por um período total de 5 semanas:

- Ambiente laboratorial, umidade entre 30 e 40% e temperatura de 25°C;
- Imersão em água com temperatura de 25°C;
- Imersão em água com temperatura de 60°C;
- Câmara climatizada com 10% de umidade e com temperatura de 60°C;
- Forno com temperatura de 100°C e umidade de 0%;
- Ciclos: 2 dias em ambiente laboratorial (umidade entre 30 e 40% e temperatura de 25°C) e dois dias de imersão em água com temperatura de 25°C.

Ao final do período de exposição, os corpos de prova de resina epóxi foram ensaiados à tração e os prismas de concreto reforçados com FRP foram ensaiados ao cisalhamento.

Para os corpos de prova de resina epóxi ensaiados à tração foi observado redução na tensão máxima de tração com o aumento da temperatura de exposição (tanto para as condições de baixa quanto de elevada umidade relativa). Foram observadas reduções de 19%, 23% e 46% para os corpos de prova mantidos a 60°C imersos em água, mantidos a 60°C com umidade relativa de 10% e mantidos a 100°C com umidade de 0%, respectivamente (MUKHTAR; PEIRIS, 2021).

Além disso, para os corpos de prova mantidos em condições com elevada umidade relativa, foi observado redução do módulo de elasticidade (13% e 34% de redução para os mantidos imersos em água à 25°C e 60°C, respectivamente) e aumento da deformação última, enquanto os mantidos em condições com baixa umidade relativa, foi observado aumento do módulo de elasticidade e redução da deformação última (MUKHTAR; PEIRIS, 2021)

Para os prismas de concreto reforçados com FRP mantidos em condição de baixa umidade relativa, foi observado aumento na tensão de aderência com o aumento da temperatura de exposição. Os corpos de prova mantidos em temperatura de 100°C e umidade de 0% apresentaram modo de falha coesivo no concreto, modo de falha similar ao observado para os corpos de prova mantidos em ambiente laboratorial, entretanto, a camada de substrato aderido ao FRP foi bem mais espessa do que a observada nos corpos de prova mantidos em ambiente laboratorial (MUKHTAR; PEIRIS, 2021).

A Figura 2.44 ilustra os vários modos de falha observados para os corpos de prova ensaiados.

Figura 2.44: Modos de falha dos corpos de prova ensaiados ao cisalhamento



(a) Falha coesiva no concreto

(b) Falha adesiva

(c) Ruptura do FRP

Fonte: Mukhtar e Peiris (2021)

A maioria dos prismas mantidos em câmara climatizada com 10% de umidade e com temperatura de 60°C apresentou ruptura do FRP, sem desprendimento ou descolamento da faixa de FRP (Figura 2.44 (c)). Já nos prismas mantidos continuamente imersos em água ou submetidos a ciclos, foi observada mudança no modo de falha de coesivo no concreto (para os mantidos em ambiente laboratorial) para adesivo na interface adesivo-FRP conforme ilustra a Figura 2.44 (a) e (b) (MUKHTAR; PEIRIS, 2021).

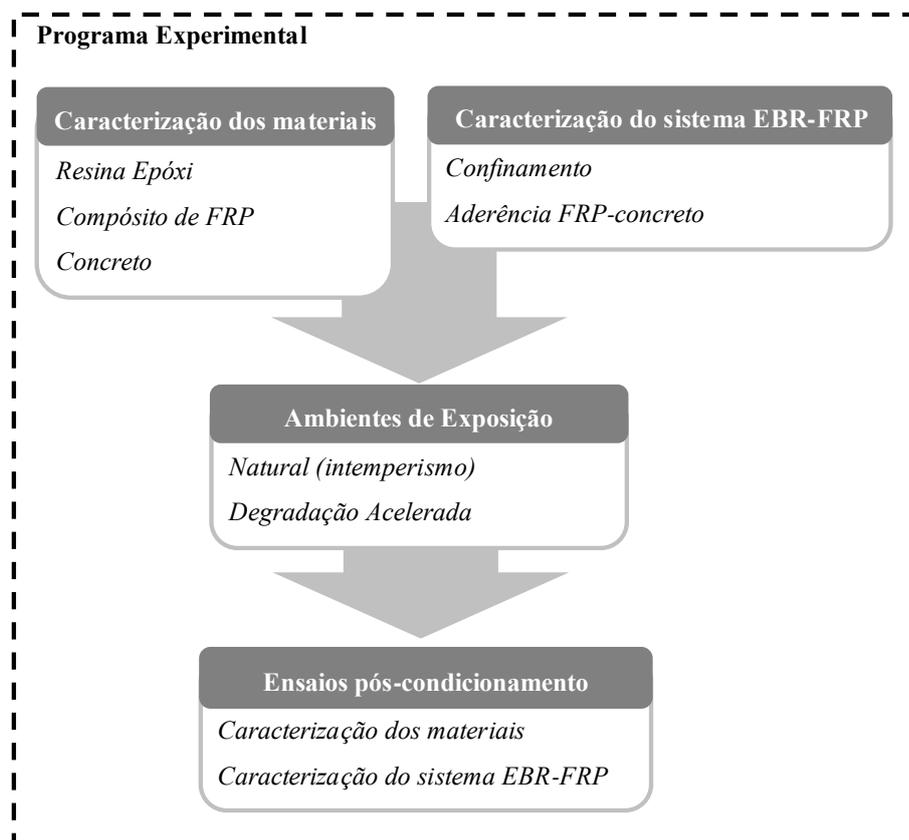
Com relação resistência dos prismas ensaiados, de todas as condições analisadas, apenas os submetidos a ciclos apresentaram redução de 12% em sua capacidade resistente (MUKHTAR; PEIRIS, 2021).

Para Mukhtar e Peiris (2021), uma possível resposta para essa mudança no modo de falha para os prismas mantidos imersos em água se deve à absorção de umidade pela resina epóxi, o que gera amolecimento e redução de sua temperatura de transição vítrea. Em combinação com a saturação dos poros de concreto por água, possivelmente ocorre redução da capacidade da resina em manter a aderência do FRP no concreto.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com o objetivo de investigar a durabilidade do sistema EBR-FRP, a presente pesquisa realizou ensaios para caracterização do material e do sistema. Duas condições de exposição foram avaliadas: exposição ao intemperismo e exposição ao protocolo de acondicionamento acelerado proposto pelo ACI 440.9R (2015). As mudanças nas propriedades mecânicas dos materiais constituintes e na aderência FRP-concreto foram periodicamente avaliadas após a exposição. A Figura 3.1 ilustra um resumo do programa experimental desenvolvido.

Figura 3.1: Resumo das etapas do programa experimental



Fonte: A Autora

O presente capítulo apresenta detalhadamente o programa experimental proposto, especificando as condições de exposição empregadas, os ensaios para a caracterização das propriedades mecânicas dos materiais e para determinação das propriedades mecânicas da interface FRP-concreto e do confinamento exercido por compósitos de FRP em elementos de

concreto.

3.1 Propriedades mecânicas dos materiais

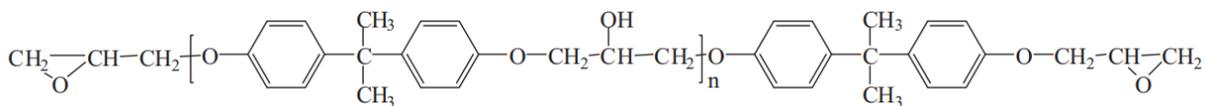
Os materiais empregados no sistema EBR-FRP consistem em resinas epoxídicas, compósitos de FRP e concreto empregado na moldagem dos corpos de prova reforçados.

3.1.1 Resina epóxi

A resina epóxi é empregada tanto para laminação das fibras do compósito, no caso de sistemas de reforço laminados *in-situ*, como para promover a aderência do FRP ao substrato de concreto (*primer*). Nesse trabalho foram estudados dois conjuntos de resina epóxi comercializados como adesivo para reforço estrutural (Resina 1 e Resina 2), cada um dos conjuntos contendo resina do tipo *primer* e resina para laminação *in-situ* do FRP.

As duas resinas epoxídicas avaliadas são produzidas a partir de reações químicas entre bisfenol-A e epiclorigidrina na presença de um catalisados básico, resultando na resina epoxídica diglicidil éter de bisfenol-A (DGEBA) cuja estrutura química é indicada na Figura 3.2 a seguir.

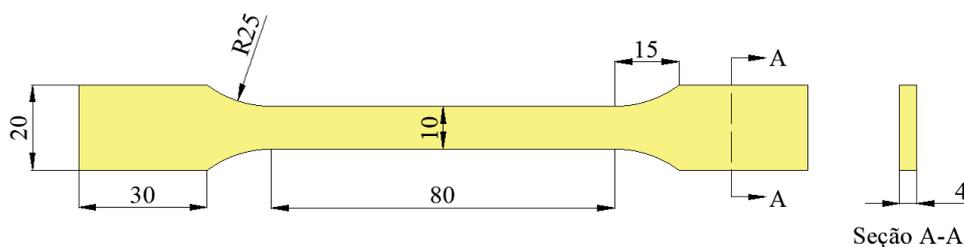
Figura 3.2: Estrutura química típica da resina epóxi DGEBA



Fonte: Jin, Li e Park (2015)

As propriedades mecânicas da resina epóxi de laminação e do *primer* foram determinadas por meio de ensaios de tração em corpos de prova do tipo *dog-bone* conforme recomenda a ISO 527-2 (2012). A Figura 3.3 ilustra a geometria recomendada pela ISO 527-2 (2012) para os corpos de prova de resina epóxi.

Figura 3.3: Geometria dos corpos de prova de resina (dimensões em mm)



Fonte: A Autora

O procedimento de preparação das amostras de resina epóxi é apresentado na Figura 3.4. Inicialmente a resina foi preparada misturando as duas partes dos seus componentes, resina e endurecedor, conforme recomendação do fabricante, até a obtenção de uma mistura homogênea. A mistura foi então despejada em um molde de teflon com o cuidado de preencher todo o molde e evitar a formação de bolhas de ar. Ao final da moldagem uma placa de vidro foi colocada sobre o molde de teflon a fim de retificar a superfície dos corpos de prova moldados. Após dois dias de cura em ambiente laboratorial as amostras foram desmoldadas.

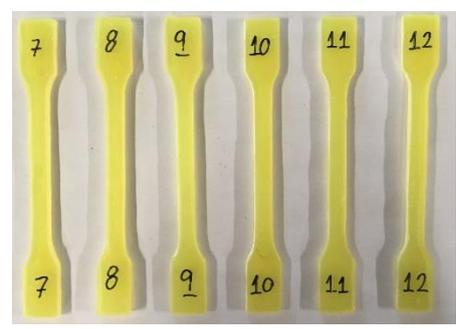
Figura 3.4: Etapas de confecção dos corpos de prova de resina



(a) Pesagem da resina epóxi bicomponente



(b) Lançamento da resina em moldes de teflon



(c) Aspecto final dos corpos de prova

Fonte: A Autora

3.1.1.1 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina EMIC com capacidade máxima de carga de 100 kN. De acordo com a ISO 527-2 (2012) os ensaios são controlados por deslocamento aplicados a uma taxa de 1 mm/min. A deformação das amostras foi obtida por meio de um *clip-gage* com 50 mm de comprimento posicionado na região central dos corpos de prova, conforme ilustra a Figura 3.5.

Para cada condição e idade de exposição foram ensaiados à tração seis corpos de prova de resina, obtendo-se a máxima tensão de tração e o módulo de elasticidade.

A tensão de tração é determinada como a força máxima resistida dividida pela seção transversal média do corpo de prova. O módulo de elasticidade E_t é calculado como a inclinação inicial da curva tensão-deformação, conforme indica a Equação 3.1, em que σ_1 é a tensão medida para uma deformação $\varepsilon_1 = 0,0005$ e σ_2 é a tensão medida para uma

deformação $\varepsilon_2 = 0,0025$ (ISO 527-1, 1996).

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.1)$$

Figura 3.5: Esquema de ensaio de tração das resinas epoxídicas



Fonte: A Autora

3.1.1.2 Absorção de umidade

O ACI 440.9R (2015) propõe que em conjunto aos ensaios mecânicos para avaliação da durabilidade dos materiais empregados no sistema EBR-FRP sejam realizados ensaios para avaliar a absorção de umidade. A norma indica que geralmente é esperado que a resina epóxi apresente ganho de massa, associado à absorção de umidade, embora também possam ser observadas perdas de massa como consequência de reações químicas deletérias na resina.

A absorção de umidade ΔM é obtida por meio da diferença entre o peso inicial W_0 e o peso após o condicionamento W_1 , conforme indica a Equação 3.2.

$$\Delta M = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (3.2)$$

A aferição do peso após o condicionamento foi realizada periodicamente durante todo o período em que os corpos de prova estiveram em acondicionamento acelerado. Após cada

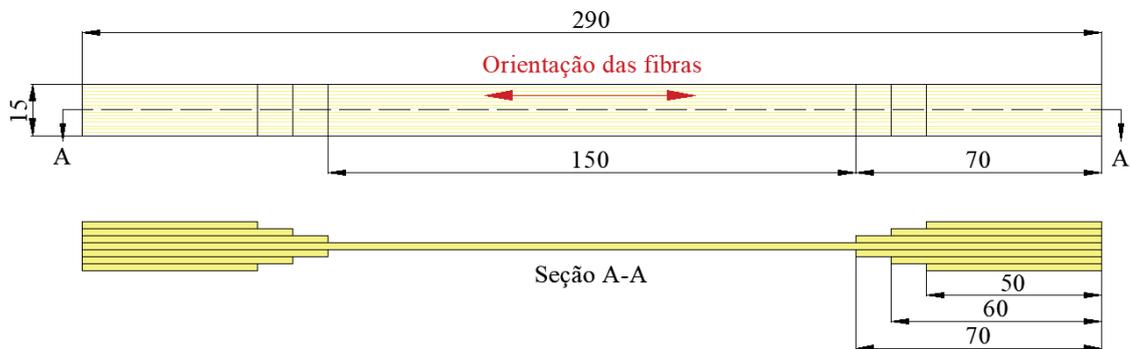
período de condicionamento, seis corpos de prova de cada tipo de resina epóxi foram retirados da solução, secados superficialmente com toalhas de papel e imediatamente pesados, conforme recomenda o ACI 440.9R (2015), em uma balança com precisão de 1 mg.

3.1.2 Compósitos de CFRP

Os polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP) são os compósitos mais amplamente utilizados no reforço de estruturas de concreto. Nesse trabalho os compósitos de CFRP foram preparados com tecidos de fibra de carbono unidirecionais com 300 g/m² (0,168 mm de espessura) disponíveis comercialmente e dois tipos de resinas epoxídicas para impregnação das fibras *in-situ*, resultando nos compósitos nomeados como CFRP 1 e CFRP 2.

A caracterização das propriedades mecânicas dos compósitos foi realizada por meio de ensaios de tração uniaxial paralela às fibras. A Figura 3.6 apresenta as características geométricas dos corpos de prova de CFRP recomendada pela norma ISO 527-5 (2009).

Figura 3.6: Geometria dos corpos de prova de CFRP (dimensões em mm)



Fonte: A Autora

Algumas das etapas de fabricação dos corpos de prova de CFRP são ilustradas na Figura 3.7. Inicialmente o tecido de fibra de carbono foi cortado em faixas, conforme a geometria definida na Figura 3.6, na sequência o tecido foi impregnado com a resina epóxi para laminação, as três faixas necessárias nas regiões de extremidade do CFRP foram então posicionadas, com cuidado de manter o alinhamento das fibras. Após dois dias de cura em temperatura ambiente a placa de CFRP foi cortada, resultando nos corpos de prova de CFRP.

Figura 3.7: Etapas de confecção dos corpos de prova de CFRP



(a) Corte do tecido



(b) Impregnação do tecido com resina para laminação



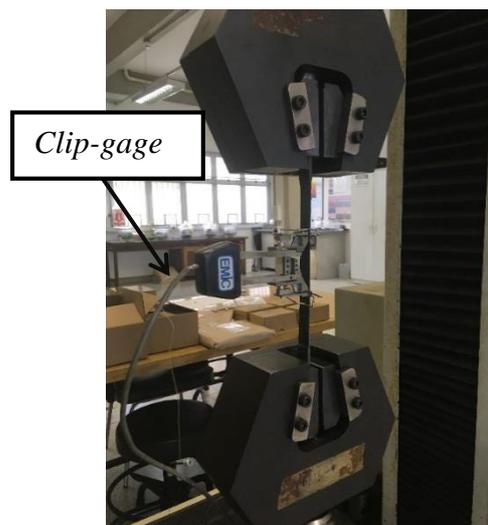
(c) Aspecto final dos corpos de prova

Fonte: A Autora

3.1.2.1 Ensaio de tração

Os ensaios de tração dos compósitos de CFRP, assim como dos corpos de prova de resina epóxi também foram realizados em uma máquina EMIC com capacidade máxima de carga de 100 kN. De acordo com a ISO 527-5 (2009) os ensaios são controlados por deslocamento aplicados a uma taxa de 2 mm/min. A deformação das amostras foi obtida por meio de um *clip-gage* com 50 mm de comprimento posicionado na região central dos corpos de prova, conforme ilustra a Figura 3.8.

Figura 3.8: Esquema de ensaio de tração dos corpos de prova de CFRP



Fonte: A Autora

Para cada condição e idade de exposição foram ensaiados à tração seis corpos de prova de CFRP, obtendo-se a máxima tensão de tração e o módulo de elasticidade.

Como os procedimentos de laminação *in-situ* geralmente resultam em espessuras não uniformes para o laminado, a tensão de tração do CFRP foi obtida como a força máxima resistida pelo compósito dividida pela área equivalente da fibra. A área da fibra é definida como a largura dos corpos de prova multiplicada pela espessura equivalente da fibra fornecida pelo fabricante. O módulo de elasticidade do CFRP é calculado conforme a Equação 3.1.

3.1.3 Concreto

Todos os modelos e corpos de prova da pesquisa foram moldados empregando o seguinte traço em massa 1: 2,03: 2,68: 0,48, com o consumo de materiais apresentado na Tabela 3.1. O traço empregado tomou como base o traço proposto por Leite (2018) para concreto C40 com algumas adaptações.

Tabela 3.1: Consumo de materiais para o traço de concreto

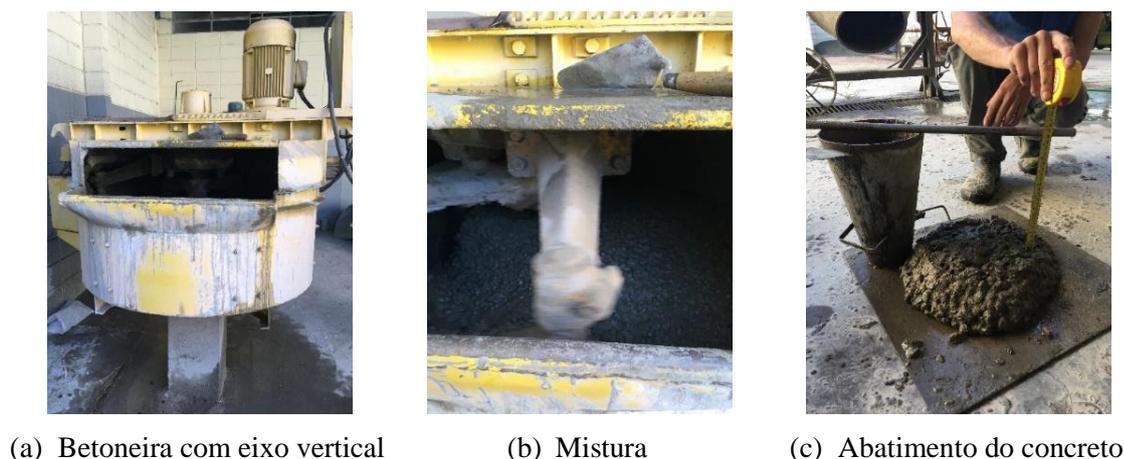
Materiais	kg/m³
Cimento CPV	392,6
Areia média	793,1
Brita 0	1052,2
Água	188,4
Superplastificante (0,1% da massa de cimento)	0,4

Fonte: A Autora

A Figura 3.9 ilustra algumas etapas de preparação do concreto. Os materiais secos foram misturados com cerca de 90% da quantidade de água necessária, sendo homogeneizados em betoneira com eixo vertical (capacidade para 250 litros). A preparação do concreto é finalizada com a mistura do restante da água e do superplastificante, tendo a sua consistência avaliada por meio do abatimento do tronco de cone conforme recomendação da ABNT NBR NM 67 (1998).

Conforme pode ser observa na Figura 3.9 (c) o concreto apresentou boa trabalhabilidade em estado fresco, com abatimento médio de $21,8 \pm 0,8$ cm.

Figura 3.9: Etapas da preparação do concreto



Fonte: A Autora

Além dos modelos de concreto a serem reforçados com FRP, foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura em conformidade com a ABNT NBR 5738 (2015) para a determinação da resistência à compressão e à tração por compressão diametral. Ao final de 24 horas, todos os modelos e corpos de prova concretados foram desmoldados e mantidos por nove meses em câmara úmida⁶.

3.1.3.1 Ensaio de compressão uniaxial

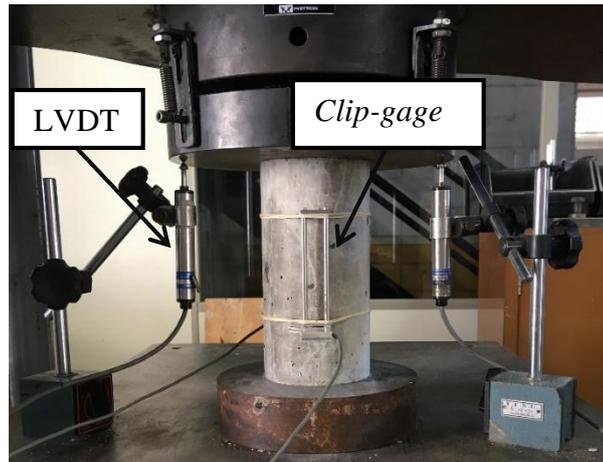
Os ensaios de compressão foram realizados em uma máquina Instron com capacidade máxima de carga de 1500 kN. A força de compressão foi aplicada por meio de controle de deslocamentos a uma taxa de 0,005 mm/s.

A deformação das amostras foi obtida por meio de dois *clip-gages* com 100 mm de comprimento posicionado na região central dos corpos de prova, dois transdutores de deslocamentos (LVDT) também são dispostos nas bases da máquina, com a finalidade de obter o trecho pós-pico da curva tensão-deformação conforme ilustra a Figura 3.10.

Para cada concretagem, condição e idade de exposição foram ensaiados à compressão três corpos de prova de concreto, obtendo-se a máxima tensão de compressão e o módulo de elasticidade.

⁶ Todas as concretagens referentes à pesquisa foram realizadas em fevereiro de 2020. O programa experimental precisou ser interrompido tendo em vista o fechamento do Laboratório de Engenharia de Estruturas da EESC – USP por conta das restrições sanitárias impostas pela pandemia de COVID-19.

Figura 3.10: Esquema do ensaio de compressão dos corpos de prova de concreto



Fonte: A Autora

A resistência à compressão é determinada como a força máxima resistida dividida pela média da seção transversal do corpo de prova (ABNT NBR 5739, 2018). O módulo de elasticidade E_c é calculado conforme a Equação 3.3 proposta pela ASTM C469/C469M (2014), em que f_{c1} é a tensão medida para uma deformação $\varepsilon_1 = 0,00005$, f_{c2} é a tensão correspondente à 40% da carga máxima e ε_2 é a deformação longitudinal produzida pela tensão f_{c2} .

$$E_c = \frac{f_{c2} - f_{c1}}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.3)$$

3.1.3.2 Ensaio de tração por compressão diametral

Os ensaios de tração por compressão diametral foram realizados em conformidade com a ABNT NBR 7222 (2011) em uma máquina ELE com capacidade máxima de carga de 2000 kN. A aplicação de carga ocorreu a uma taxa de 0,94 kN/s até a ruptura do corpo de prova. A Figura 3.11 ilustra o aparato empregado para o ensaio.

Para cada concretagem, condição e idade de exposição foram ensaiados à tração três corpos de prova de concreto, obtendo-se a máxima tensão de tração do concreto.

Figura 3.11: Esquema do ensaio tração por compressão diametral



Fonte: A Autora

A ABNT NBR 7222 (2011) recomenda que a resistência à tração por compressão diametral $f_{ct,sp}$, seja calculada conforme a Equação 3.4, em que F é a força máxima aplicada no ensaio, d é o diâmetro e l é o comprimento do corpo de prova.

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (3.4)$$

3.2 Propriedades mecânicas do sistema EBR-FRP

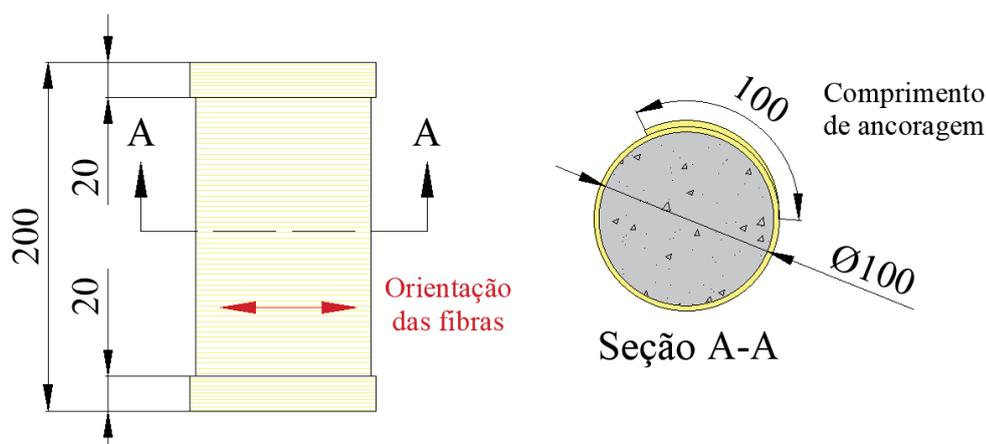
Para avaliar o comportamento e durabilidade do sistema EBR-FRP foram ensaiados modelos cujo objetivo era promover o confinamento, reforçar à flexão e ao cisalhamento.

3.2.1 Confinamento com FRP

As propriedades mecânicas do confinamento promovido pelo sistema EBR-FRP foram avaliadas por meio de ensaios de compressão uniaxial em corpos de prova cilíndrico reforçados com mantas contínuas de fibra de carbono.

Cilindros com dimensões de 20 cm de altura por 10 cm de diâmetro foram concretados e reforçados com cada um dos dois diferentes sistemas de reforço estudados. A Figura 3.12 ilustra a geometria e características do reforço com FRP executado.

Figura 3.12: Esquema do confinamento em FRP aplicado aos corpos de prova de concreto (dimensões em mm)



Fonte: A Autora

Para promover o confinamento dos corpos de prova foi empregado reforço contínuo com tecido de fibra de carbono unidirecional alinhado circunferencialmente. A fim de garantir a devida ancoragem do tecido foi empregada uma sobreposição do tecido com comprimento de 10 cm, conforme recomendado por Carrazedo (2002). Nas extremidades inferiores e superiores dos corpos de prova foi necessário empregar faixas para reforço adicional com 2 cm de largura a fim de evitar a concentração das tensões nas regiões de extremidade.

O reforço foi realizado onze meses após a concretagem dos corpos de prova⁷. Inicialmente foi realizada a preparação superficial com o auxílio de ferramenta de abrasão e limpeza com aplicação de ar comprimido a fim de melhorar a aderência da manta de CFRP ao substrato de concreto. Na sequência uma camada de resina epóxi tipo *primer* foi aplicada para regularização superficial e saturação dos poros do substrato. Ao final o tecido de fibra de carbono já cortado nas dimensões definidas é impregnado pela resina epóxi tipo laminação e aderido à superfície dos corpos de prova. Após sete meses de cura em temperatura ambiente os modelos foram ensaiados⁸.

⁷ Em novembro de 2020, após breve reabertura do Laboratório de Engenharia de Estruturas da EESC – USP os modelos de concreto foram removidos da câmara úmida e preparados para que o reforço fosse finalizado em janeiro de 2021.

⁸ Em fevereiro de 2021 o Laboratório de Engenharia de Estruturas da EESC – USP novamente foi fechado por conta das restrições sanitárias impostas pela pandemia de COVID-19. O programa experimental precisou ser novamente interrompido, sendo retomado apenas em agosto de 2021 quando os ensaios de referência foram realizados.

A Figura 3.13 ilustra o procedimento empregado para o reforço dos corpos de prova confinados.

Figura 3.13: Etapas do reforço dos corpos de prova com CFRP



(a) Preparação superficial com ferramenta de abrasão



(b) Aplicação da resina *primer*



(c) Colagem do CFRP

Fonte: A Autora

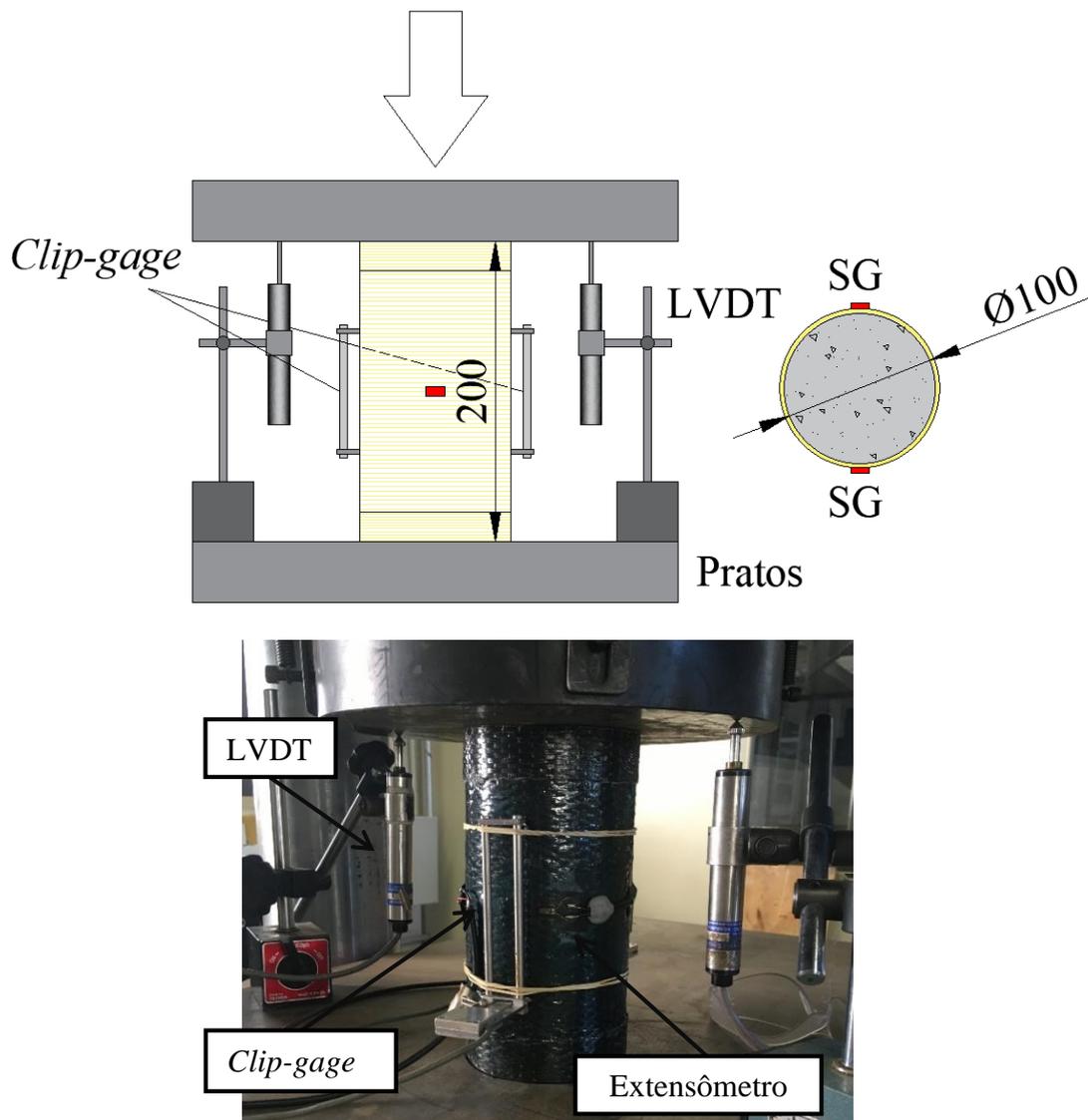
3.2.1.1 Ensaio de compressão uniaxial

Os ensaios de compressão foram realizados em máquina Instron com capacidade máxima de carga de 1500 kN. A força de compressão foi aplicada por meio de controle de deslocamentos a uma taxa de 0,005 mm/s, sendo obtido ao final do ensaio a máxima resistência à compressão dos corpos de prova reforçados, a deformação máxima axial e circunferencial das amostras.

As deformações circunferenciais do corpo de prova foram obtidas por meio de dois extensômetros elétricos (*strain-gages* - SG) com comprimento de grade de 5 mm aderidos à superfície do FRP e posicionados na região central do corpo de prova, fora da região de sobreposição destinada à ancoragem do FRP. As deformações axiais foram obtidas por meio de dois *clip-gages* com 100 mm de comprimento posicionados na região central dos corpos de prova e dois transdutores de deslocamentos (*Linear Differential Transformer* - LVDT) dispostos nas bases da máquina. Como o modo de falha das amostras era explosiva, os *clip-gages* foram removidos quando os corpos de prova atingiam 50% da carga de ruptura, mantendo-se apenas os dois LVDT's até o final do ensaio.

A Figura 3.14 ilustra o esquema de ensaio e a instrumentação empregada.

Figura 3.14: Instrumentação do ensaio de compressão uniaxial (dimensões em mm)

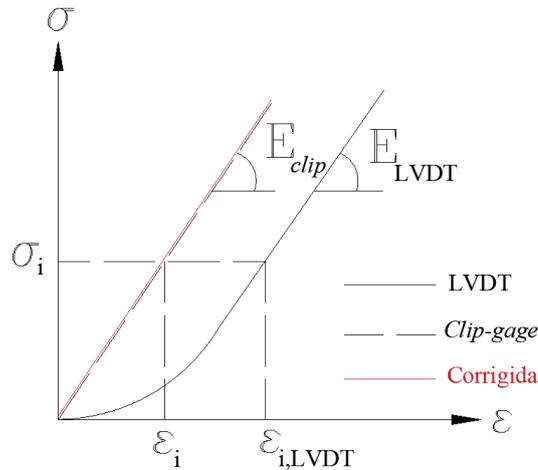


Fonte: A Autora

Assim como na caracterização dos materiais, para cada ambiente de exposição e idade foram ensaiados à compressão uniaxial 3 corpos de prova reforçados com cada um dos dois diferentes sistemas de reforço em FRP estudados.

Para a obtenção da curva tensão *versus* deformação axial dos modelos ensaiados foi necessário realizar a correção dos valores de deformação obtidos pelos transdutores de deslocamento em função de acomodações iniciais do contato com os pratos da máquina. A Figura 3.15 ilustra a diferença de leitura obtida pelos *clip-gages* e pelos LVDT's.

Figura 3.15: Curva tensão-deformação obtida pelos LVDT's e pelos *clip-gages*



Fonte: Adaptado de Prado (2020)

Mansur, Wee e Chin (1995) propuseram a Equação 3.4 para a correção da leitura obtida por meio dos transdutores a partir das leituras dos *clip-gages* no regime linear. Na Equação 3.4 ε_i é a deformação axial corrigida, $\varepsilon_{i,LVDT}$ é a deformação longitudinal obtida pelos LVDT's, E_{LVDT} e E_{clip} são os módulos de elasticidade obtidos pelos transdutores e pelos *clip-gages*, respectivamente e σ_i é a tensão de compressão para a deformação $\varepsilon_{i,LVDT}$.

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i,LVDT} - \left(\frac{1}{E_{LVDT}} - \frac{1}{E_{clip}} \right) \times \sigma_i \quad (3.4)$$

3.2.2 Aderência FRP-concreto

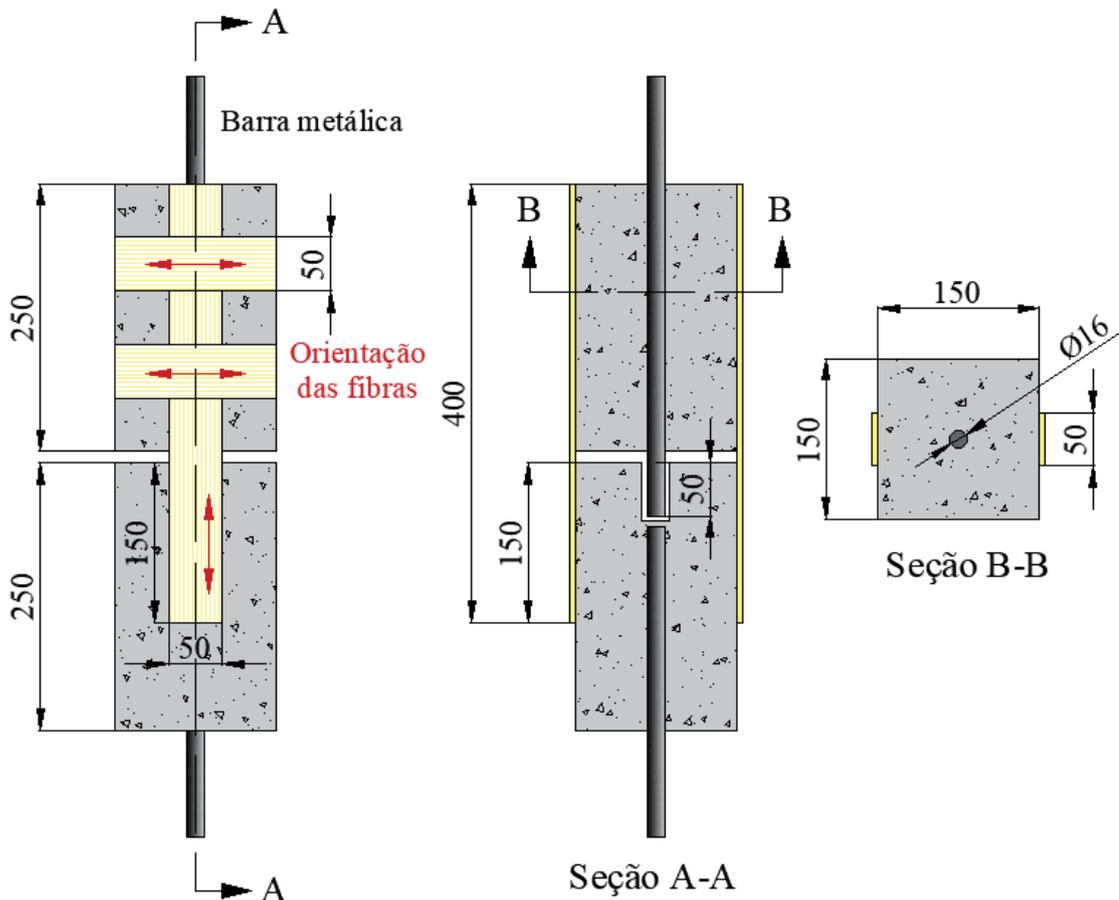
A aderência FRP-concreto foi avaliada por meio de três procedimentos experimentais: ensaio de cisalhamento da interface FRP-concreto, ensaio de flexão a três pontos e ensaio de arrancamento.

3.2.2.1 Cisalhamento FRP-concreto

Para avaliar a tensão de cisalhamento e energia de fratura na interface entre o FRP e o substrato de concreto foram realizados ensaios de cisalhamento do tipo duplo (*double shear*, em língua inglesa).

O ensaio consiste em aplicação de força de tração nas mantas de FRP aderidas em dois lados simétricos de um bloco de concreto. A Figura 3.16 ilustra a geometria e características do modelo empregado.

Figura 3.16: Esquema e geometria do ensaio de cisalhamento FRP-concreto (dimensões em mm)

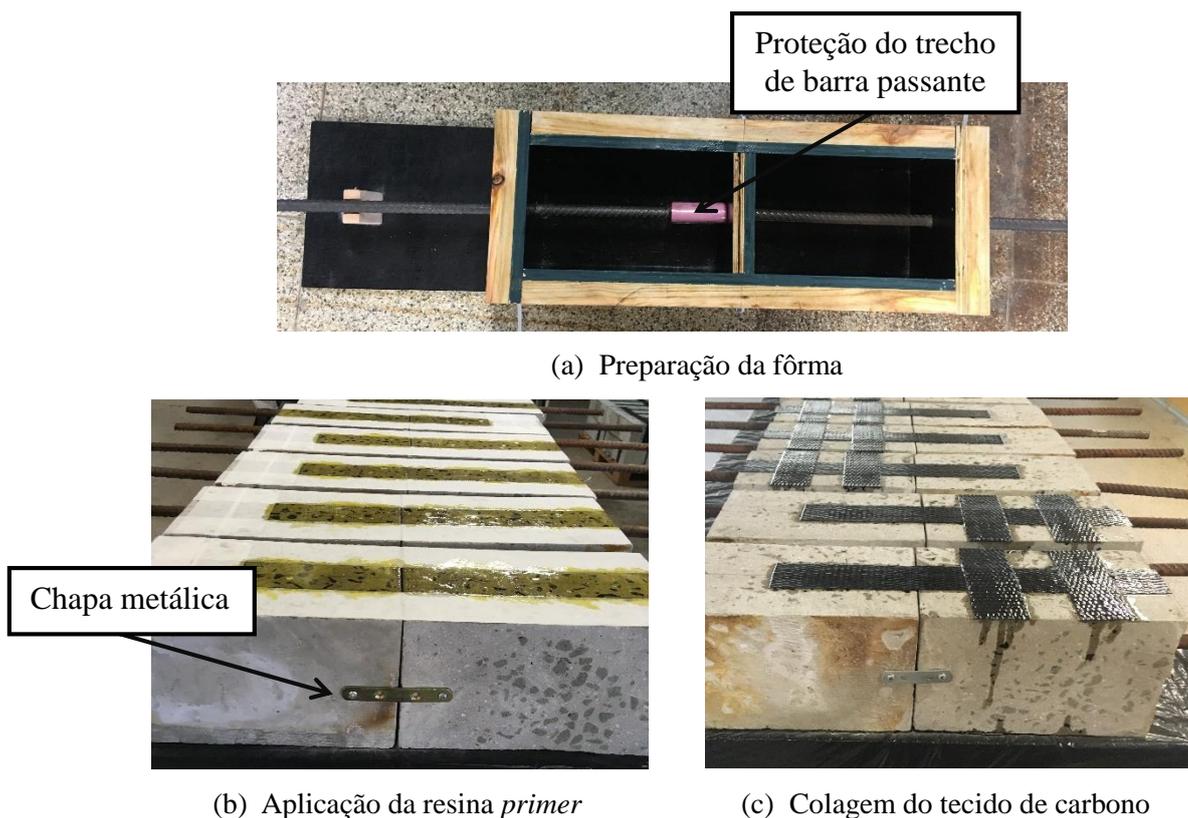


Fonte: A Autora

Conforme ilustra a Figura 3.16, o modelo consiste em dois prismas com dimensões de 25 cm x 15 cm x 15 cm, cada um com uma barra metálica de 16 mm de diâmetro e 50 cm de comprimento. As barras metálicas não apresentam nenhuma conexão, sendo os dois prismas unidos apenas por duas faixas de manta de CFRP com 40 cm de comprimento. O posicionamento das barras metálicas no centro dos prismas tem por objetivo auxiliar na ancoragem do bloco inferior de concreto e na aplicação da força no bloco superior. A movimentação do bloco superior de concreto traciona as faixas de FRP, provocando o descolamento dos 15 cm da manta de FRP aderido no bloco inferior. Para garantir o descolamento do FRP da região inferior, duas faixas de FRP com 5 cm de largura funcionam como ancoragem da faixa de FRP aderida no bloco superior.

A Figura 3.17 ilustra algumas das etapas envolvidas na preparação dos modelos. O reforço com FRP teve início onze meses⁷ após a concretagem e as etapas empregadas na aplicação do reforço foram as mesmas já descritas no procedimento de reforço ao confinamento. Para cada sistema de reforço, condição e idade de exposição, foram moldados e ensaiados 3 modelos.

Figura 3.17: Etapas do reforço dos modelos com CFRP



Fonte: A Autora

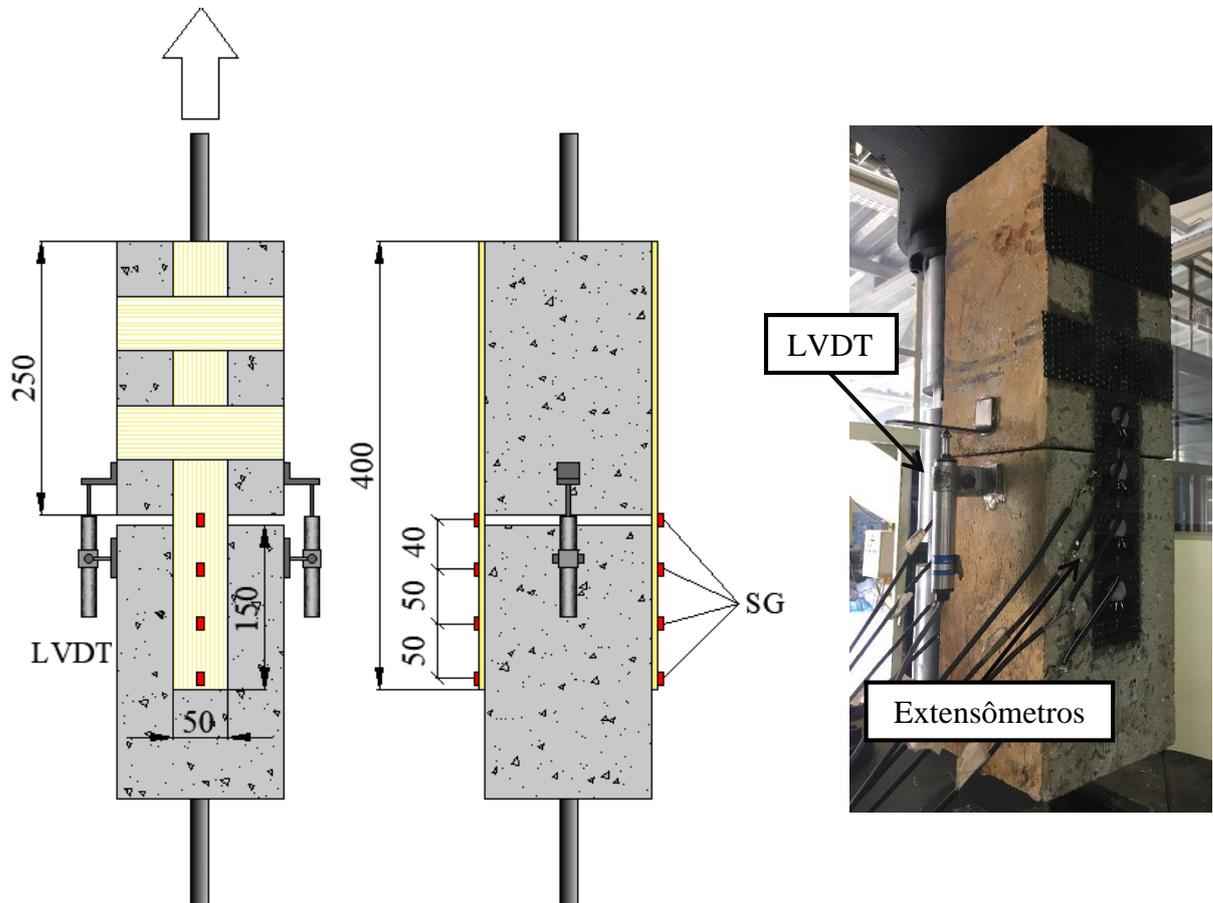
A Figura 3.17 (a) ilustra a montagem da fôrma. No detalhe é indicada uma região de 5 cm em que a barra do prisma superior passa no centro do prisma inferior (esse detalhe pode ser observado também na Seção A-A ilustrada na Figura 3.16), esse arranjo tem por finalidade auxiliar no alinhamento dos dois trechos de barra e evitar solicitações mecânicas indesejáveis durante a sua movimentação. A Figura 3.17 (b) indica ainda um outro detalhe, uma chapa metálica que foi parafusada nas duas faces do modelo, esse arranjo, o qual foi removido antes da execução do ensaio, também objetivou auxiliar na movimentação dos modelos.

Os ensaios de cisalhamento também foram realizados na máquina Instron com capacidade máxima de carga de 1500 kN. A força de tração foi aplicada por meio de controle de deslocamentos a uma taxa de 0,005 mm/s. Ao final dos ensaios, além de obter a máxima

capacidade de carga, também foi obtida a distribuição de deformações no FRP e a tensão de cisalhamento na interface FRP-concreto.

A instrumentação dos modelos é ilustrada na Figura 3.18.

Figura 3.18: Instrumentação do ensaio de cisalhamento FRP-concreto (dimensões em mm)



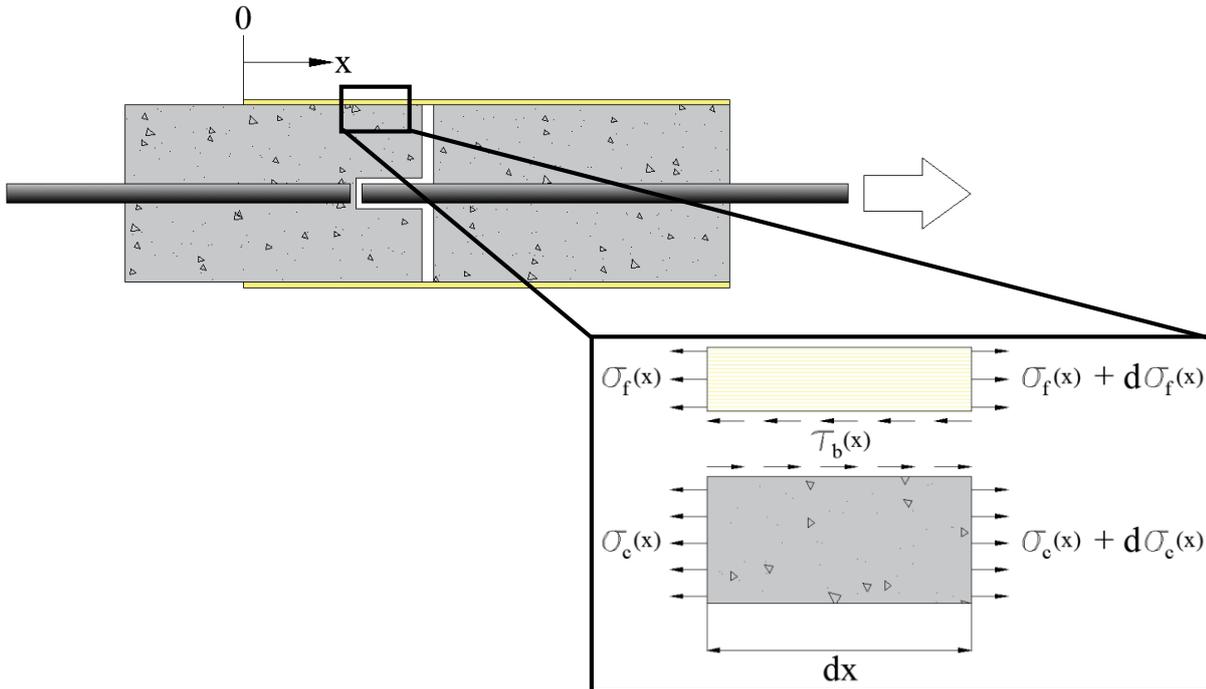
Fonte: A Autora

Conforme ilustra a Figura 3.18, foram empregados dois transdutores de deslocamento (LVDT) posicionados entre os dois prismas de concreto com a finalidade de obter o deslizamento total do FRP. As deformações na manta de CFRP e a tensão de cisalhamento da interface FRP-concreto foram obtidas por meio de oito extensômetros elétricos (SG) com comprimento de grade de 5 mm aderidos às faixas de FRP.

A curva tensão de cisalhamento *versus* deslizamento entre a manta de FRP e o substrato de concreto é obtida por meio das deformações medidas pelos extensômetros aderidos ao FRP.

A Figura 3.19 ilustra a distribuição da tensão de cisalhamento entre a manta de FRP e o substrato de concreto.

Figura 3.19: Distribuição de tensões em um elemento infinitesimal.



Fonte: A Autora

Do equilíbrio de forças para o elemento infinitesimal dx resulta a Equação 3.5 que permite calcular a tensão de cisalhamento $\tau_{b,i}$ para um ponto i da interface. Na Equação 3.5 x_i é a posição do extensômetro i , $\varepsilon_{f,i}$ é a deformação medida pelo extensômetro i , t_f é a espessura da manta de FRP e E_f é o módulo de elasticidade do FRP.

$$\tau_{b,i} = \frac{E_f t_f d \varepsilon_f}{dx} = \frac{E_f t_f (\varepsilon_{f,i} - \varepsilon_{f,i-1})}{x_i - x_{i-1}} \quad (3.5)$$

O deslizamento S_i em um ponto i é dado pela diferença do alongamento do FRP em relação ao substrato de concreto, conforme apresenta a Equação 3.6. $\delta_{f,i}$ é o alongamento do FRP na seção i e $\delta_{m,i}$ é o alongamento do substrato, o qual pode ser desprezado.

$$S_i = (\delta_{f,i} - \delta_{m,i}) + S_{i-1} \approx \delta_{f,i} + S_{i-1} \quad (3.6)$$

O alongamento do FRP pode ser obtido por meio da integral das leituras das deformações dos extensômetros nos pontos i e $i - 1$, conforme Equação 3.7.

$$\delta_{f,i} = \int_{x_{i-1}}^{x_i} \varepsilon_f(x) \cdot dx \quad (3.7)$$

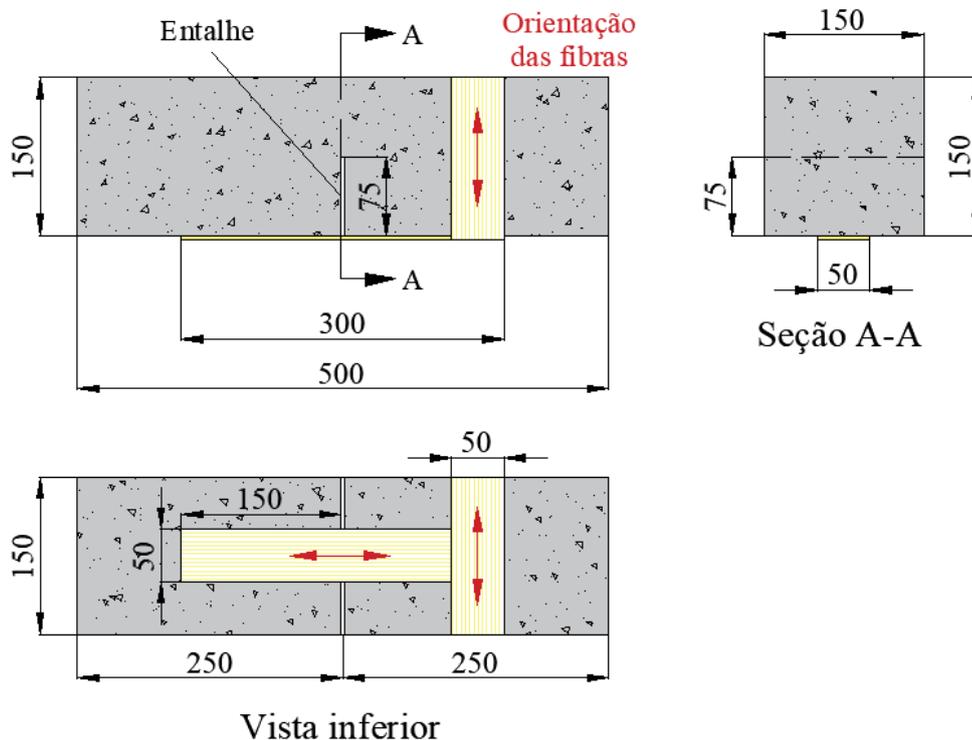
A Equação 3.7 pode ser resolvida por meio de estratégias de integração numérica, resultando na Equação 3.8 (ZHANG *et al.*; 2016).

$$\delta_{f,i} = \varepsilon_{f,i-1}(x_i - x_{i-1}) + \frac{(x_i - x_{i-1})}{2}(\varepsilon_{f,i} - \varepsilon_{f,i-1}) \quad (3.8)$$

3.2.2.2 Flexão a três pontos

Ainda com o objetivo de avaliar a aderência FRP-concreto, foram realizados ensaios de flexão a três pontos conforme propõe o ACI 440.9R (2015). A Figura 3.20 ilustra a geometria e características do modelo.

Figura 3.20: Esquema e geometria do ensaio de flexão a três pontos (dimensões em mm)



Fonte: A Autora

O ensaio consiste em um prisma com dimensões de 50 cm x 15 cm x 15 cm com um entalhe central de 7,5 cm de profundidade a fim de garantir que a falha dos modelos ocorra à flexão. O reforço em CFRP na face tracionada consiste em uma faixa com 5 cm de largura e 30

cm de comprimento. Uma faixa adicional de FRP com 5 cm de largura tem o objetivo de ancorar uma das extremidades do reforço, garantindo o descolamento na extremidade a ser instrumentada.

As etapas de preparação e reforço dos prismas em concreto tiveram início onze meses após a concretagem⁷, depois da preparação superficial e realização do entalhe central nos corpos de prova. A Figura 3.21 ilustra algumas das etapas de aplicação do sistema de reforço já descritas no detalhamento do reforço ao confinamento.

Figura 3.21: Etapas do reforço dos prismas com CFRP



(a) Limpeza da superfície com jato de ar



(b) Aplicação da resina *primer*



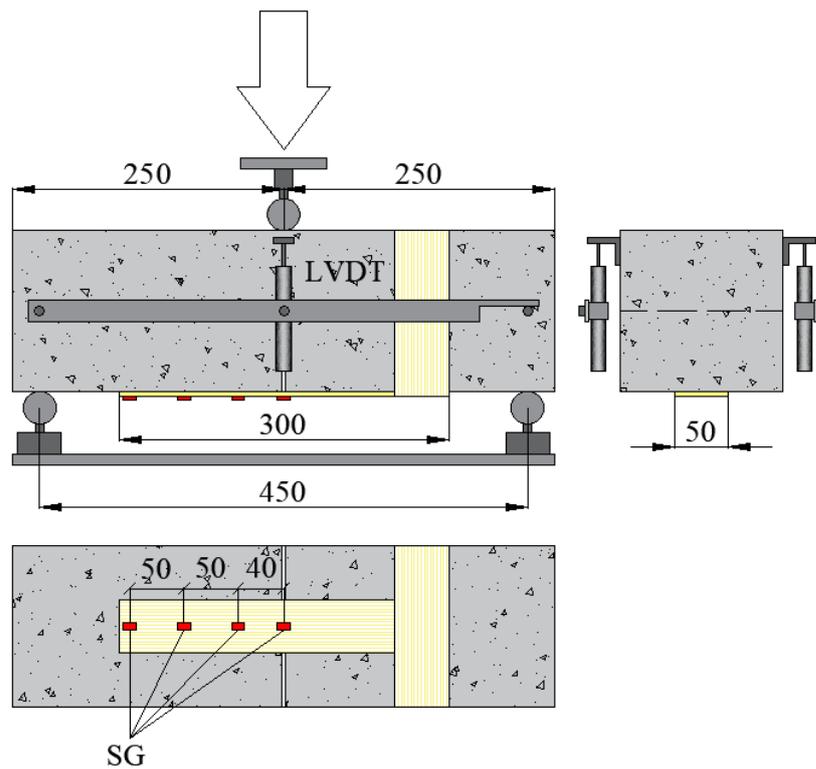
(c) Aplicação do CFRP

Fonte: A Autora

Os ensaios de flexão também foram realizados na máquina Instron com capacidade de carga de 1500 kN. O ensaio foi realizado com controle de deslocamentos a uma taxa de 0,005 mm/s conforme os ensaios realizados por Gartner *et al.* (2011), sendo obtida a máxima capacidade de carga dos modelos, além das deformações no FRP.

A instrumentação empregada é ilustrada na Figura 3.22. Conforme pode ser observado, dois transdutores de deslocamento (LVDT) foram posicionados a meio vão dos prismas, com a finalidade de se obter as flechas em função do carregamento aplicado. As deformações no CFRP foram obtidas por meio de quatro extensômetros elétricos (SG) com 5 mm de comprimento de grade aderidos à manta.

Figura 3.22: Instrumentação do ensaio de flexão a três pontos (dimensões em mm)



Fonte: A Autora

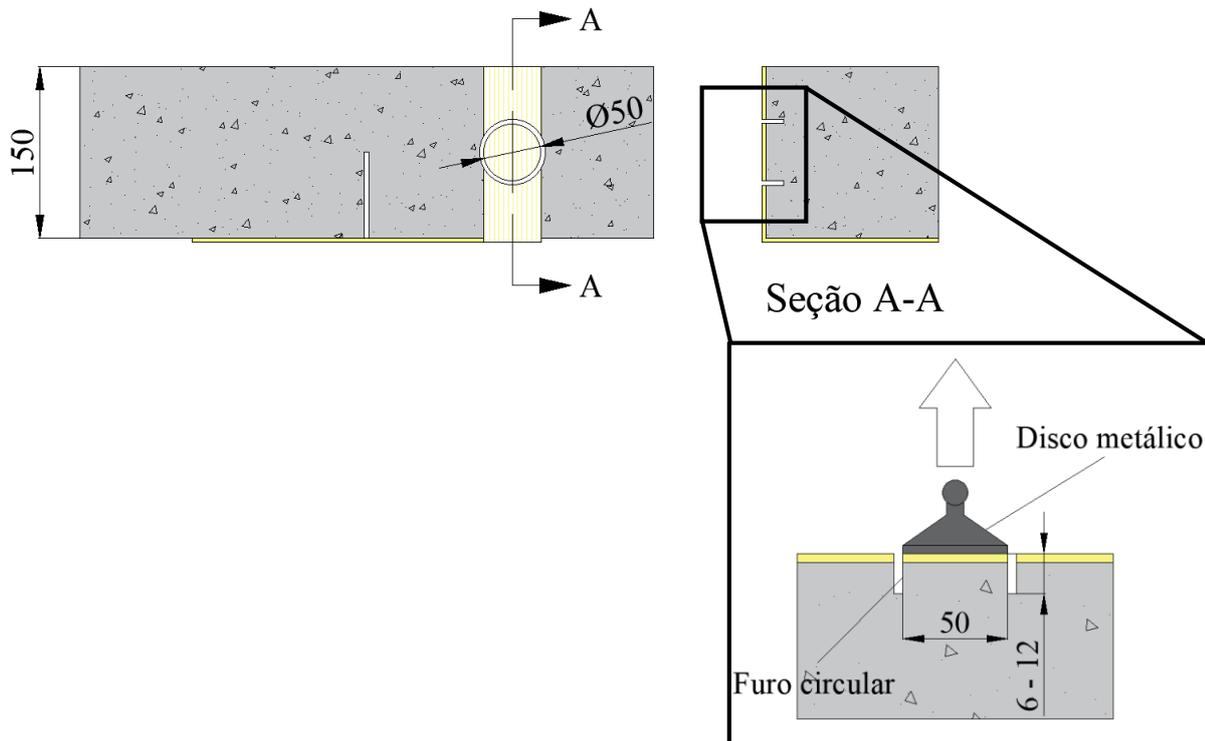
A curva tensão de cisalhamento *versus* deslizamento na interface FRP-concreto também foi obtida por meio das deformações medidas pelos extensômetros aderidos ao FRP, conforme Equações 3.6 e 3.8.

3.2.2.3 Arrancamento

O ensaio de arrancamento (*pull-off*) é o método de ensaio mais comum para avaliação da aderência FRP-concreto.

Os ensaios foram realizados conforme recomendação da ASTM D7522/D7522M (2021). A Figura 3.23 ilustra a região destinada à execução do ensaio de arrancamento.

Figura 3.23: Esquema do ensaio de arrancamento (dimensões em mm)



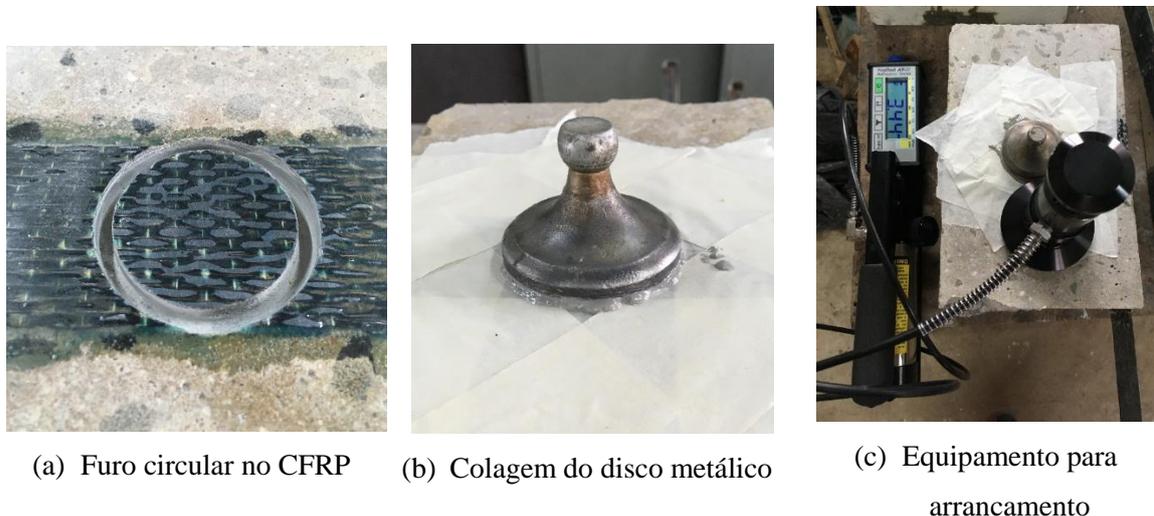
Fonte: A Autora

De acordo com o ilustrado na Figura 3.23, em uma das faixas de CFRP aderidas às laterais dos prismas ensaiados à flexão foi feito um furo com diâmetro de 50 mm e profundidade variando entre 6 e 12 mm, na sequência um disco metálico também com 50 mm de diâmetro é colado à superfície do FRP. O disco metálico é então submetido à força de tração aplicada para arrancá-lo da superfície de concreto.

A Figura 3.24 ilustra as etapas da preparação dos ensaios de arrancamento. Após os ensaios de flexão os furos foram realizados com auxílio de serra copo, seguido da limpeza superficial da manta de CFRP e colagem das pastilhas metálicas com adesivo de alta resistência inicial. Após 24 horas, período indicado para a cura do adesivo, os discos metálicos foram

gradativamente arrancados com auxílio de equipamento manual DeFelsko ATM50, com capacidade de 4 MPa para discos com 50 mm.

Figura 3.24: Etapas da preparação e ensaio de arrancamento



Fonte: A Autora

Para cada sistema de reforço, condição e idade de exposição foram realizados três ensaios de arrancamento, obtendo-se a tensão máxima de arrancamento conforme Equação 3.9, proposta pela ASTM D7522/D7522M (2021).

$$\sigma_p = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (3.9)$$

Na Equação 3.9 σ_p é a tensão de arrancamento, F é a força máxima aplicada no ensaio e D é o diâmetro da pastilha metálica.

3.3 Ambientes de exposição

Para avaliar a durabilidade do sistema EBR-FRP, as mudanças nas propriedades mecânicas dos materiais e do sistema foram periodicamente analisadas após duas condições de exposição: intemperismo e protocolo de acondicionamento acelerado proposto pelo ACI 440.9R (2015).

3.3.1 Protocolo de acondicionamento acelerado

De acordo com o que já foi exposto, o ACI 440.9R (2015) propõe que as propriedades mecânicas dos compósitos de FRP e da aderência FRP-concreto sejam analisados após 3000 horas de imersão contínua em água potável à temperatura de $50^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.

Nesse sentido, foi empregado um tanque de alvenaria confeccionado por Sarti Júnior (2020) e que se encontra na Universidade Federal de São Carlos. A Figura 3.25 apresenta uma imagem dos corpos de prova acondicionados no referido tanque.

Figura 3.25: Tanque empregado para protocolo de acondicionamento acelerado



Fonte: A Autora

O tanque com dimensões de 3 m x 2,2 m x 0,2 m tem capacidade para aproximadamente 1000 litros com aquecimento da água realizado por meio de resistência elétrica tubular do tipo U com 2000 Watts de potência (detalhe em destaque na Figura 3.25 (a)) ligada à rede elétrica. A temperatura da água é controlada por meio de um termostato analógico instalado no interior do tanque.

Após a execução dos ensaios de caracterização, as amostras de resina, CFRP, concreto e os modelos reforçados com CFRP foram armazenados por um total de 1000 horas e 3000 horas no tanque com água aquecida.

As mudanças nas propriedades mecânicas dos materiais constituintes e do sistema EBR-FRP foram testadas após cada período de exposição. Destaca-se aqui que antes da execução dos ensaios mecânicos todas as amostras foram pós-condicionadas por um período de 24 horas à temperatura ambiente em conformidade com a recomendação do ACI 440.9R (2015).

3.3.2 Intemperismo

Sabe-se que as propriedades mecânicas e durabilidade do sistema EBR-FRP são modificadas quando expostas às variações climáticas - radiação UV, variação de temperatura e ciclos de umidade. Dessa forma, outra parte das amostras foram expostas por um período de um ano ao intemperismo, em local aberto do Laboratório de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, diretamente susceptíveis às variações climáticas da cidade de São Carlos – SP, como ilustra a Figura 3.26.

Figura 3.26: Corpos de prova em exposição ao intemperismo



Fonte: A Autora

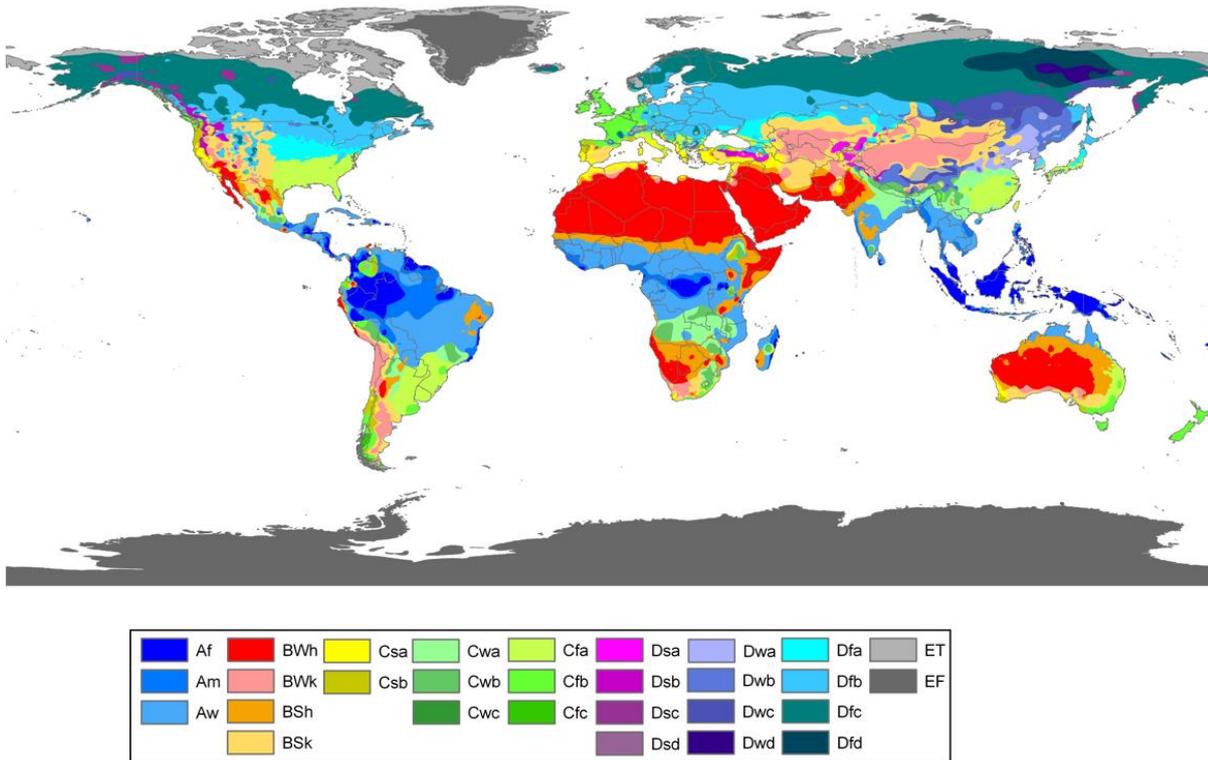
Segundo a classificação de Köppen-Geiger, São Carlos - SP apresenta clima classificado como Cwa, ou seja, subtropical úmido, com inverno seco (temperaturas inferiores a 18°C) e verão quente (temperaturas superiores a 22°C). De acordo com Alvares *et al.* (2013), a zona climática Cwa é a típica da região sudeste do Brasil.

O sistema de classificação climática de Köppen-Geiger é um sistema mundialmente utilizado para classificação climática, os tipos climáticos são classificados em função das temperaturas, precipitações e suas sazonalidades (ALVARES *et al.*, 2013).

A Figura 3.27 a seguir ilustra a distribuição global das zonas climáticas segundo a classificação de Köppen-Geiger. As zonas climáticas são descritas por um conjunto de duas ou

três letras, a primeira indica a zona climática, sendo definida pela temperatura e precipitação (A – tropical, B – seco, C – subtropical úmido, D – continental temperado e E - polar), a segunda indica a distribuição de chuva e a terceira está relacionada à distribuição sazonal de temperatura (ALVARES *et al.*, 2013).

Figura 3.27: Distribuição climática de Köppen-Geiger

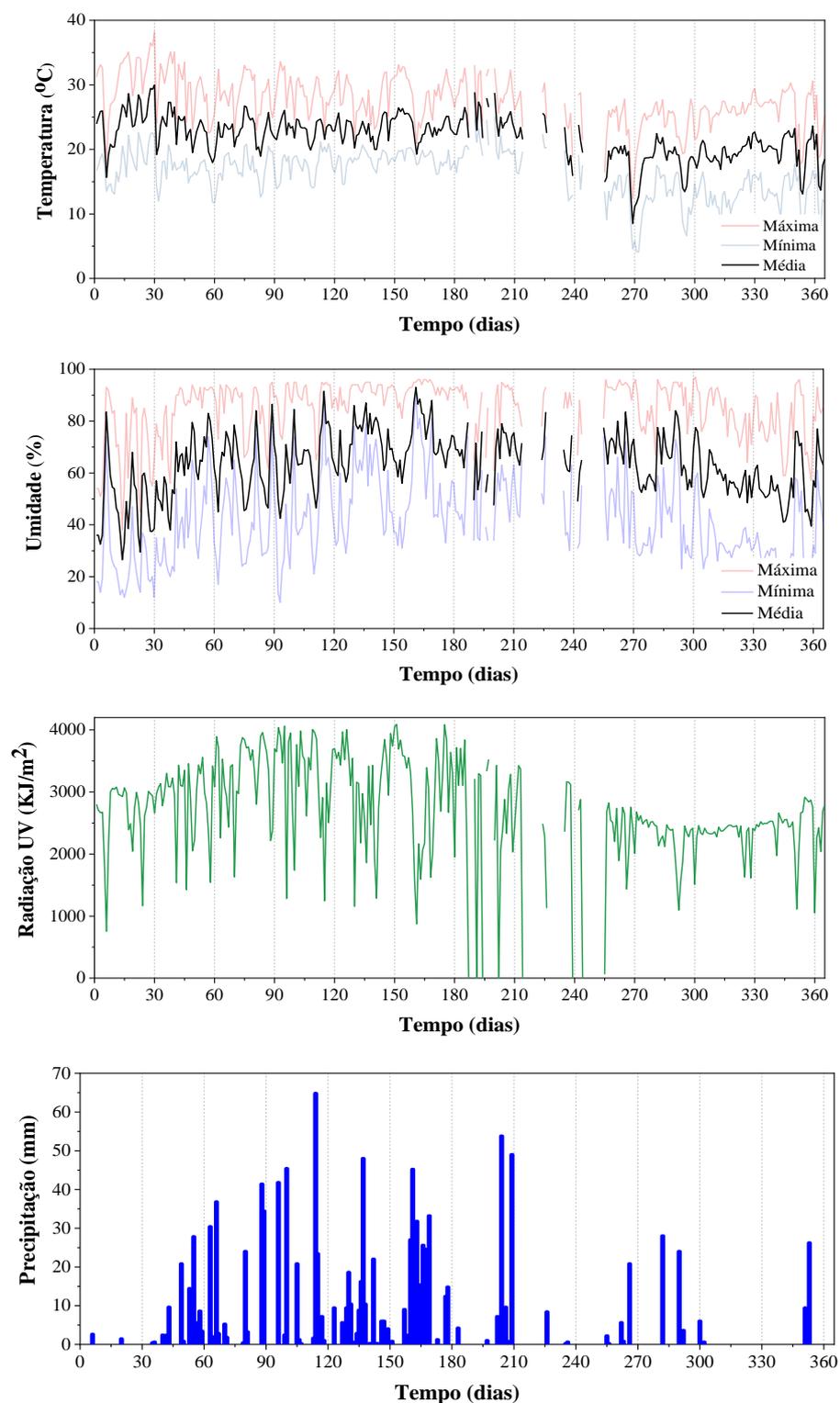


Fonte: Peel, Finlayson e McMahon (2007)

Os dados referentes à temperatura, umidade e radiação UV dos corpos de prova em intemperismo foram obtidos a partir dos registros realizados pela estação meteorológica automática “São Carlos – A711” do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) que se encontra localizada na Universidade Federal de São Carlos.

A Figura 3.28 traz os registros meteorológicos correspondentes ao período de 23 de agosto de 2021 a 22 de agosto de 2022, período em que as amostras estiveram expostas às variações climáticas. A média de temperatura para o período foi de 22°C com umidade média de 63%.

Figura 3.28: Dados meteorológicos do INMET para o período de ensaio (agosto de 2021 a agosto de 2022)

Dados: INMET⁹ Fonte: A Autora

⁹ <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A711> (acesso em 26/08/2022)

A partir da Figura 3.28 fica evidente que os menores volumes de precipitação ocorreram no período de inverno (primeiros 30 dias e últimos 60 dias - entre o dia 300 e 365 – representados nos gráficos) com temperatura média de 21°C e umidade média de 54% no período. Para o verão (entre o dia 120 e 210 – representados nos gráficos) a temperatura média para o período foi de 24°C, com elevada umidade relativa, 71% de média para o período.

Ao final do período de exposição ao intemperismo as propriedades mecânicas dos materiais constituintes e do sistema EBR-FRP foram avaliadas por meio dos ensaios mecânicos já descritos.

3.4 Resumo e cronograma do programa experimental

O presente capítulo apresentou o programa experimental, detalhando os materiais e condições de exposição empregados, os ensaios para a caracterização das propriedades mecânicas dos materiais, da interface FRP-concreto e do confinamento exercido por compósitos de FRP em elementos de concreto.

Conforme já comentado anteriormente, nesse trabalho foram estudados dois conjuntos de resina epoxídica - denominadas Resina 1 e Resina 2 - cada um dos conjuntos contendo resina do tipo *primer* e resina para laminação *in-situ* do FRP.

A Tabela 3.1 a seguir apresenta um resumo da quantidade de corpos de prova de resina epóxi e CFRP ensaiados. No total foram ensaiados 96 corpos de prova de resina epóxi e 48 corpos de prova de CFRP.

Tabela 3.1: Resumo da quantidade e tipos de ensaio para caracterização dos materiais de reforço

Tipo de ensaio	Tipo de Resina	Referência (antes da exposição)	Ambientes de exposição		
			Acelerado		Intemperismo (12 meses)
			1000 h	3000 h	
Tração Resina epóxi	Resina 1 - <i>primer</i>	6	6	6	6
	Resina 1 - <i>laminação</i>	6	6	6	6
	Resina 2 - <i>primer</i>	6	6	6	6
	Resina 2 - <i>laminação</i>	6	6	6	6
Tração CFRP	Resina 1	6	6	6	6
	Resina 2	6	6	6	6

Fonte: A Autora

Para avaliar o comportamento do sistema EBR-FRP foram ensaiados modelos cujo objetivo era promover o confinamento, reforçar à flexão e ao cisalhamento elementos de concreto.

A Tabela 3.2 traz um resumo dos tipos e quantidades de ensaios realizados. No total foram ensaiadas 72 amostras de concreto reforçadas com CFRP, sendo realizados 24 ensaios de arrancamentos no total.

Tabela 3.2: Resumo da quantidade e tipos de ensaio para avaliação dos sistemas de reforço

Tipo de ensaio	Tipo de Resina	Ambientes de exposição			
		Referência (antes da exposição)	Acelerado		Intemperismo (12 meses)
			1000 h	3000 h	
Confinamento com FRP	Resina 1	3	3	3	3
	Resina 2	3	3	3	3
Cisalhamento FRP-concreto	Resina 1	3	3	3	3
	Resina 2	3	3	3	3
Flexão a três pontos	Resina 1	3	3	3	3
	Resina 2	3	3	3	3
Arrancamento	Resina 1	3	3	3	3
	Resina 2	3	3	3	3

Fonte: A Autora

Tendo em vista a limitação da capacidade da betoneira e do número de fôrmas disponíveis no laboratório foram realizadas cinco concretagens no total. Dessa forma, apesar de ter sido empregado o mesmo traço, para cada concretagem foram moldados corpos de prova para caracterização mecânica do material.

Para cada concretagem, condição e idade de exposição foram realizados ensaios para caracterização mecânica do concreto, conforme apresenta a Tabela 3.3. Na primeira concretagem foram moldados os corpos de prova destinados aos ensaios de confinamento, na segunda e terceira concretagens foram moldados os prismas para os ensaios de flexão a três pontos. As concretagens de número quatro e cinco tiveram como objetivo moldar os modelos para o ensaio de cisalhamento FRP-concreto.

Tabela 3.3: Resumo da quantidade e tipos de ensaio para caracterização do concreto

Tipo de ensaio	Concretagem	Ambientes de exposição			
		Referência (antes da exposição)	Acelerado		Intemperismo (12 meses)
			1000 h	3000 h	
Compressão Concreto	Concretagem 1	3	3	3	3
	Concretagem 2	3	3	3	3
	Concretagem 3	3	3	3	3
	Concretagem 4	3	3	3	3
	Concretagem 5	3	3	3	3
Tração por compressão diametral Concreto	Concretagem 1	3	3	3	3
	Concretagem 2	3	3	3	3
	Concretagem 3	3	3	3	3
	Concretagem 4	3	3	3	3
	Concretagem 5	3	3	3	3

Fonte: A Autora

A Tabela 3.4 ilustra o cronograma dos ensaios realizados^{6,7,8}. O programa experimental teve início em fevereiro de 2020 sendo finalizado em setembro de 2022.

Tabela 3.4: Cronograma de ensaios

	2020					2021					2022						
	J	F	...	N	D	J	F	...	A	S	O	N	D	J	F	...	S
Concretagem dos modelos	•																
Preparação dos corpos de prova de resina e CFRP					•												
Reforço dos modelos						•											
Execução dos ensaios de referência									•								
Acondicionamento acelerado conforme o ACI 440.9R (2015)									•	•	•	•					
Execução dos ensaios após 1000 horas no tanque										•							
Execução dos ensaios após 3000 horas no tanque														•			
Exposição a intemperismo									•	•	•	•		•	•	•	
Execução dos ensaios ao final de 12 meses de intemperismo																	•

Fonte: A Autora

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O presente capítulo apresenta e discute os resultados experimentais de caracterização e pós-condicionamento dos materiais que compõem o sistema de reforço. São apresentados também os resultados experimentais do comportamento da interface FRP-concreto e do confinamento exercido por compósitos de FRP em elementos de concreto expostos ao intemperismo e mantidos em acondicionamento acelerado.

4.1 Propriedades mecânicas dos materiais

Conforme já descrito no Capítulo 3, foram avaliadas as propriedades mecânicas das resinas epoxídicas, compósitos de CFRP e do concreto empregado na moldagem dos corpos de prova reforçados pela técnica EBR.

4.1.1 Resina epóxi

O programa experimental teve como objetivo avaliar as propriedades mecânicas (tensão de tração máxima e módulo de elasticidade) de dois conjuntos de resina epóxi - denominadas Resina 1 e Resina 2 - quando expostas a diferentes condições ambientais.

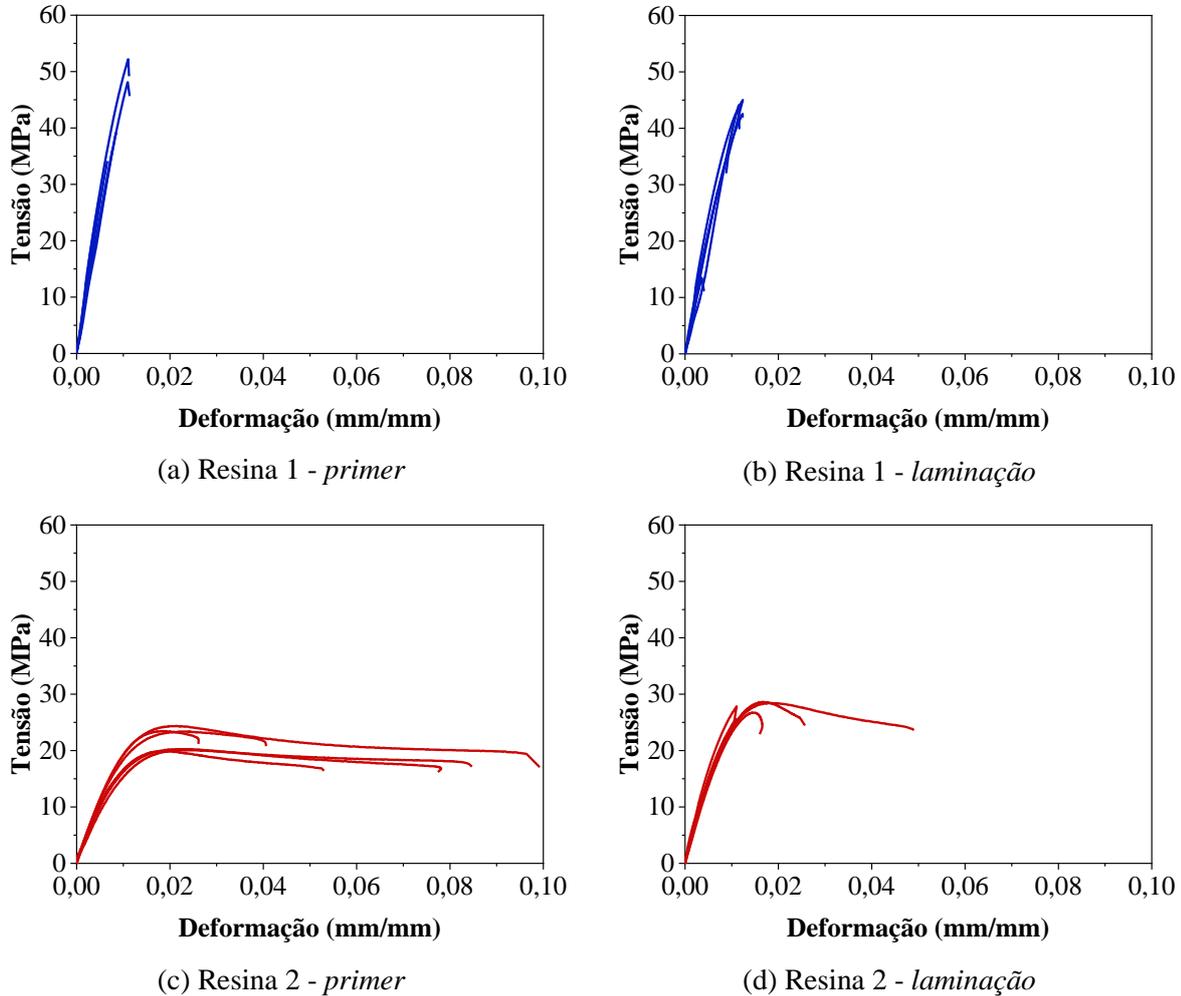
Para isso, os corpos de prova foram ensaiados oito meses após a moldagem⁸ (referência - REF), ao final de 1000 horas e 3000 horas em acondicionamento acelerado (*accelerated conditioning protocol* - ACP) e ao final de um ano de exposição ao intemperismo (*weathering* - WEA).

As curvas tensão de tração *versus* deformação para os corpos de prova de referência são apresentadas na Figura 4.1, é possível observar comportamento elástico linear até a ruptura para as resinas do tipo 1 enquanto as resinas do tipo 2 tiveram comportamento elasto-plástico.

Os valores médios de referência para a resistência à tração da Resina 1 foram de 39,53 MPa e 39,35 MPa para as resinas do tipo *primer* e laminação, respectivamente, com módulos de elasticidade médios de 5,55 GPa e 4,32 GPa. Para a Resina 2 o valor médio de referência da resistência à tração foi de 21,91 MPa e 27,45 MPa para as resinas *primer* e

laminação, respectivamente, com módulos de elasticidade de 2,21 GPa e 3,16 GPa.

Figura 4.1: Curvas tensão de tração *versus* deformação para as resinas de referência



Fonte: A Autora

As Tabelas 4.1 e 4.2 a seguir apresentam os principais resultados dos ensaios de tração uniaxial das resinas epoxídicas tipo 1 e 2, respectivamente. Os valores apresentados nas referidas tabelas correspondem à média de seis amostras ensaiadas para cada idade e tipo de resina, sendo os resultados individuais apresentados no Apêndice A.

Tabela 4.1: Resumo dos resultados dos ensaios de tração uniaxial para a Resina 1

Identificação	Ambiente de exposição	Tensão máxima		Módulo de elasticidade	
		Média (MPa)	D.P. (MPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)
Resina 1 - <i>primer</i>	REF	39,53	9,16	5,55	0,75
	ACP – 1000 h	30,86	7,99	2,02	0,05
	ACP – 3000 h	29,8	10,6	2,06	0,14
	WEA	13,44	4,78	2,9	0,3
Resina 1 - <i>laminação</i>	REF	39,35	6,77	4,32	0,82
	ACP – 1000 h	32,82	1,88	1,93	0,12
	ACP – 3000 h	34,6	3,81	1,99	0,08
	WEA	15,66	2,88	2,41	0,18

Nota: D.P. = Desvio Padrão

Fonte: A Autora

Tabela 4.2: Resumo dos resultados dos ensaios de tração uniaxial para a Resina 2

Identificação	Ambiente de exposição	Tensão máxima		Módulo de elasticidade	
		Média (MPa)	D.P. (MPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)
Resina 2 - <i>primer</i>	REF	21,91	2,02	2,21	0,08
	ACP – 1000 h	16,93	0,62	0,98	0,15
	ACP – 3000 h	23,45	2,69	1,36	0,04
	WEA	13,74	1,92	1,82	0,23
Resina 2 - <i>laminação</i>	REF	27,45	1,27	3,16	0,33
	ACP – 1000 h	15,98	2,4	1,1	0,05
	ACP – 3000 h	26,76	1,59	1,49	0,12
	WEA	14,77	1,4	1,97	0,05

Nota: D.P. = Desvio Padrão

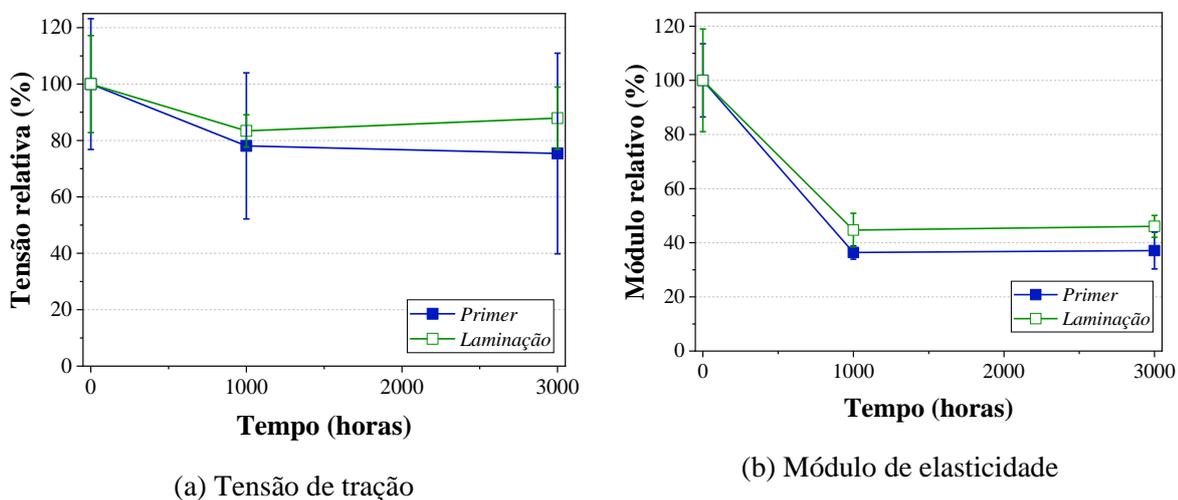
Fonte: A Autora

4.1.1.1 Protocolo de acondicionamento acelerado - ACP

Para as resinas epoxídicas estudadas foi possível notar que o acondicionamento acelerado resultou em redução tanto da tensão máxima de tração quanto do módulo de elasticidade, sendo essa última propriedade mecânica a mais afetada.

A Figura 4.2 apresenta os valores relativos para tensão de tração e módulo de elasticidade em relação à média dos ensaios de referência para a Resina 1. Os valores médios obtidos para os ensaios de referência foram considerados como 100%, sendo as demais médias apresentadas como porcentagens desse valor.

Figura 4.2: Propriedades mecânicas relativas para a Resina 1 mantida em acondicionamento acelerado



Fonte: A Autora

Para a Resina 1 – *primer* é possível constatar logo nas primeiras 1000 horas redução de 22% e 64% na resistência à tração e módulo de elasticidade, respectivamente, enquanto para as resinas de *laminação*, são observadas reduções de 17% e 55% na resistência à tração e módulo de elasticidade, respectivamente. Ao final das 3000 horas a taxa de degradação tanto da tensão máxima de tração quanto do módulo de elasticidade se estabiliza, com pequenas variações em seus valores após as 1000 horas.

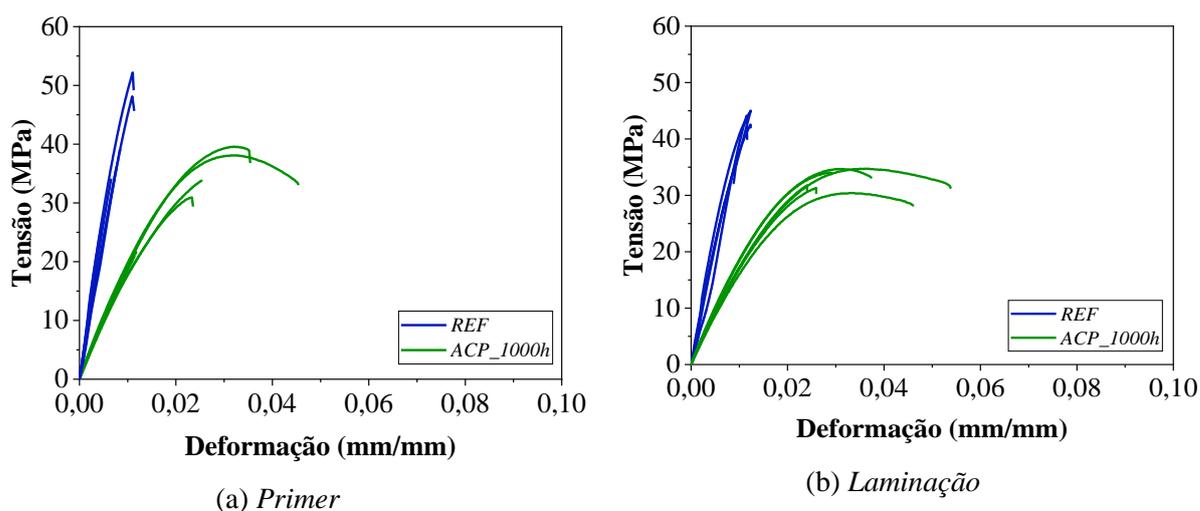
Resultados de degradação similares também foram constatados por Ghiassi (2013) - redução da resistência à tração de 25% e redução do módulo de elasticidade de 40% após 24 semanas de imersão em água à 23°C - Silva *et al.* (2016) - redução da resistência à tração de 38% e redução do módulo de elasticidade de 53% após 480 dias de imersão em água à 20°C - Muktar e Peiris (2021) - redução da resistência à tração em 19% e redução do módulo de

elasticidade em 34% ao final de 5 semanas de exposição à água com temperatura de 60°C.

A redução das propriedades mecânicas, principalmente do módulo de elasticidade da Resina 1 após o acondicionamento acelerado podem ser explicadas pela absorção de umidade pela resina. A água absorvida pela resina epóxi pode modificar as propriedades do polímero de forma reversível, por plastificação, ou de forma irreversível, por hidrólise, alterando as características físicas, mecânicas e químicas dos polímeros (FRIGIONE; LETTIERI, 2008). Como resultado da hidrólise (quebra das ligações intermoleculares) dos polímeros são observadas reduções na sua resistência e módulo de elasticidade (ISIS, 2006).

O efeito da água na Resina 1 também alterou o comportamento da curva tensão de tração *versus* deformação, conforme ilustra a Figura 4.3. É possível constatar que o comportamento à tração da Resina 1 muda de elástico linear para elasto-plástico após as 1000 horas em acondicionamento acelerado.

Figura 4.3: Curvas tensão de tração *versus* deformação para a Resina 1

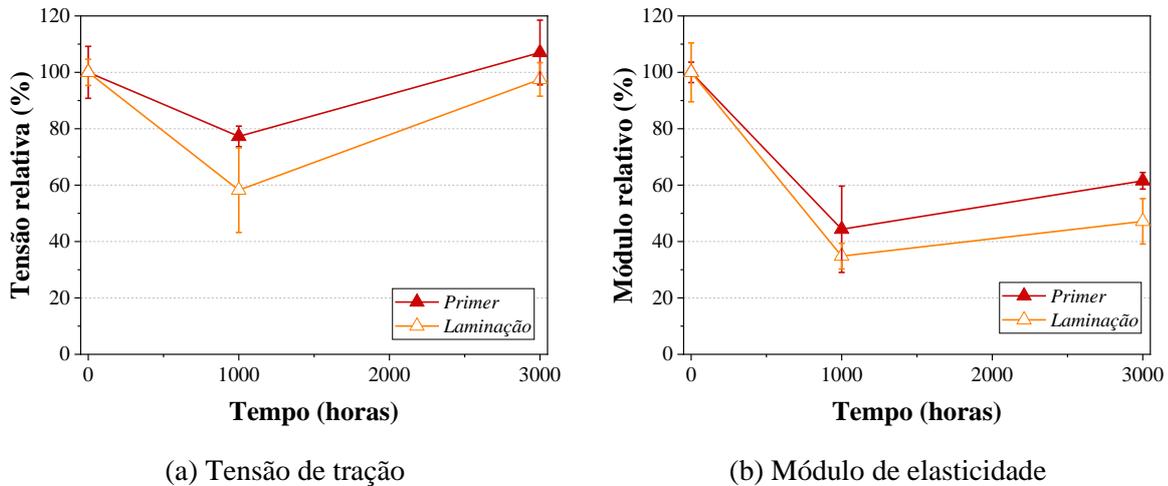


Fonte: A Autora

Outros autores também observaram que a umidade absorvida é capaz de modificar o modo de falha das resinas epóxi de frágil para dúctil (LIN; CHEN, 2005; SHRESTHA; UEDA; ZHANG, 2015).

A Figura 4.4 apresenta os valores relativos para tensão de tração e módulo de elasticidade em relação à média dos ensaios de referência para a Resina 2.

Figura 4.4: Propriedades mecânicas relativas para a Resina 2 mantidas em acondicionamento acelerado



Fonte: A Autora

Para a Resina 2, é possível notar que o acondicionamento acelerado acarretou, ao final de 1000 horas, redução de 23% e 56% na resistência à tração e módulo de elasticidade, respectivamente, para as resinas do tipo *primer* enquanto para as resinas de *laminação* foram observadas reduções de 42% e 65% na resistência à tração e módulo de elasticidade, respectivamente. Essas taxas de degradação correspondem às taxas observadas para a Resina 1, entretanto, ao final das 3000 horas se pode notar uma recuperação das propriedades mecânicas, principalmente da resistência à tração.

Dessa forma, a resistência à tração da Resina 2 retorna aos valores de referência mesmo após as 3000 horas de exposição, enquanto o módulo de elasticidade apresenta redução similar à observada ao final das 1000 horas - redução de 38% e 53% para a resina *primer* e *laminação*, respectivamente.

As observações apontadas por Zhou e Lucas (1999) podem explicar os resultados observados para a Resina 2. Nesse sentido, inicialmente, até as 1000 horas de exposição higrotérmica, o Tipo I de ligação entre a água e as moléculas poliméricas é predominante, o que resulta em quebra das ligações entre as cadeias poliméricas, resultando em redução das propriedades mecânicas da resina. Com o decorrer do tempo de exposição o Tipo II de ligação entre a água e as moléculas poliméricas passa a predominar, formando novas ligações entre as cadeias poliméricas e aumentando as propriedades mecânicas da resina.

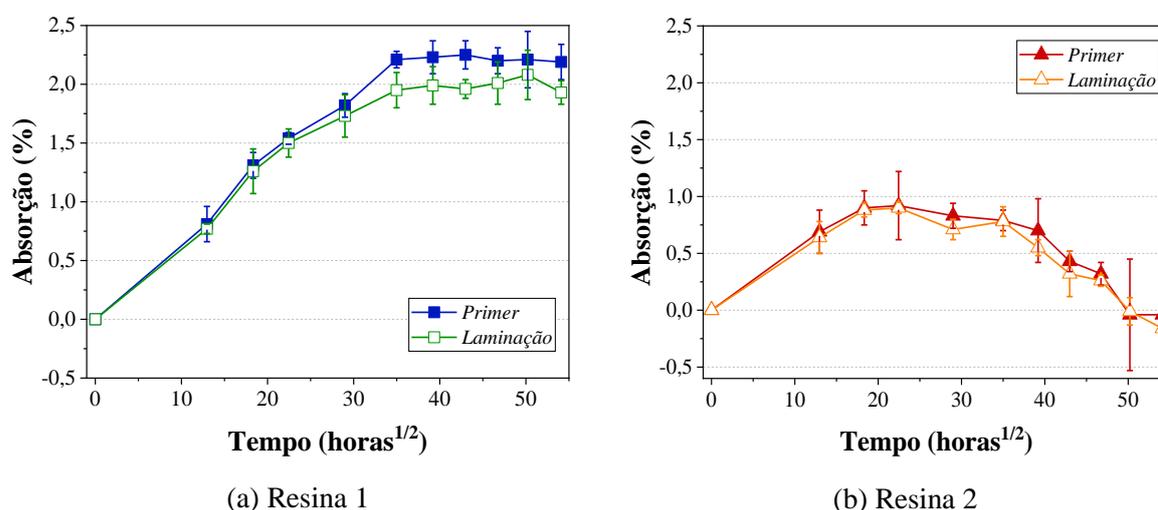
Frigione e Lettieri (2008) complementam essa constatação afirmando que a imersão de resinas epoxídicas curadas *in-situ* (à temperatura ambiente) em água pode provocar a reativação das reações de cura incompletas (para as amostras não totalmente curadas) ou a formação de

novas ligações entre as cadeias poliméricas (para as amostras totalmente curadas). Ambas situações tendem a aumentar as propriedades mecânicas das resinas.

Simultaneamente aos ensaios de tração, também foram realizados ensaios de absorção de umidade nos corpos de prova de resina epóxi em acondicionamento acelerado. Para isso, seis corpos de prova de cada um dos tipos de resina tiveram a sua massa aferida periodicamente durante as 3000 horas de ensaio.

A Figura 4.5 traz as curvas de absorção de umidade em função da raiz quadrada do tempo para as resinas epoxídicas tipo 1 e 2, respectivamente. Os valores nos gráficos correspondem à média dos resultados obtidos, sendo os resultados individuais apresentados no Apêndice B.

Figura 4.5: Absorção de umidade das resinas mantidas em acondicionamento acelerado



Fonte: A Autora

Da Figura 4.5 (a) é possível notar que a Resina 1 (*primer* e laminação) apresenta taxa de absorção de umidade linearmente crescente até as 1224 horas (35 horas^{1/2}), após, a taxa de absorção de umidade deixa de aumentar, se mantendo constante em torno dos 2%. Comprovando o que Weitsman e Elahi (2000) afirmam, é possível traçar uma correlação entre a estabilização da taxa de absorção de umidade (Figura 4.5) com a estabilização da taxa de degradação das propriedades mecânicas da Resina 1 (Figura 4.2).

Com relação à Figura 4.5 (b) também é possível notar que a taxa de absorção de umidade da Resina 2 (*primer* e laminação) cresce linearmente até as 336 horas (18 horas^{1/2}), após, a taxa de absorção se mantém constante em cerca de 1% até as 1224 horas. Decorridas as 1224 horas de exposição, a Resina 2 passa a apresentar perda de massa constante até retornar à sua massa

original (absorção igual a 0%) às 2520 horas de exposição (50 horas^{1/2}).

Taxas de absorção de umidade similares às encontradas também foram constatadas por Ghiassi (2013) – 1,6% após 24 semanas de imersão em água à 23°C - Shrestha, Ueda e Zhang (2015) – valores entre 1,98% e 2,63% após 24 meses de imersão em água à 20°C.

Com relação ao comportamento incomum - perda de massa - observado para a Resina 2, Apicella *et al.* (1982) também notaram perda de massa em resinas poliméricas condicionadas em água a uma temperatura de 90°C enquanto Wang *et al.* (2020) observaram perda de massa em compósitos poliméricos de BFRP (com fibras de basalto) quando imersos em água à 60°C. Esses últimos autores associaram o declínio na absorção de água à degradação da matriz polimérica em ambiente higrotérmico.

Grammatikos *et al.* (2015) comentam que a exposição prolongada em água leva à degradação física e química (plastificação e hidrólise), assim, o início da decomposição dificulta a interpretação da aferição de massa das amostras uma vez que o processo real de absorção de água é mascarado pela redução de massa. Os autores ainda apontam que a depender da temperatura de exposição, o processo de decomposição pode iniciar em diferentes idades após a imersão.

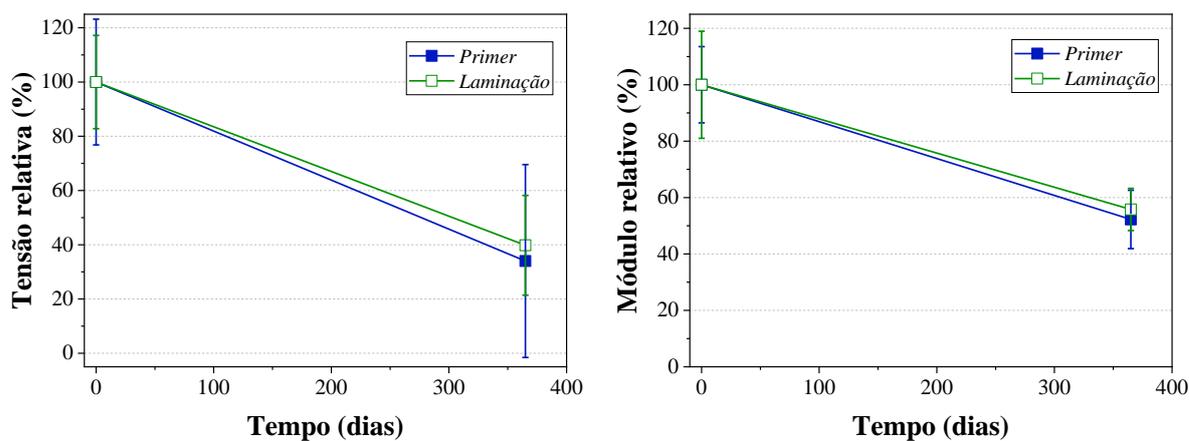
Diante disso, a Resina 2, quando imersa em água à temperatura elevada, possivelmente apresenta dois processos ocorrendo de forma simultânea: processo de decomposição da matriz polimérica associado à perda de massa das amostras e processo de pós-cura que tende a aumentar a resistência à tração da resina.

4.1.1.2 Intemperismo - WEA

Com relação à exposição ao intemperismo, os resultados das Tabelas 4.1 e 4.2 permitem concluir que tanto a tensão máxima de tração quanto o módulo de elasticidade são reduzidos pós-condicionamento, neste caso, a resistência à tração é a propriedade mecânica mais afetada.

As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam os valores relativos para tensão de tração e módulo de elasticidade em relação à média dos ensaios de referência para a Resina 1 e 2, respectivamente.

Figura 4.6: Propriedades mecânicas relativas para Resina 1 exposta ao intemperismo

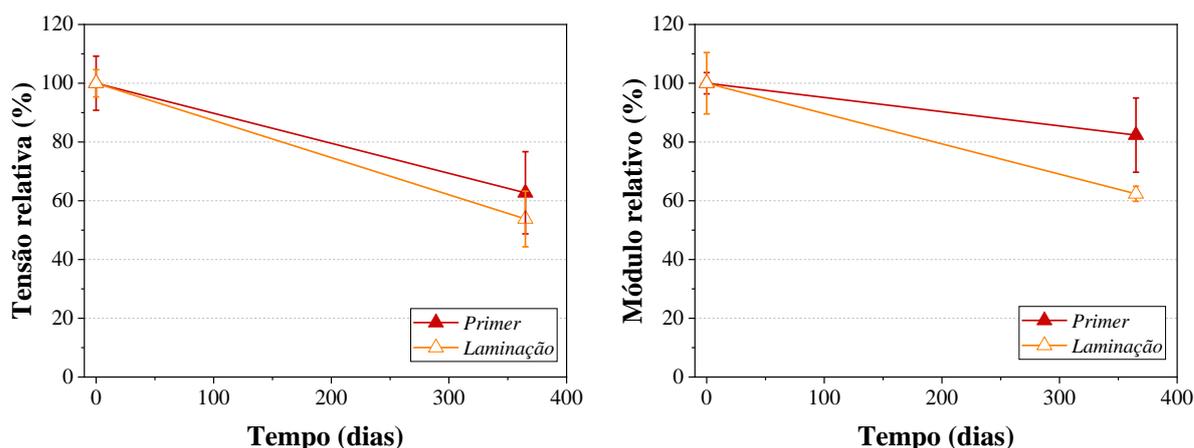


(a) Tensão de tração

(b) Módulo de elasticidade

Fonte: A Autora

Figura 4.7: Propriedades mecânicas relativas para Resina 2 exposta ao intemperismo



(a) Tensão de tração

(b) Módulo de elasticidade

Fonte: A Autora

A Figura 4.6 indica, para a Resina 1 – *primer*, redução de 66% e 48% na resistência à tração e módulo de elasticidade, respectivamente. Para as resinas de *laminação*, são observadas reduções de 60% e 44% na resistência à tração e módulo de elasticidade, respectivamente.

Para a Resina 2, conforme ilustra a Figura 4.7, a exposição ao intemperismo acarretou redução de 37% e 18% na resistência à tração e módulo de elasticidade, respectivamente, para as resinas do tipo *primer* enquanto para as resinas de *laminação* foram observadas reduções de 46% e 38% na resistência à tração e módulo de elasticidade, respectivamente.

Taxas de degradação similares também foram apontadas por Xie *et al.* (2017) - redução de 59% na resistência à tração e 49% no módulo de elasticidade após 30 meses de exposição a

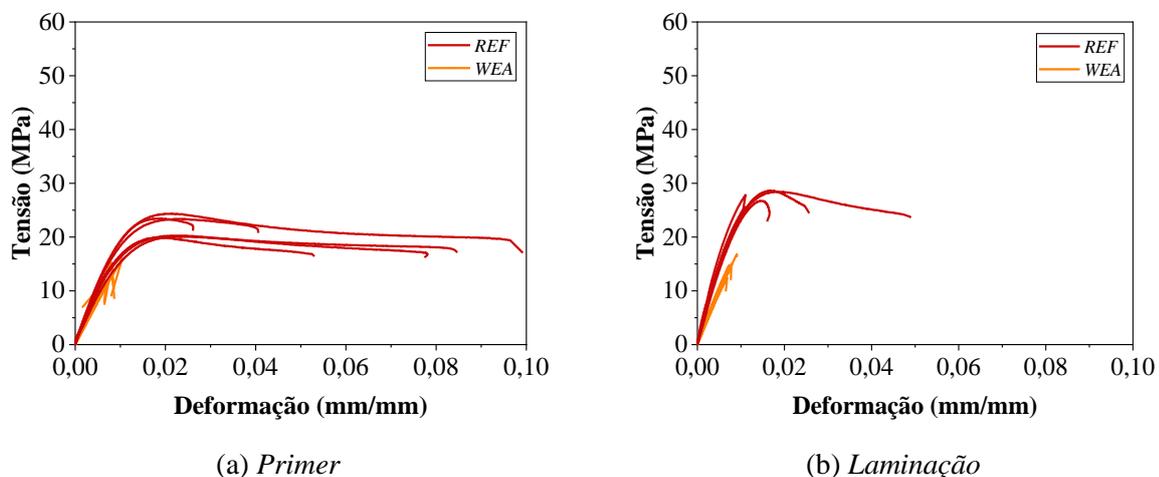
intemperismo e Sarti Júnior (2020) – redução da resistência à tração entre 67 e 69% e redução do módulo de elasticidade entre 14 e 40% após 24 meses de exposição ao intemperismo.

As resinas epoxídicas expostas ao intemperismo estão sujeitas a uma combinação de fatores potencialmente nocivos ao seu comportamento mecânico, dentre eles destaca-se a influência da radiação ultravioleta e a variação de umidade. A degradação dos polímeros quando expostos à radiação UV ocorre por fotodegradação, quebra as ligações químicas entre as cadeias poliméricas (KARBHARI *et al.*, 2003; ZHAO *et al.*, 2017) o que facilita o ingresso de água e umidade na matriz polimérica.

Karbhari *et al.* (2003) destacam que apesar dos efeitos da fotodegradação geralmente atingirem apenas poucos *microns* da superfície exposta, os componentes poliméricos geralmente apresentam uma redução desproporcional de suas propriedades mecânicas.

O efeito do intemperismo na Resina 2 também alterou o comportamento da curva tração *versus* deformação, conforme ilustra a Figura 4.8. O comportamento elasto-plástico dos corpos de prova de referência passou a ser elástico linear, com ruptura frágil após um ano de exposição ao intemperismo.

Figura 4.8: Curvas tensão de tração *versus* deformação para a Resina 2 após exposição ao intemperismo



Fonte: A Autora

Frigione (2018) também constatou que as resinas poliméricas sofrem processo de fragilização após a exposição à radiação UV. Essa fragilização da matriz provoca microfissuração, o que facilita o ataque de outros mecanismos que provocam a degradação das resinas poliméricas, como a água, por exemplo.

Os resultados dos ensaios de tração das resinas epoxídicas mantidas em acondicionamento acelerado e expostas ao intemperismo permitiram concluir que os processos

de degradação, bem como o comportamento das resinas quando expostas a cada condição são distintos. É possível constatar que as resinas passam a apresentar comportamento elasto-plástico após o acondicionamento acelerado, com o módulo de elasticidade sendo a propriedade mecânica mais afetada, enquanto os corpos de prova expostos ao intemperismo passam a apresentar comportamento elástico-linear com ruptura frágil; neste ambiente, a resistência à tração da resina foi a propriedade mecânica mais afetada.

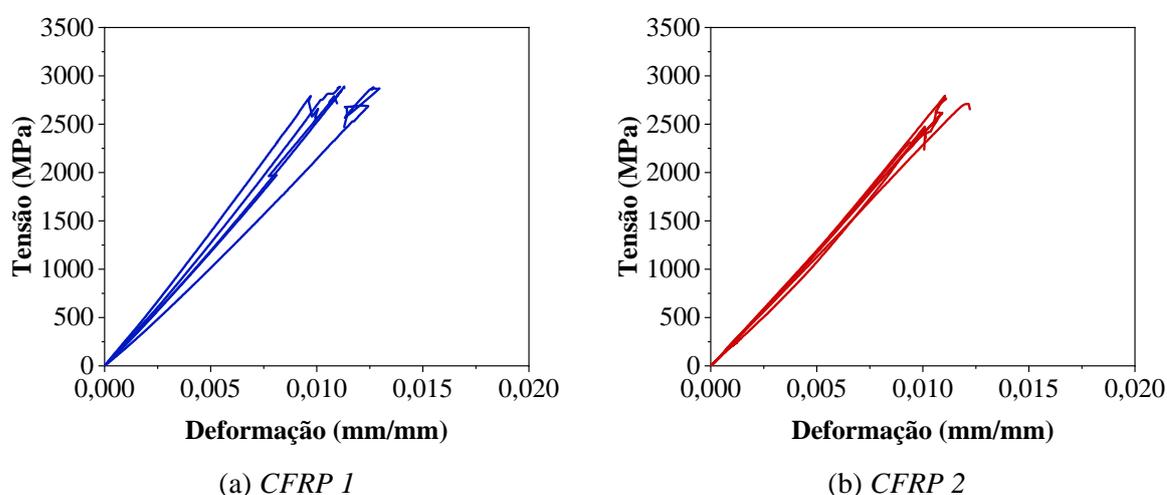
4.1.2 Compósitos de CFRP

Além do comportamento das resinas epoxídicas também foram avaliadas as propriedades mecânicas (tensão de tração máxima, módulo de elasticidade e deformação máxima) de compósitos de fibra de carbono quando mantidos em acondicionamento acelerado e expostos ao intemperismo. O tecido de fibra de carbono unidirecional foi impregnado com cada um dos dois tipos de resina epóxi para laminação (Resina 1 e 2) resultando nos compósitos denominados aqui como CFRP 1 e CFRP 2.

De forma análoga ao processo empregado para os corpos de prova de resina epóxi, os corpos de prova de CFRP também foram ensaiados oito meses após a sua confecção⁸ (REF), ao final de 1000 horas e 3000 horas em acondicionamento acelerado (ACP) e ao final de um ano de exposição ao intemperismo (WEA).

Conforme esperado a curva de tração *versus* deformação para o CFRP teve comportamento elástico linear até a ruptura, Figura 4.9 apresenta essas curvas.

Figura 4.9: Curvas tensão de tração *versus* deformação para os compósitos de CFRP de referência



Fonte: A Autora

Conforme ilustra a Figura 4.9, os valores médios de referência para a resistência à tração e módulo de elasticidade do CFRP 1 foram de 2847,9 MPa e 232,03 GPa, respectivamente. Para o CFRP 2 o valor médio de referência da resistência à tração foi de 2611,49 MPa com módulo de elasticidade médio de 231,96 GPa.

Nesse sentido, uma vez que foi empregado o mesmo tecido de fibra de carbono na preparação dos compósitos de CFRP 1 e 2, alterando-se apenas o tipo de resina para laminação, já era de se esperar semelhança entre as propriedades mecânicas paralelas à direção da fibra para os compósitos de CFRP 1 e 2.

A Tabela 4.3 a seguir traz os principais resultados dos ensaios de tração uniaxial dos compósitos de CFRP 1 e 2. Os valores apresentados na tabela correspondem à média de seis amostras ensaiadas para cada idade e tipo de compósito, sendo os resultados individuais apresentados no Apêndice C.

Tabela 4.3: Resumo dos resultados dos ensaios de tração uniaxial para os compósitos de CFRP

Identificação	Ambiente de exposição	Tensão máxima		Módulo de elasticidade		Deformação máxima	
		Média (MPa)	D.P. (MPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	Média (%)	D.P. (%)
CFRP 1	REF	2847,9	52,95	232,03	23,16	1,14	0,12
	ACP – 1000 h	2724,48	388,69	226,33	6,91	1,11	0,17
	ACP – 3000 h	2950,2	255,26	233,1	21,74	1,17	0,08
	WEA	2531,45	106,58	221,6	25,82	1,09	0,09
CFRP 2	REF	2611,49	133,08	231,96	6,26	1,08	0,04
	ACP – 1000 h	2607,16	184,22	241,28	10,09	1,02	0,07
	ACP – 3000 h	2476,26	293,94	247,31	11,5	0,9	0,11
	WEA	2798,10	152,18	219,38	40,33	1,15	0,09

Nota: D.P. = Desvio Padrão

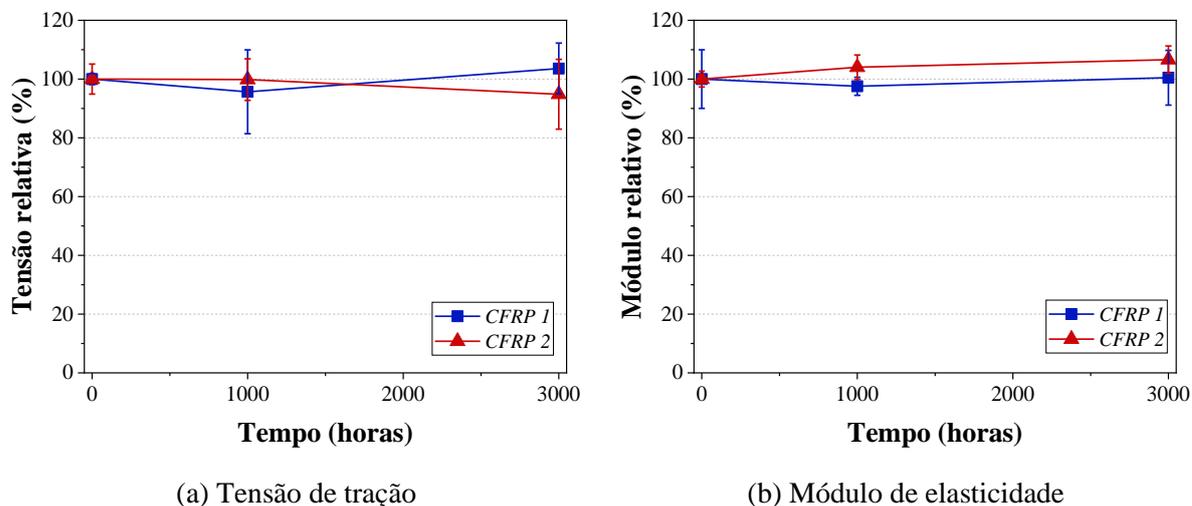
Fonte: A Autora

4.1.2.1 Protocolo de acondicionamento acelerado - ACP

A análise dos resultados apresentados na Tabela 4.3 permite concluir que a exposição dos compósitos de CFRP 1 e 2 ao acondicionamento acelerado não acarreta modificação na resistência à tração máxima ou no módulo de elasticidade.

A Figura 4.10 apresenta os valores relativos para tensão de tração e módulo de elasticidade em relação à média dos ensaios de referência dos compósitos de CFRP.

Figura 4.10: Propriedades mecânicas relativas para os compósitos mantidos em acondicionamento acelerado



Fonte: A Autora

Sciolti, Frigione e Aiello (2010) também constataram que compósitos contendo uma única camada CFRP não apresentam modificação em suas propriedades mecânicas quando submetidos a uma combinação de água e temperatura elevada.

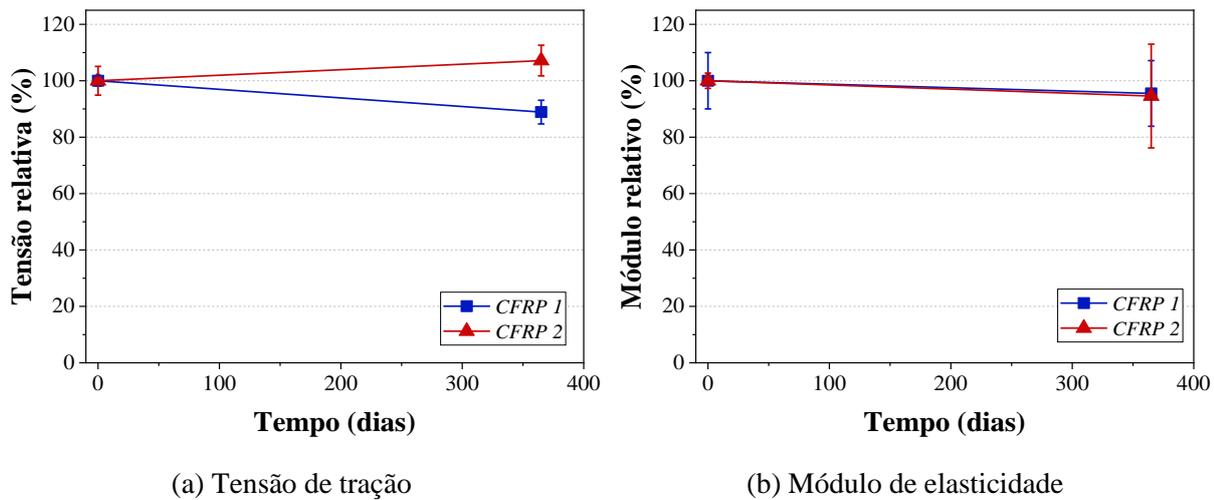
Como a resistência à tração e o módulo de elasticidade (na direção paralela às fibras) do CFRP são propriedades diretamente associadas às características da fibra, era de se esperar que a exposição às condições higrotérmicas não alterasse as propriedades mecânicas do compósito de CFRP uma vez que as fibras de carbono são relativamente inertes à água ou umidade (ISIS, 2006; FIB *Bulletin* 90, 2019).

4.1.2.2 Intemperismo - WEA

Com relação à exposição ao intemperismo, os resultados da Tabela 4.3 permitem concluir que foram observadas pequenas alterações nas propriedades mecânicas dos compósitos de CFRP, destacando-se redução de 11% na tensão máxima de tração para o compósito de CFRP 1.

A Figura 4.11 apresenta os valores relativos para tensão de tração e módulo de elasticidade em relação à média dos ensaios de referência dos compósitos.

Figura 4.11: Propriedades mecânicas relativas para os compósitos expostos ao intemperismo



Fonte: A Autora

Os resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova de CFRP estudados por Xie *et al.* (2017) também apresentaram redução de 10% na tensão de tração ao final de 30 meses de exposição ao intemperismo. Sarti Júnior (2020) também constatou redução de 10% na resistência à tração de corpos de prova de CFRP expostos por um ano ao intemperismo.

Zhao *et al.* (2017) explicam que a redução da resistência à tração e módulo de elasticidade das resinas poliméricas após a exposição à radiação UV afetam a capacidade de transmissão de tensões no FRP o que, conseqüentemente, reduz a capacidade resistente do compósito. Dessa forma, a degradação das propriedades mecânica dos compósitos de FRP devido à exposição à radiação UV podem ser diferentes quando diferentes matrizes poliméricas são empregadas (ZHAO *et al.*, 2017).

Nesse sentido, uma vez que a Resina 1 apresentou as maiores taxas de degradação quando exposta ao intemperismo, conseqüentemente o CFRP 1, cuja matriz polimérica empregada foi a resina para laminação tipo 1, foi o compósito mais afetado, ainda que pouco, pelo intemperismo.

4.1.3 Concreto

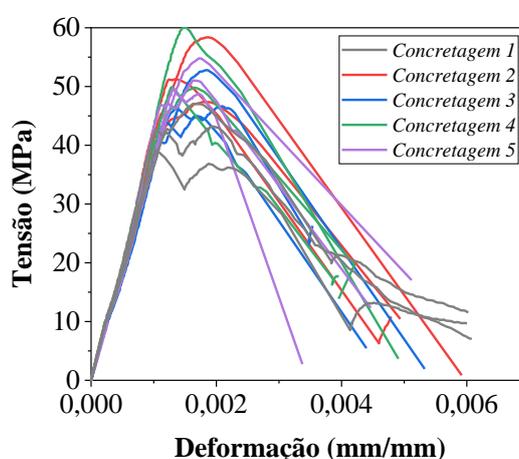
Para cada concretagem, idade e condição de exposição foram realizados ensaios para caracterização mecânica do concreto (resistência à compressão, módulo de elasticidade tangente inicial e resistência à tração por compressão diametral). Conforme destacado no Capítulo 3, apesar de ter sido empregado o mesmo traço, para cada concretagem foram

moldados corpos de prova para caracterização mecânica do concreto.

Todos os modelos e corpos de prova em concreto foram ensaiados um ano e meio após a concretagem (REF)^{6,7,8}, mesma idade de ensaio dos modelos reforçados, ao final de 1000 horas e 3000 horas em acondicionamento acelerado (ACP) e ao final de um ano de exposição ao intemperismo (WEA).

As curvas tensão de compressão *versus* deformação para os corpos de prova de concreto de referência são apresentadas na Figura 4.12, é possível observar para todas as concretagens comportamento elasto-plástico, com deformação de pico em torno dos 0,002 mm/mm.

Figura 4.12: Curvas tensão de compressão *versus* deformação para o concreto referência



Fonte: A Autora

Os valores médios de referência para a Concretagem 1 foram de 43,14 MPa e 41,35 GPa para resistência à compressão e módulo de elasticidade tangente inicial, respectivamente. Para as demais concretagens a tensão máxima de compressão resultou valores entre 48,57 MPa e 53,26 MPa, enquanto o módulo de elasticidade tangente inicial apresentou valores entre 37,7 GPa e 41,35 GPa.

As Tabelas 4.4 e 4.5 a seguir apresentam os principais resultados dos ensaios de compressão uniaxial e de tração por compressão diametral dos corpos de prova de concreto, respectivamente. Os valores apresentados correspondem à média de três corpos de prova ensaiados para cada concretagem e idade de ensaio, sendo os resultados individuais apresentados nos Apêndices D e E.

Tabela 4.4: Resumo dos resultados dos ensaios de compressão uniaxial dos corpos de prova de concreto

Identificação	Ambiente de exposição	Tensão de compressão		Módulo de elasticidade	
		Média (MPa)	D.P. (MPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)
Concretagem 1	REF	43,14	3,96	41,35	1,55
	ACP – 1000 h	51,17	2,68	43,21	1,18
	ACP – 3000 h	51,67	4,58	42,62	4,19
	WEA	57,86	0,9	38,67	2,82
Concretagem 2	REF	52,35	5,59	40,43	1,52
	ACP – 1000 h	50,16	0,82	39,00	3,29
	ACP – 3000 h	53,98	5,43	42,46	1,03
	WEA	48,54	0,77	30,66	2,31
Concretagem 3	REF	48,57	3,67	37,70	1,37
	ACP – 1000 h	51,94	3,13	40,48	1,86
	ACP – 3000 h	51,17	2,46	34,00	2,08
	WEA	50,87	6,63	30,87	1,31
Concretagem 4	REF	53,26	5,9	41,35	1,38
	ACP – 1000 h	56,5	1,59	38,39	1,64
	ACP – 3000 h	52,08	5,22	34,48	0,43
	WEA	47,85	8,15	30,35	3,21
Concretagem 5	REF	51,82	2,66	38,75	2,25
	ACP – 1000 h	53,96	4,68	37,03	3,33
	ACP – 3000 h	50,97	2,59	33,82	1,41
	WEA	53,83	3,49	33,77	1,38

Nota: D.P. = Desvio Padrão

Fonte: A Autora

Os resultados obtidos para a tensão de compressão foram próximos dos obtidos por Leite (2018), cuja resistência à compressão média aos 28 dias foi de 41,66 MPa. Ainda com relação à resistência à compressão média dos concretos é importante observar que a resistência à compressão obtida para as concretagens 2 a 5 resultaram em valores superiores aos 46 MPa e inferiores aos 60 MPa conforme recomenda a ACI 440.9R (2015).

Tabela 4.5: Resumo dos resultados dos ensaios de tração por compressão diametral do concreto

Identificação	Ambiente de exposição	Tensão de tração por compressão diametral	
		Média (MPa)	D.P. (MPa)
Concretagem 1	REF	3,87	0,72
	ACP – 1000 h	3,69	0,31
	ACP – 3000 h	4,17	0,46
	WEA	3,67	0,71
Concretagem 2	REF	3,74	0,22
	ACP – 1000 h	4,00	0,27
	ACP – 3000 h	4,04	1,06
	WEA	3,39	0,37
Concretagem 3	REF	4,06	0,76
	ACP – 1000 h	3,56	0,48
	ACP – 3000 h	3,39	0,38
	WEA	3,53	0,26
Concretagem 4	REF	3,58	0,31
	ACP – 1000 h	3,89	0,73
	ACP – 3000 h	3,97	0,4
	WEA	3,77	0,6
Concretagem 5	REF	3,5	0,57
	ACP – 1000 h	3,97	0,11
	ACP – 3000 h	3,76	0,47
	WEA	3,12	0,3

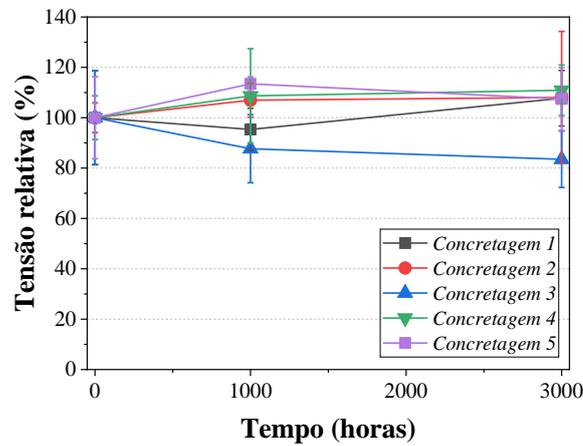
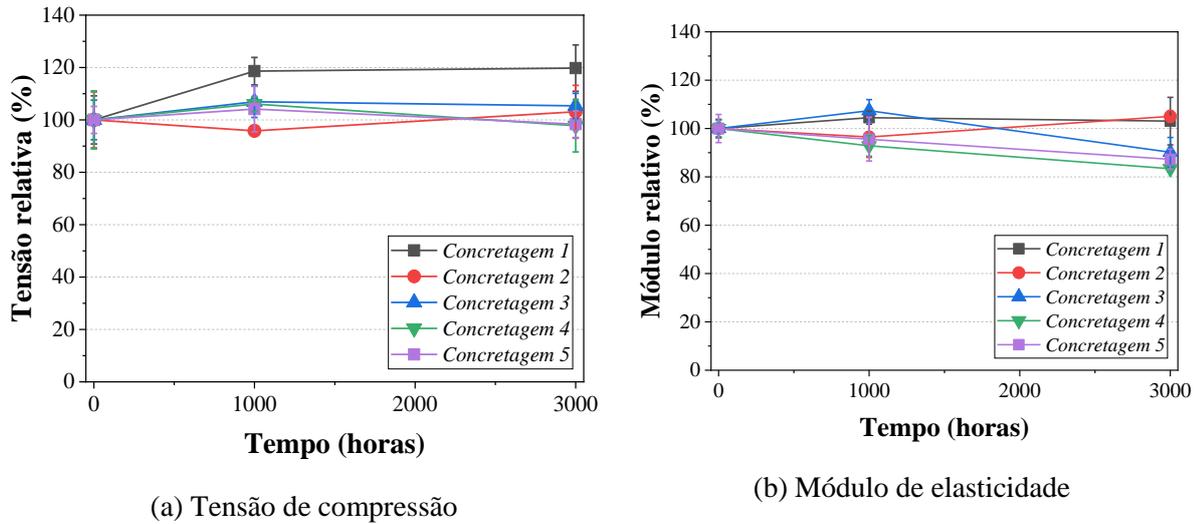
Nota: D.P. = Desvio Padrão

Fonte: A Autora

Para a resistência à tração por compressão diametral, os resultados de referência apresentaram valores entre 4,06 e 3,5 MPa. Considerando a recomendação da ABNT: NBR 6118 (2014) é possível obter a resistência à tração direta multiplicando o resultado obtido para a resistência à tração indireta por 0,9, assim, a resistência à tração direta para os concretos resulta em valores entre 3,7 e 3,15 MPa.

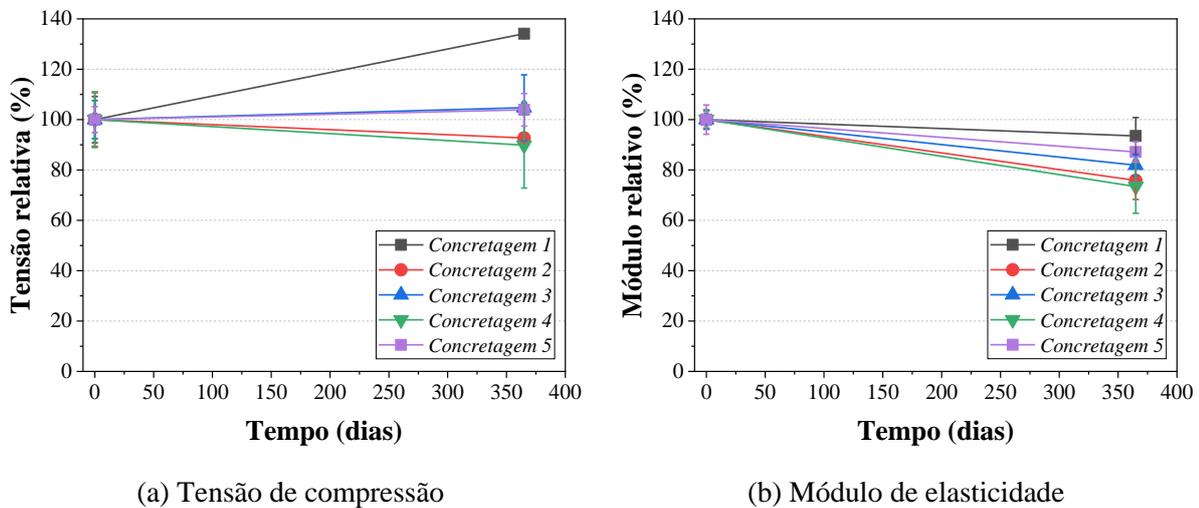
As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam as propriedades mecânicas relativas para o concreto mantido em acondicionamento acelerado e exposto ao intemperismo, respectivamente.

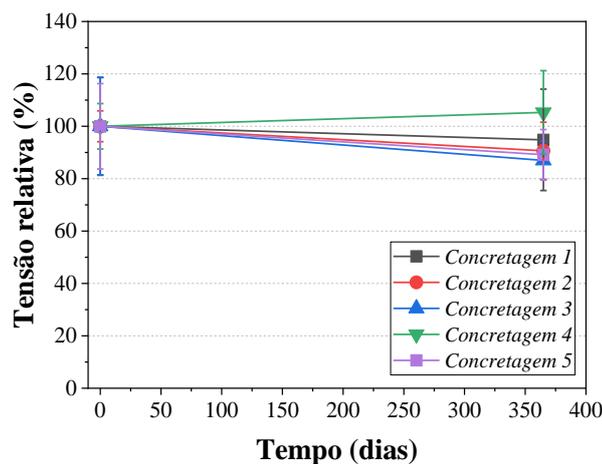
Figura 4.13: Propriedades mecânicas relativas para o concreto mantido em acondicionamento acelerado



Fonte: A Autora

Figura 4.14: Propriedades mecânicas relativas para o concreto exposto ao intemperismo





(c) Tensão de tração

Fonte: A Autora

Conforme ilustram as Figuras 4.13 e 4.14, a exposição tanto ao protocolo de acondicionamento acelerado quanto ao intemperismo acarretou aumento de 20% e 34%, respectivamente, na resistência à compressão dos corpos de prova provenientes da Concretagem 1, enquanto suas demais propriedades mecânicas não apresentaram alteração. Xie *et al.* (2017) observaram aumento de 14% na resistência à compressão do concreto após 30 meses de exposição ao intemperismo; Micelli e Myers (2008) também apontaram acréscimo de 36% na resistência à compressão do concreto ao final de 2000 horas de imersão em água à 20°C.

Para as concretagens 2 a 5, a exposição ao intemperismo causou redução máxima de 27% no módulo de elasticidade à compressão, essa constatação pode estar associada à degradação do concreto sob ação da variação de temperatura e umidade (CHEN *et al.*, 2020).

4.2 Propriedades mecânicas do sistema EBR-FRP

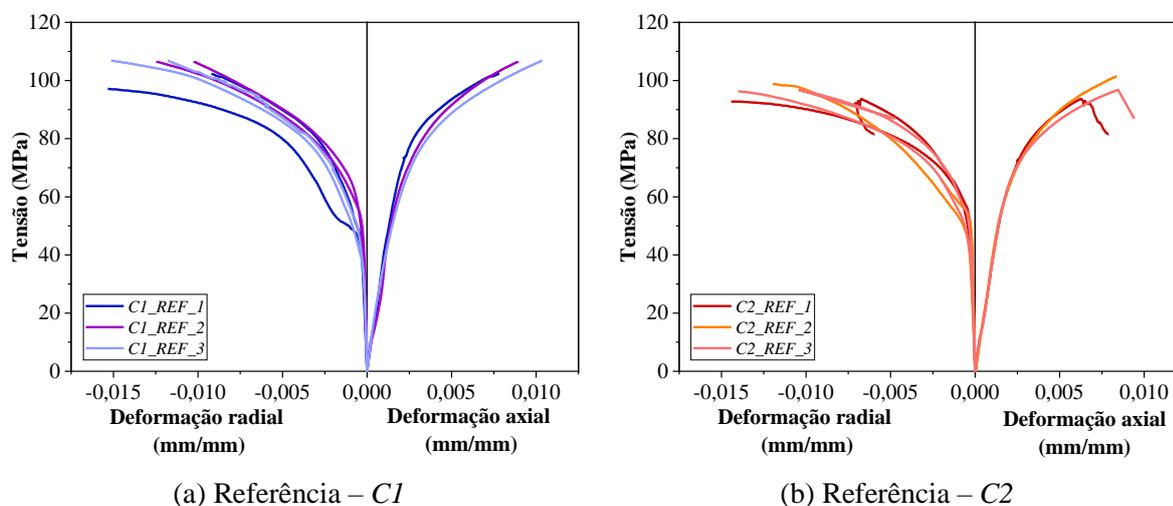
Neste programa foi empregada a seguinte nomenclatura para os ensaios: EN_AMB_ID, onde “E” refere-se ao tipo de ensaio (C – confinamento, B – flexão, S – cisalhamento, P – arrancamento), “N” refere-se ao tipo de resina empregada (1 – resina 1, 2 – resina 2) “AMB” refere-se à condição de exposição (REF – referência – ensaiados oito meses após a execução do reforço^{7,8}, ACP – protocolo de acondicionamento acelerado – ensaiados ao final de 1000h ou 3000h de exposição, WEA – Intemperismo – ensaiados ao final de um anos de exposição) e “ID” refere-se ao número da amostra ensaiada.

4.2.1 Confinamento com FRP

As propriedades mecânicas promovidas pelo confinamento com o sistema EBR-FRP foram avaliadas por meio de ensaios de compressão uniaxial monotônico em corpos de prova cilíndrico reforçados com mantas contínuas de fibra de carbono.

A Figura 4.15 apresenta as curvas tensão de compressão *versus* deformação axial e radial para os corpos de prova de referência confinados com CFRP.

Figura 4.15: Curvas tensão de compressão *versus* deformação para os corpos de prova confinados com CFRP

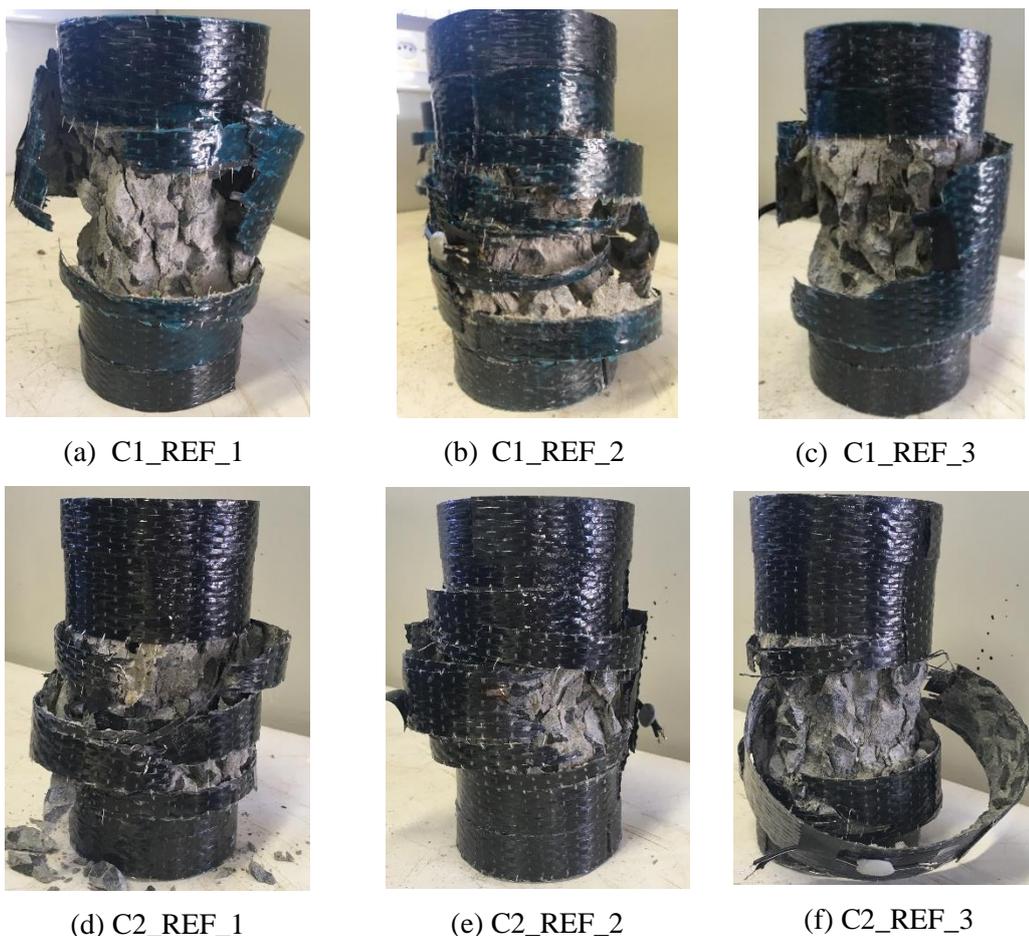


Fonte: A Autora

Da Figura 4.15 observa-se para níveis de tensão inferiores à tensão máxima de compressão do concreto que a curva tensão *versus* deformação axial se assemelha à curva do concreto sem confinamento. Com a elevação nos níveis de tensão a deformação radial aumenta, momento este em que o FRP passa a atuar efetivamente no confinamento do elemento, o que pode ser constatado por meio da curva tensão *versus* deformação axial que passa a apresentar comportamento ascendente até a ruptura da camisa de FRP.

A Figura 4.16 ilustra os corpos de prova de referência após o ensaio, conforme esperado o modo de falha de todos os modelos foi governado pela ruptura do CFRP ocorrendo de maneira brusca e explosiva na região central dos corpos de prova. Os valores médios de referência para a tensão máxima de compressão foram de 105,25 MPa e 97,29 MPa para os corpos de prova confinados com o sistema de reforço 1 e 2, respectivamente.

Figura 4.16: Aspecto dos corpos de confinados com CFRP após ensaio de compressão



Fonte: A Autora

As deformações radiais máximas medidas na camisa de CFRP foram de 0,0124 mm/mm e 0,0117 mm/mm para o sistema de reforço 1 e 2, respectivamente, essas deformações se assemelham às deformações máximas obtidas no ensaio de tração uniaxial dos corpos de prova de CFRP (0,0114 mm/mm e 0,0108 mm/mm, para os CFRP 1 e 2, respectivamente) embora diversos autores apontem que a deformação máxima do FRP não seja alcançada em aplicações que promovem o confinamento de elementos de concreto (LAM; TENG, 2003).

A Tabela 4.6 apresenta os principais resultados dos ensaios de compressão uniaxial dos corpos de prova confinados com CFRP. Os valores apresentados correspondem à média de três modelos, sendo os resultados individuais apresentados no Apêndice F.

Tabela 4.6: Resumo dos resultados de tensão e deformação para os corpos de prova confinados com CFRP

Identificação	Tensão máxima		Deformação axial		Deformação radial		
	Média (MPa)	D.P. (MPa)	Média (%)	D.P. (%)	Média (%)	D.P. (%)	
C1	REF	105,25	2,48	0,9	0,13	1,24	0,11
	ACP – 1000 h	90,45	2,02	0,94	0,04	1,00	0,10
	ACP – 3000 h	95,00	4,94	0,87	0,05	1,05	0,09
	WEA	95,9	7,23	0,7	0,1	0,89	0,2
C2	REF	97,29	3,87	0,79	0,1	1,17	0,06
	ACP – 1000 h	87,11	9,67	0,73	0,1	1,06	0,47
	ACP – 3000 h	94,82	5,18	0,79	0,11	1,09	0,17
	WEA	92,73	4,39	0,63	0,08	1,03	0,3

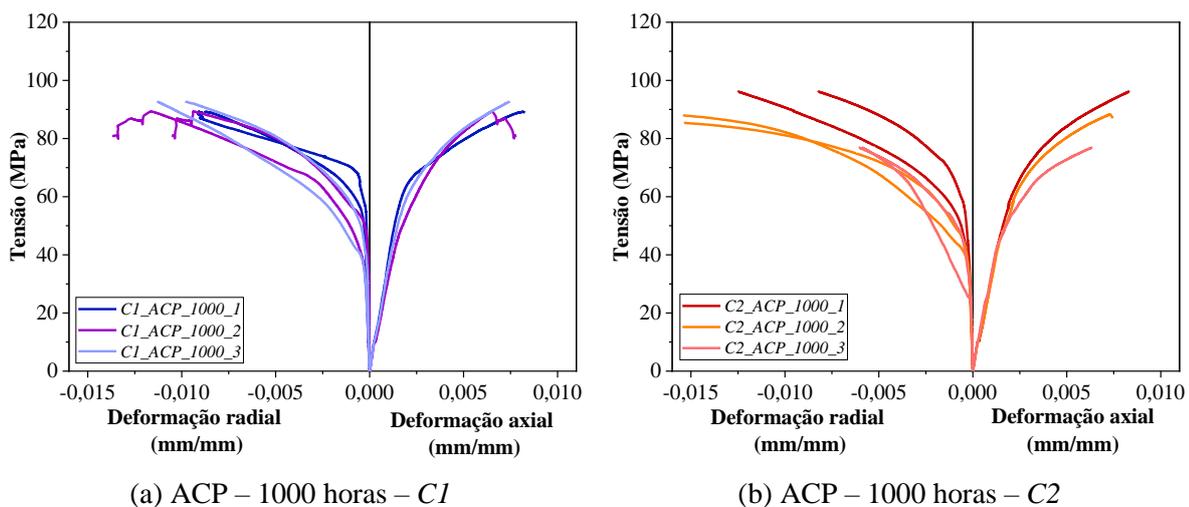
Nota: D.P. = Desvio Padrão

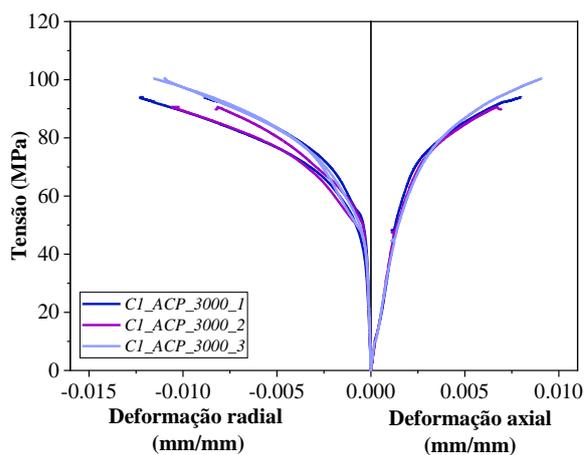
Fonte: A Autora

4.2.1.1 Protocolo de acondicionamento acelerado - ACP

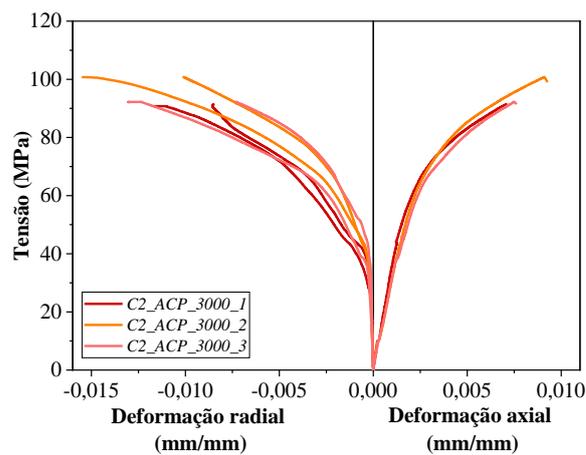
As curvas tensão de compressão *versus* deformação para os corpos de prova expostos ao protocolo de acondicionamento acelerado são apresentadas na Figura 4.17.

Figura 4.17: Curvas tensão de compressão *versus* deformação para os corpos de prova mantidos em acondicionamento acelerado





(c) ACP – 3000 horas – C1



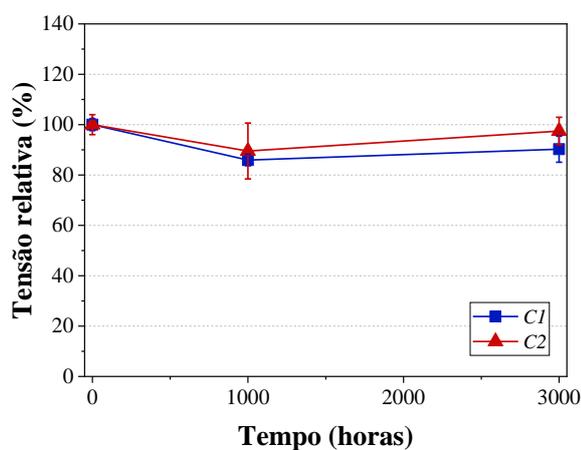
(d) ACP – 3000 horas – C2

Fonte: A Autora

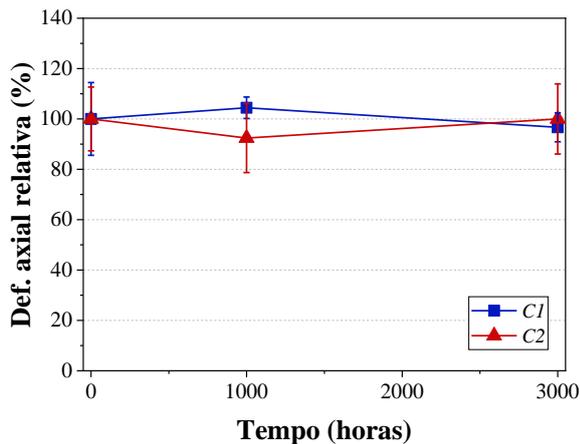
A análise dos gráficos apresentados e dos resultados da Tabelas 4.6 permite a conclusão de que a exposição ao protocolo de acondicionamento acelerado não acarretou modificação no comportamento mecânico dos corpos de prova confinados com CFRP. Os modos de falha observados também não apresentaram nenhuma modificação significativa em comparação com os modos de falha observados nos corpos de prova de referência.

A Figura 4.18 apresenta os valores relativos para tensão de compressão, deformação axial e deformação radial em relação à média dos ensaios de referência. Os valores médios obtidos para os corpos de prova de referência foram considerados como 100%, sendo as demais médias apresentadas como porcentagens desse valor.

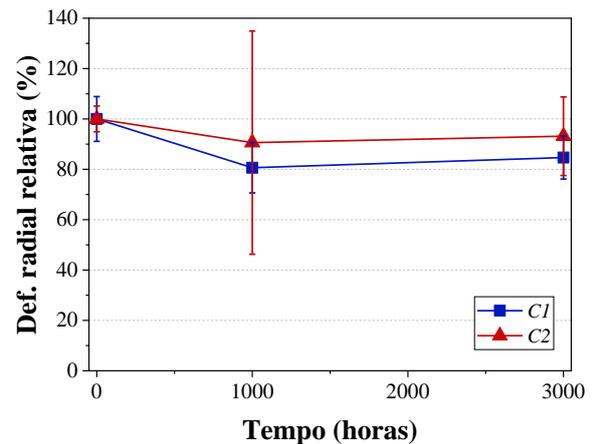
Figura 4.18: Propriedades mecânicas relativas para os corpos de prova confinados com CFRP



(a) Tensão máxima de compressão



(b) Deformação axial máxima



(c) Deformação radial máxima

Fonte: A Autora

Conforme ilustra a Figura 4.18, ao final das 3000 horas de exposição, as reduções observadas para a tensão máxima de compressão foram pequenas, 14% e 10% para os modelos confinados com os sistemas de reforço 1 e 2, respectivamente. Com relação à deformação axial máxima não ocorreram modificações com a exposição ao protocolo de acondicionamento acelerado, enquanto as deformações radiais apresentaram redução de 15% e 7% para os modelos C1 e C2, respectivamente, ao final das 3000 horas de exposição. Nesse caso a redução da tensão máxima dos modelos confinados está diretamente associada à redução da deformação máxima do CFRP.

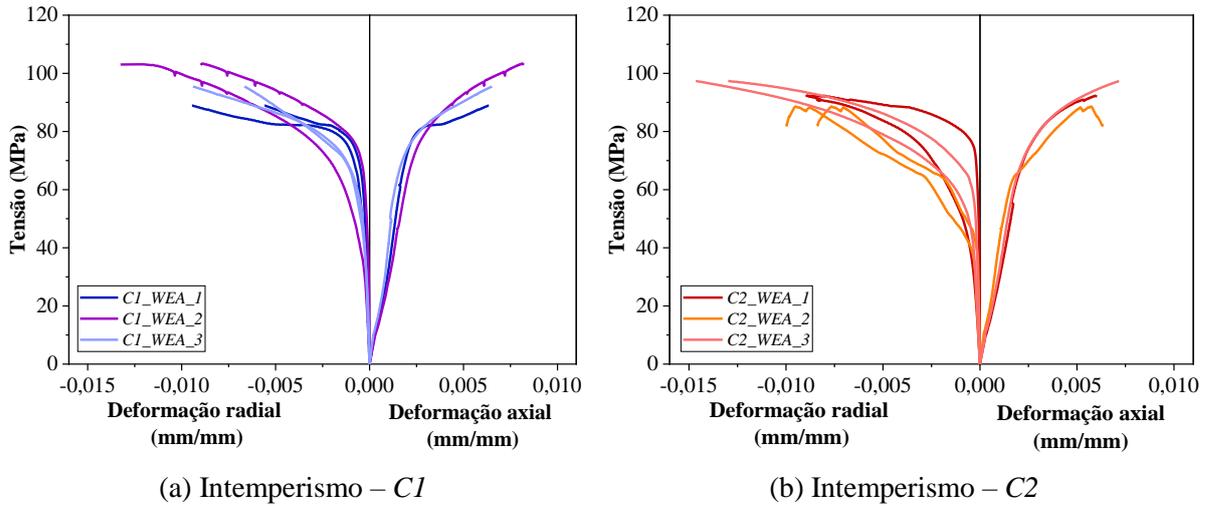
Outros autores também obtiveram resultados similares, Micelli e Myers (2008), por exemplo, mostraram não haver alteração na capacidade resistente de cilindros de concreto reforçados com CFRP quando imersos em solução salina, mas apontaram redução de 28% e 23% nas deformações axiais e radiais, respectivamente.

4.2.1.2 Intemperismo - WEA

Com relação à exposição ao intemperismo, a Figura 4.19 apresenta as curvas tensão de compressão *versus* deformação para os corpos de prova confinados com CFRP ao final de um ano de exposição ao intemperismo enquanto a Figura 4.20 apresenta os valores relativos para tensão de compressão, deformação axial e deformação radial em relação à média dos ensaios de referência.

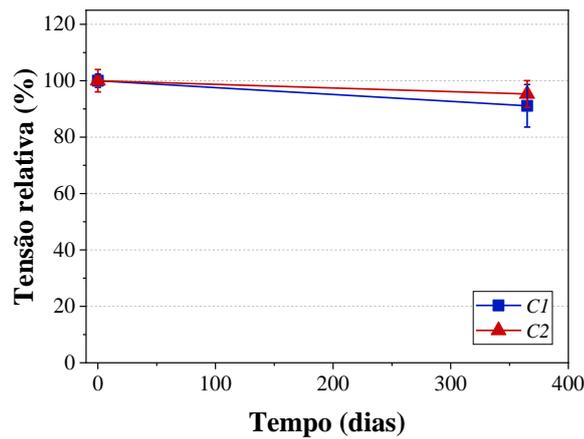
Todos os modelos ensaiados ao final de um ano falharam por ruptura da camisa de CFRP, modo de falha similar ao observado para os modelos de referência.

Figura 4.19: Curvas tensão de compressão *versus* deformação para os corpos de prova confinados com CFRP

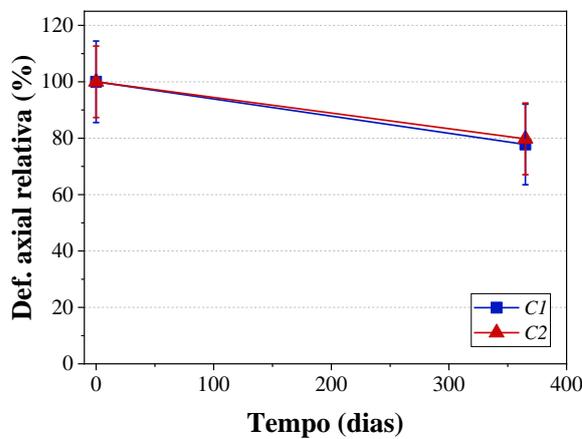


Fonte: A Autora

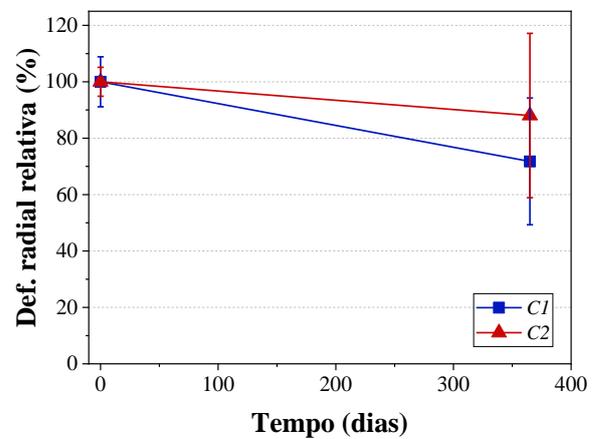
Figura 4.20: Propriedades mecânicas relativas para os corpos de prova confinados com CFRP



(a) Tensão máxima de compressão



(b) Deformação axial máxima



(c) Deformação radial máxima

Fonte: A Autora

Observa-se na Figura 4.20 (a) que ao final de um ano de exposição ao intemperismo a tensão máxima de compressão dos modelos confinados não apresentou modificação quando comparada com a tensão máxima atingida pelos modelos de referência. Analisando a Figura 4.20 (b) e (c), a exposição ao intemperismo provocou redução de 22% e 20% na deformação axial dos modelos reforçados com os sistemas 1 e 2, respectivamente, e redução de 28% e 12% na deformação radial para os modelos C1 e C2.

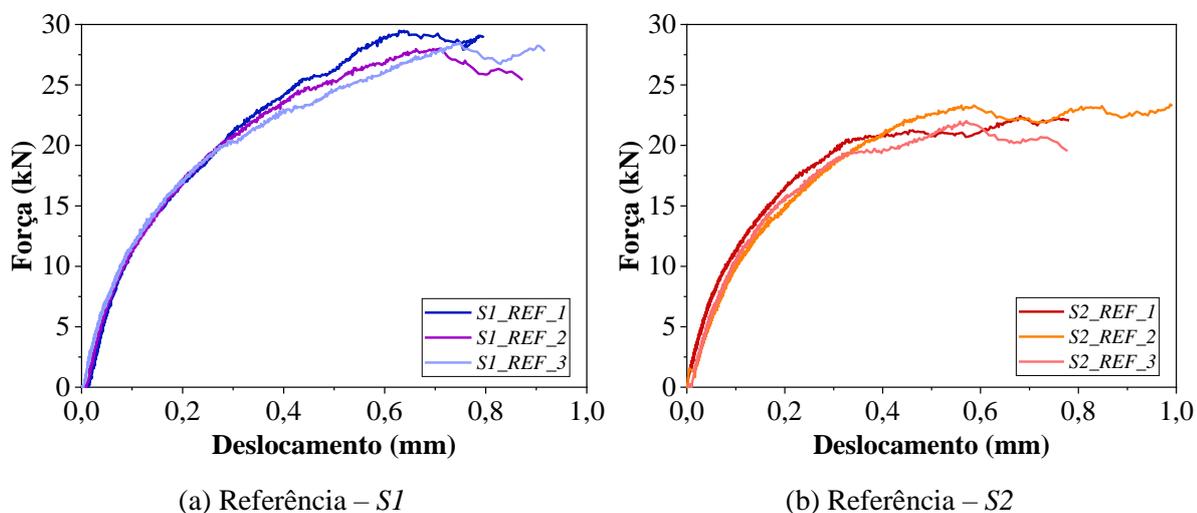
Xie *et al.* (2017) também apontaram redução de 12% na deformação máxima radial para corpos de prova confinados com uma camada de CFRP e expostos por 30 meses ao intemperismo.

Em resumo, as diferentes condições de exposição não acarretaram modificações substanciais em termos de capacidade de carga dos corpos de prova de concreto confinados com CFRP, essa constatação já era esperada uma vez que os compósitos de CFRP não apresentaram modificação em suas propriedades mecânicas quando expostos às mesmas condições. Ao final de ambas as condições de exposição destacou-se a redução das deformações radiais dos modelos quando comparadas às deformações dos modelos de referência.

4.2.2 Cisalhamento FRP-concreto

Para avaliar a aderência entre a manta de CFRP e o substrato de concreto foram realizados ensaios do tipo *double-shear*. A Figura 4.21 apresenta as curvas força *versus* deslocamento para os modelos de referência.

Figura 4.21: Curvas força *versus* deslocamento para os modelos referência

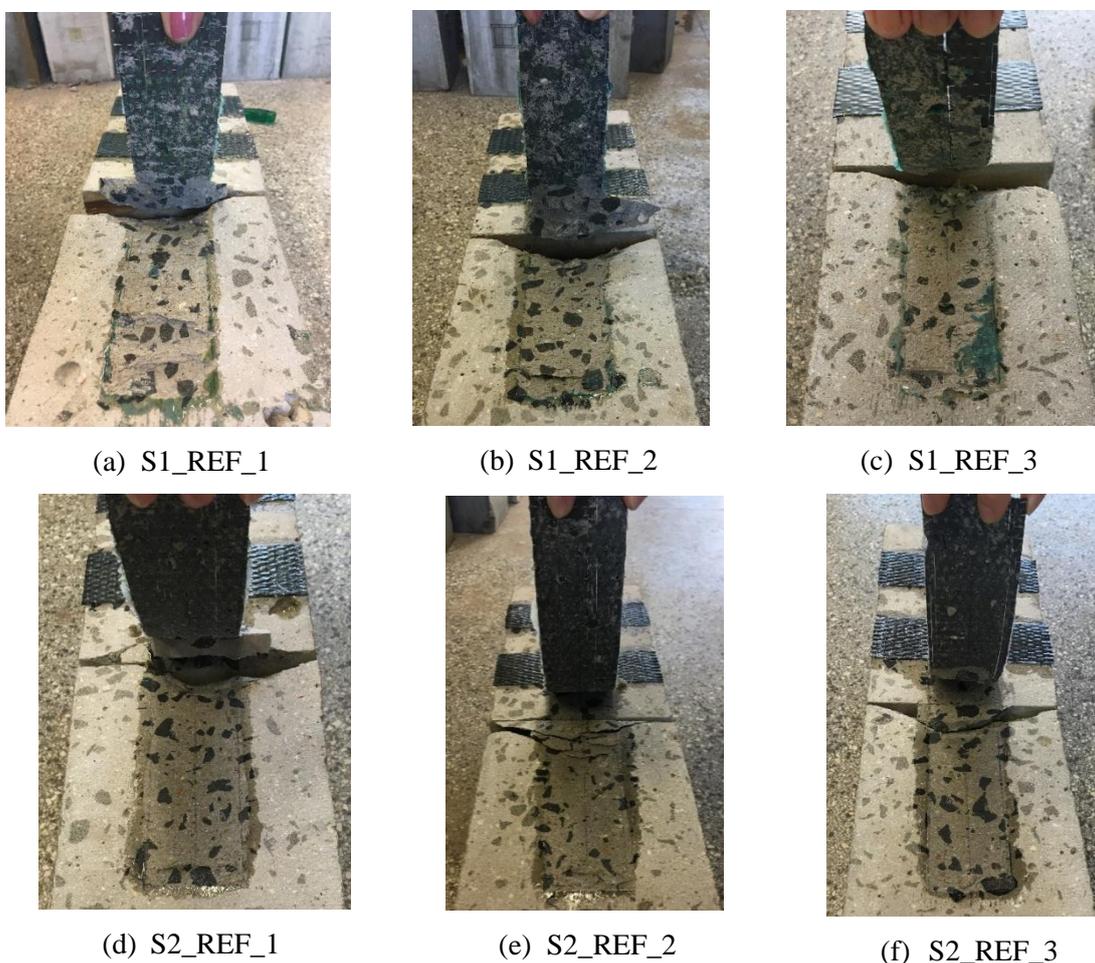


Fonte: A Autora

Na Figura 4.21 a força corresponde ao carregamento resistido pelas duas faixas de manta de CFRP simétricas aderidas ao modelo e o deslocamento apresentado corresponde ao deslizamento da manta na extremidade carregada do CFRP, aferida por meio dos LVDTs.

Todos os modelos ensaiados falharam pelo completo descolamento de uma das fixas de manta de FRP do substrato de concreto conforme ilustra a Figura 4.22. Nos modelos S1 a falha ocorre na interface concreto-adesivo, sendo possível notar o destacamento parcial do substrato de concreto enquanto nos modelos S2 a falha acontece na interface FRP-adesivo sem a constatação de desprendimento de concreto na manta de CFRP.

Figura 4.22: Modos de falha observados para os modelos ensaiados ao cisalhamento



Fonte: A Autora

Apesar de uma grande quantidade de autores apontar modos de falha ocorrendo de forma coesiva no concreto como os modos de falha típicos (BENZARTI *et al.*, 2011; CERONI *et al.*, 2018), o emprego de um concreto com resistência à compressão mais elevada e com menor porosidade reduz a profundidade de penetração do *primer* na superfície do concreto, causando

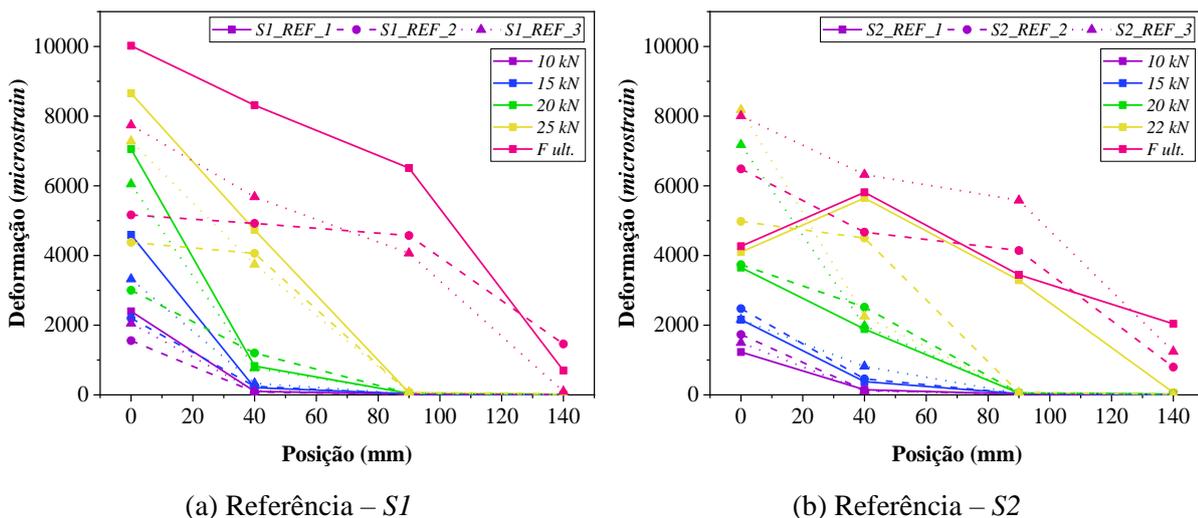
assim a propagação da falha no adesivo ou na região de interface (SHRESTHA; UEDA; ZHANG, 2015).

A análise dos gráficos apresentados na Figura 4.21 permite constatar que os modelos S1 apresentam maior rigidez em comparação com os modelos S2, com força última resistida de 27,42 kN e 21,63 kN para os modelos S1 e S2, respectivamente. Assim, tendo em vista que não houve modificação nas propriedades mecânicas do concreto empregado na confecção de ambos os modelos, fica evidente a influência do tipo de resina na aderência FRP-concreto.

As curvas força *versus* deslocamento (Figura 4.21) apresentaram comportamento típico para o ensaio realizado, no primeiro trecho das curvas pode-se perceber que a força resistida pelo modelo aumenta com o aumento do deslocamento aplicado no FRP, a partir de um certo ponto o aumento do deslocamento no FRP não altera a força resistida. O trecho da curva onde os deslocamentos evoluem consideravelmente para um pequeno aumento no valor da força corresponde à redistribuição das tensões de cisalhamento ao longo do comprimento do FRP.

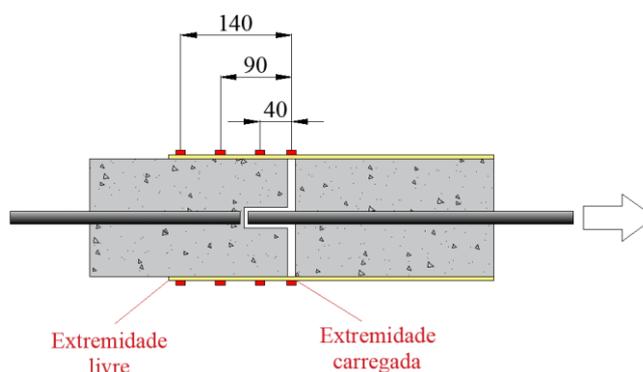
A Figura 4.23 traz a distribuição das deformações ao longo do comprimento do FRP para diferentes níveis de carregamento. Neste caso, a distância zero corresponde à extremidade carregada do CFRP, enquanto a distância 140 mm corresponde à posição em que foi instalado o último extensômetro (Figura 4.24). A distribuição de deformações apresentada corresponde à manta de FRP que descolou ao final do ensaio.

Figura 4.23: Distribuição das deformações ao longo do comprimento do FRP



Fonte: A Autora

Figura 4.24: Distância dos extensômetros em relação à extremidade carregada (dimensões em mm)



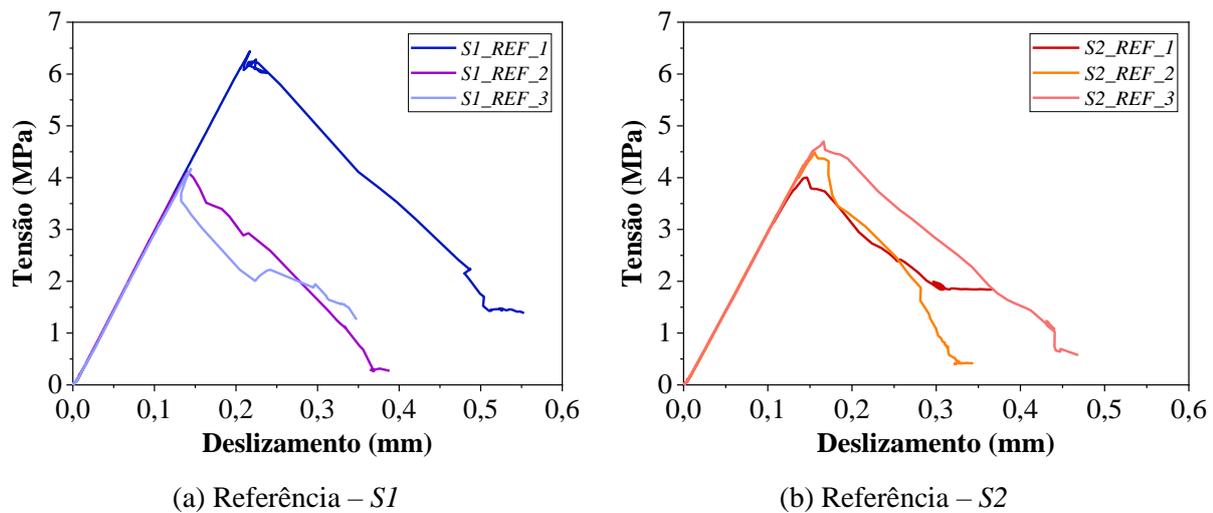
Fonte: A Autora

As deformações máximas na manta de CFRP aferidas no extensômetro mais central foram de 0,0076 mm/mm e 0,0063 mm/mm para o sistema de reforço 1 e 2, respectivamente. Essas deformações, apesar de inferiores às deformações obtidas do ensaio de tração uniaxial dos corpos de prova de CFRP (0,0114 mm/mm e 0,0108 mm/mm, para os CFRP 1 e 2, respectivamente) já são esperadas em aplicações cuja aderência entre o FRP e o substrato de concreto são críticas (ACI 440.2R, 2017; FIB *Bulletin* 90, 2019).

Ainda com base nas deformações ao longo do comprimento do manta de FRP (Figura 4.23) é possível notar que para carregamento inferior a 20 kN as deformações no extensômetro central (posicionado na extremidade carregada) aumentam com o aumento do carregamento enquanto as deformações computadas no extensômetro posicionado a 140 mm são próximas de zero. Esse fato evidencia que apenas 90 mm dos 150 mm de CFRP estão efetivamente resistindo a esse nível de carregamento.

Com o aumento do carregamento a deformação no extensômetro central tende a se estabilizar, enquanto as deformações nos demais extensômetros passam a aumentar o que está associado ao início do descolamento e transferência das tensões de cisalhamento ao longo do comprimento do CFRP.

A seguir, na Figura 4.25 são apresentadas as curvas tensão de cisalhamento *versus* deslizamento na interface FRP-concreto. A tensão de cisalhamento apresentada corresponde à tensão em um ponto central na manta de CFRP, aferida no intervalo entre os extensômetros posicionados à 40 mm e à 90 mm da extremidade carregada (Figura 4.24). Os resultados apresentados correspondem à faixa de manta que se desprende totalmente ao final do ensaio.

Figura 4.25: Curvas tensão de cisalhamento *versus* deslizamento

Fonte: A Autora

Conforme esperado as curvas para tensão de cisalhamento *versus* deslizamento apresentaram comportamento semelhante ao ilustrado na Figura 2.19, que consiste em um primeiro trecho ascendente até que a tensão máxima de cisalhamento seja atingida, a partir desse ponto a curva apresenta comportamento descendente podendo ser curvo ou linear até atingir a tensão de cisalhamento zero para um determinado deslizamento.

Os resultados médios para a tensão de cisalhamento máxima foram de 4,91 MPa e 4,4 MPa para os modelos S1 e S2, respectivamente. Para a energia de fratura (área abaixo da curva tensão de cisalhamento *versus* deslizamento) foram obtidos valores médios de 1,16 MPa.mm e 0,95 MPa.mm para os modelos S1 e S2.

Outros autores também obtiveram resultados similares, Mukhtar (2019), por exemplo, realizou ensaio de cisalhamento duplo e encontrou valor médio de 4,29 MPa para a tensão de cisalhamento entre mantas de CFRP e concreto (com resistência à compressão de 45 MPa).

Vale destacar aqui que o tipo de ensaio – cisalhamento simples, duplo, flexão - (AIELLO; LEONE, 2008), as propriedades mecânicas do concreto e do sistema de reforço (SHRESTHA; UEDA; ZHANG, 2015), a dimensão máxima do agregado (YUAN *et al.*, 2019) e o tipo de tratamento superficial (abrasão, jato de areia, apicoamento, etc) (CHEN *et al.*, 2019) influenciam nos resultados experimentais para a tensão de cisalhamento na interface FRP-concreto.

As Tabelas 4.7 e 4.8 resumem os principais resultados dos ensaios de cisalhamento. Os valores apresentados correspondem à média de três modelos ensaiados para cada idade e tipo de reforço, sendo os resultados individuais apresentados no Apêndice G.

Tabela 4.7: Resumo dos resultados experimentais para força última e deformação máxima no CFRP

Identificação	Força última		Deformação máxima no CFRP		
	Média (kN)	D.P. (kN)	Média (%)	D.P. (%)	
S1	REF	27,42	1,86	0,76	0,24
	ACP – 1000 h	21,79	0,91	0,50	0,33
	ACP – 3000 h	20,66	1,47	0,54	0,14
	WEA	26,10	1,75	0,67	0,14
S2	REF	21,63	1,89	0,63	0,19
	ACP – 1000 h	16,65	0,41	0,47	0,11
	ACP – 3000 h	14,28	0,36	0,37	0,10
	WEA	19,05	1,49	0,37	0,09

Nota: D.P. = Desvio Padrão

Fonte: A Autora

Tabela 4.8: Resumo dos resultados para tensão de cisalhamento máxima, deslizamento inicial e energia de fratura na interface FRP-concreto

Identificação	Tensão máxima		Deslizamento inicial		Energia de fratura		
	Média (MPa)	D.P. (MPa)	Média (mm)	D.P. (mm)	Média (MPa.mm)	D.P. (MPa.mm)	
S1	REF	4,91	1,33	0,17	0,05	1,16	0,67
	ACP – 1000 h	3,88	1,21	0,16	0,05	0,85	0,65
	ACP – 3000 h	2,58	0,83	0,12	0,03	0,41	0,18
	WEA	3,96	0,01	0,19	0,04	0,99	0,06
S2	REF	4,40	0,36	0,16	0,01	0,95	0,21
	ACP – 1000 h	2,83	0,21	0,10	0,01	0,36	0,06
	ACP – 3000 h	1,90	0,52	0,07	0,02	0,21	0,12
	WEA	2,87	0,04	0,11	0,00	0,36	0,08

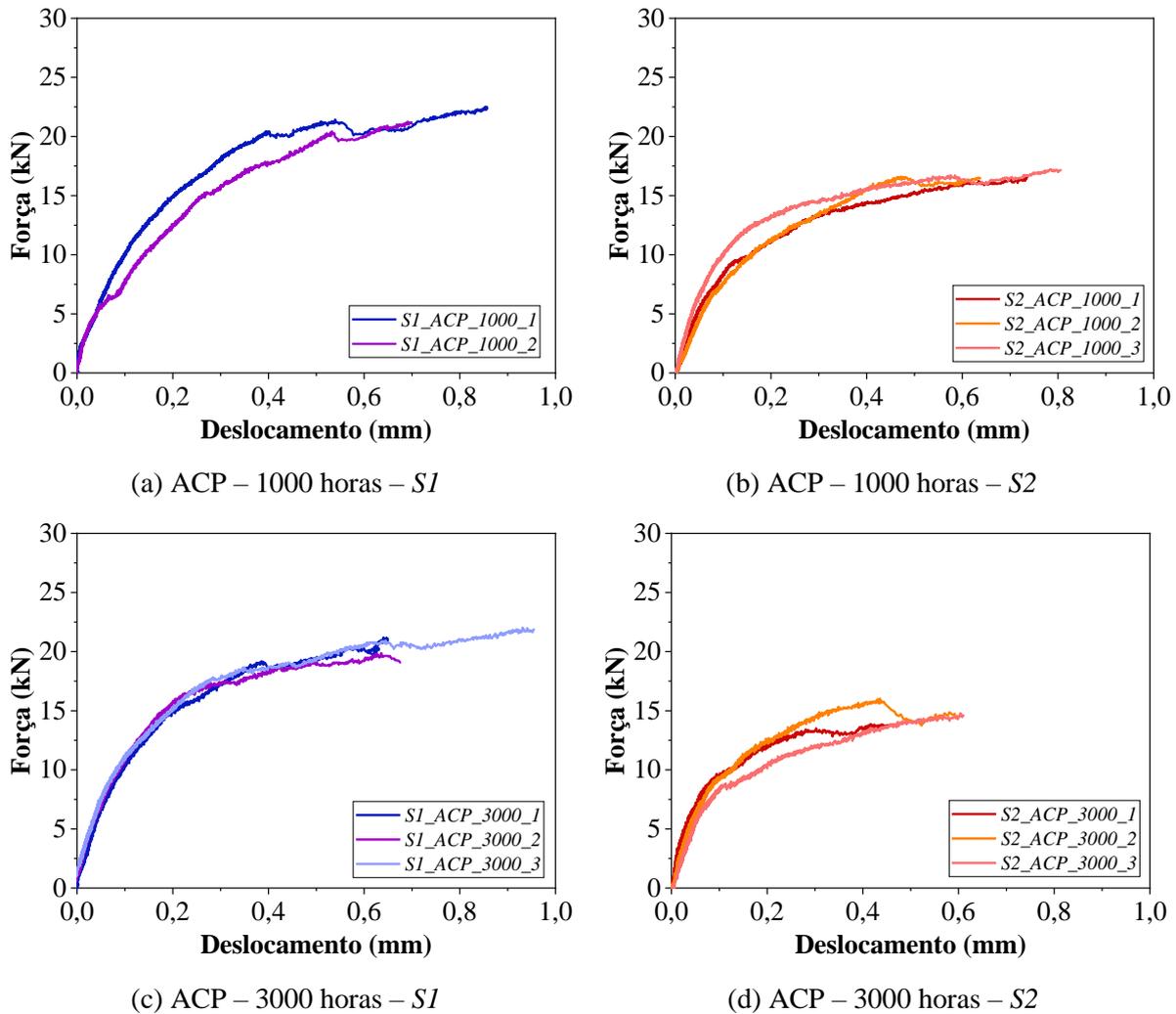
Nota: D.P. = Desvio Padrão

Fonte: A Autora

4.2.2.1 Protocolo de acondicionamento acelerado - ACP

A Figura 4.26 apresenta as curvas força *versus* deslocamento para os modelos ensaiados ao final de 1000 horas e 3000 horas de exposição ao protocolo de acondicionamento acelerado.

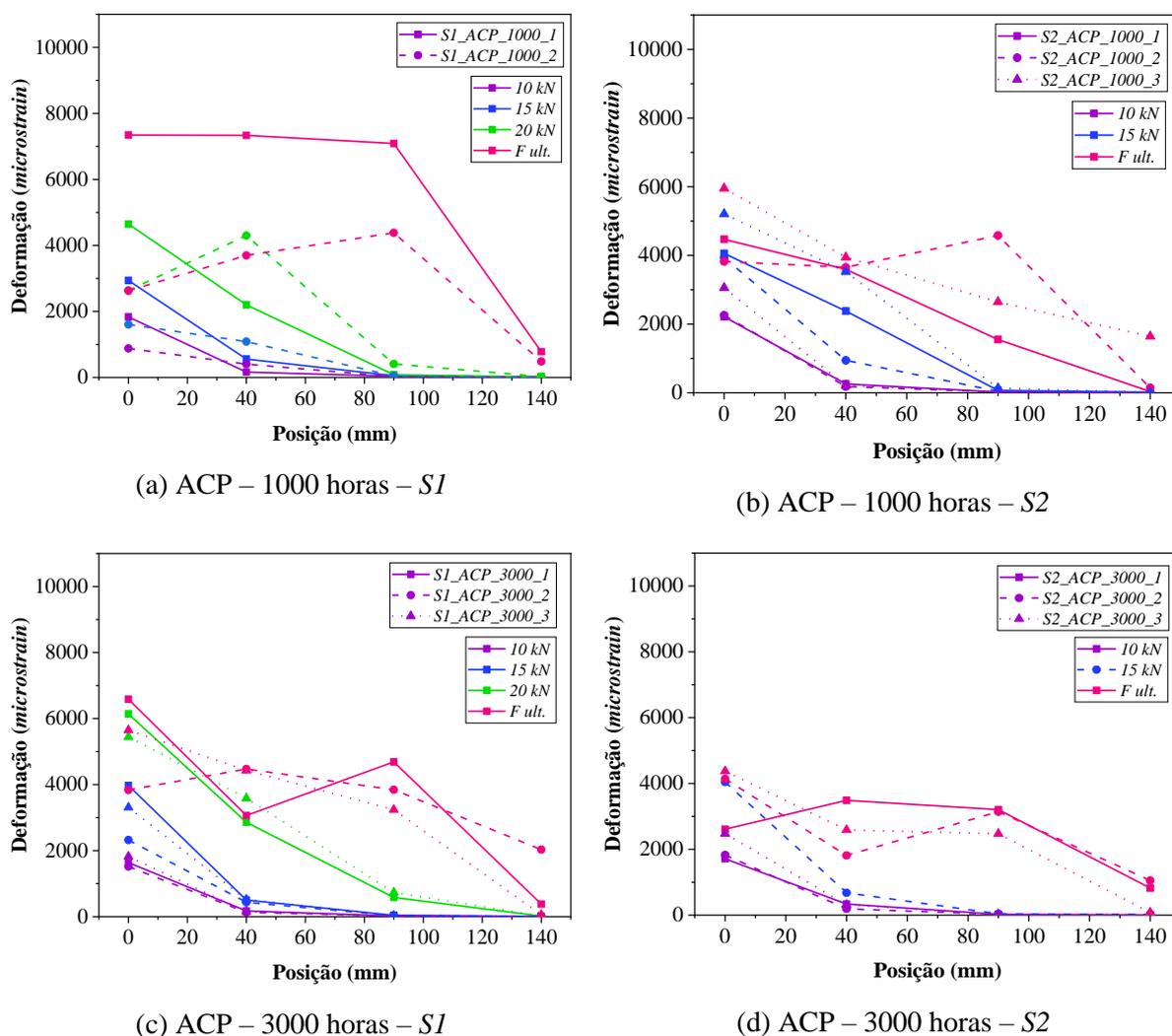
Figura 4.26: Curvas força *versus* deslocamento para os modelos mantidos em acondicionamento acelerado



Fonte: A Autora

Considerando a possível redistribuição das tensões de cisalhamento ao longo do comprimento do FRP a Figura 4.27 traz a distribuição das deformações em alguns pontos do comprimento do FRP para diferentes níveis de carregamento.

Figura 4.27: Distribuição das deformações ao longo do comprimento do FRP para os modelos mantidos em acondicionamento acelerado

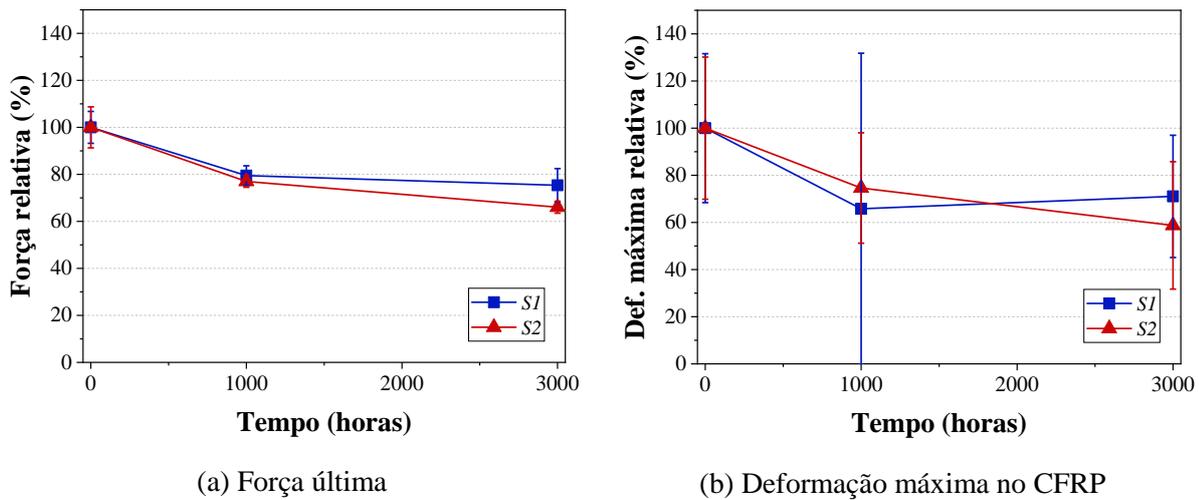


Fonte: A Autora

A análise dos gráficos e dos resultados apresentados na Tabela 4.7 evidencia que a exposição ao protocolo de acondicionamento acelerado reduziu a capacidade resistente dos modelos e a deformação máxima atingida no CFRP.

A Figura 4.28 apresenta os valores relativos para força última e deformação máxima no CFRP em relação à média dos ensaios de referência. Os valores médios obtidos para os corpos de prova de referência foram considerados como 100%, sendo as demais médias apresentadas como porcentagens desse valor.

Figura 4.28: Propriedades mecânicas relativas para os modelos ensaiados ao cisalhamento



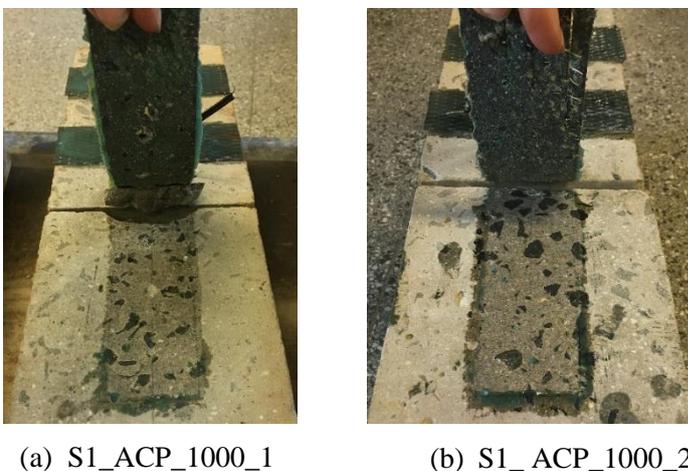
Fonte: A Autora

Ao final de 3000 horas de exposição verifica-se redução de 25% e 34% na capacidade resistente dos modelos S1 e S2, respectivamente, enquanto a deformação máxima no CFRP apresentou redução de 29% e 41% para os modelos S1 e S2, respectivamente. Com relação à Figura 4.28, constata-se ainda uma tendência de estabilização tanto da força última quanto da deformação máxima após as 1000 horas de exposição.

Mukhtar e Peiris (2021) apontaram redução de 16% na capacidade resistente de modelos ensaiados ao cisalhamento após 5 semanas imersos em água com temperatura de 60°C, além de modificação nos modos de falha de coesivo para adesivo após a exposição.

Nesse sentido a Figura 4.29 apresenta os modos de falha observados após a exposição ao protocolo de acondicionamento acelerado.

Figura 4.29: Modos de falha observados para os modelos ensaiados ao cisalhamento





(c) S2_ACP_1000_1



(d) S2_ACP_1000_2



(e) S2_ACP_1000_3



(f) S1_ACP_3000_1



(g) S1_ACP_3000_2



(h) S1_ACP_3000_3



(i) S2_ACP_3000_1



(j) S2_ACP_3000_2



(k) S2_ACP_3000_3

Fonte: A Autora

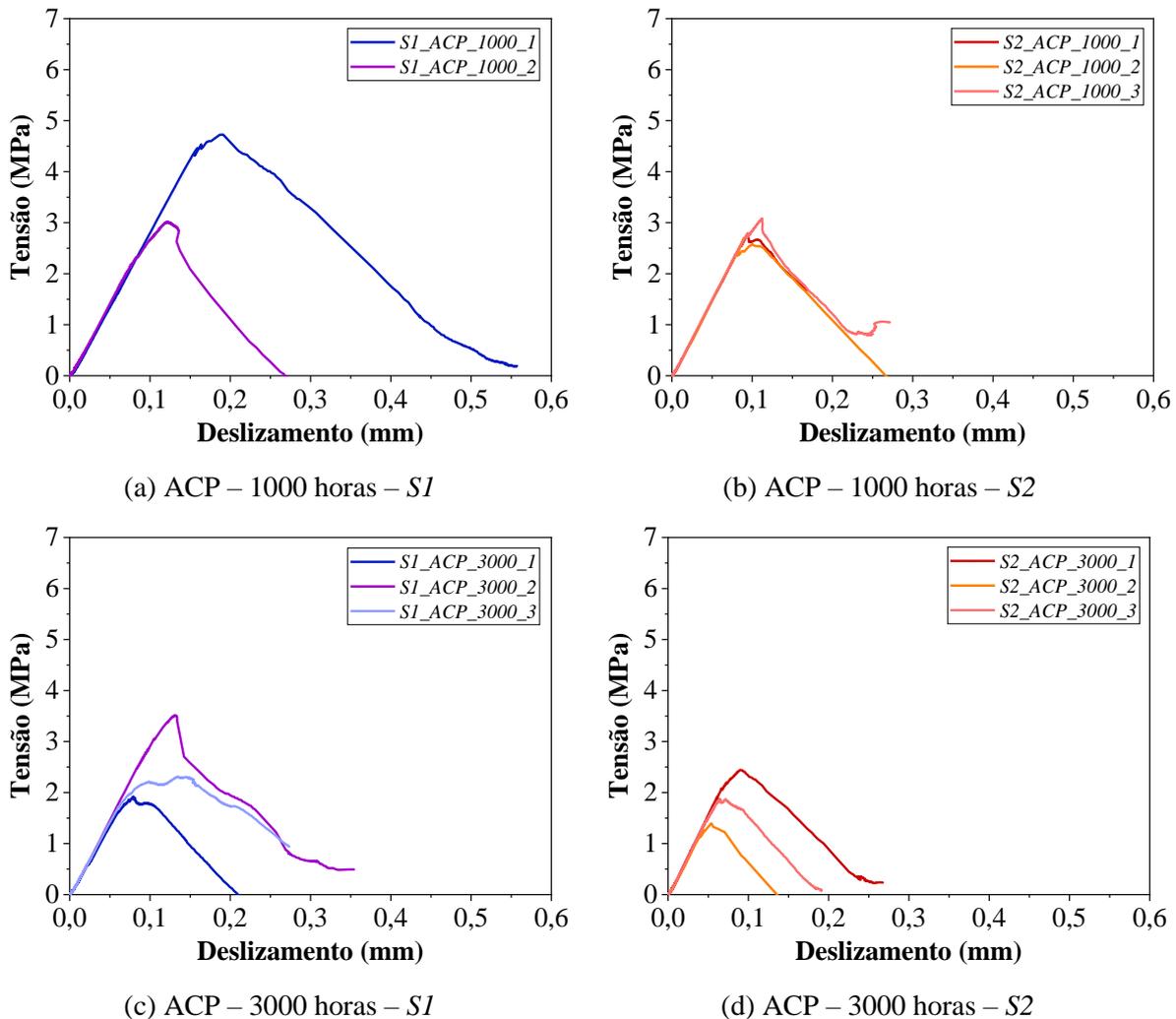
Todos os modelos falharam por descolamento de uma das faixas de FRP do substrato de concreto. Os modos de falha apresentados se caracterizam como adesivos, com falha ocorrendo na interface FRP-adesivo, sem despreendimento de concreto na manta. Comparando a Figura 4.22 e 4.29 fica evidente ainda a modificação do modo de falha observado para os modelos S1 após a exposição ao protocolo de acondicionamento acelerado.

Tendo em vista que as propriedades mecânicas do concreto empregado nos modelos aqui avaliados não apresentaram modificação e que todos os modelos passaram pela mesma preparação superficial, fica evidente a influência das propriedades mecânicas da resina epóxi na durabilidade da interface FRP-concreto.

Para uma melhor compreensão do comportamento mecânico das tensões atuando na interface FRP-concreto, a Figura 4.30 traz as curvas tensão de cisalhamento *versus* deslizamento para os modelos expostos ao protocolo de acondicionamento acelerado.

Comparando-se as curvas apresentadas na Figura 4.30 com as curvas da Figura 4.25 fica clara a redução tanto da tensão máxima de cisalhamento quanto da energia de fratura da interface FRP-concreto.

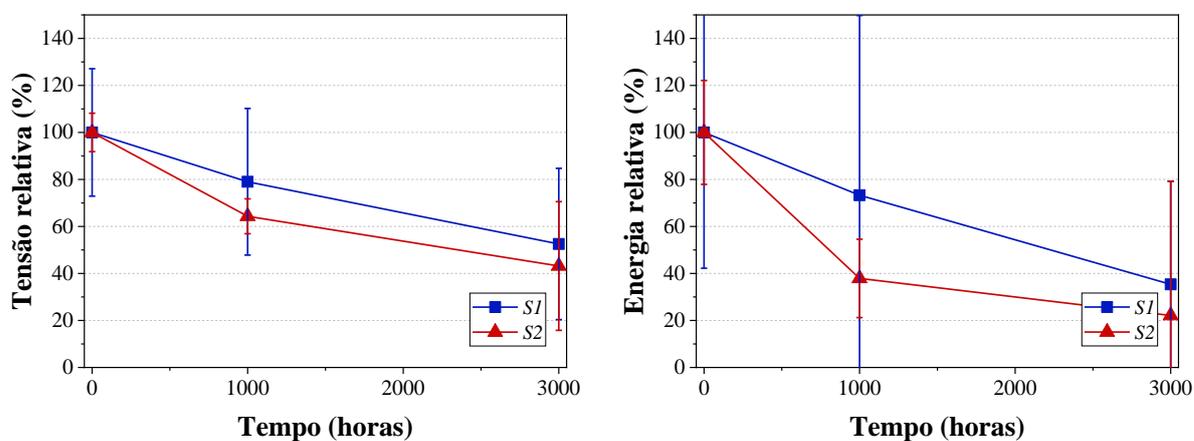
Figura 4.30: Curvas tensão de cisalhamento *versus* deslizamento para os modelos mantidos em acondicionamento acelerado



Fonte: A Autora

A Figura 4.31 a seguir apresenta os valores relativos para tensão de cisalhamento e energia de fratura em relação à média dos ensaios de referência.

Figura 4.31: Propriedades mecânicas relativas para os modelos ensaiados ao cisalhamento



(a) Tensão de cisalhamento máxima

(b) Energia de fratura

Fonte: A Autora

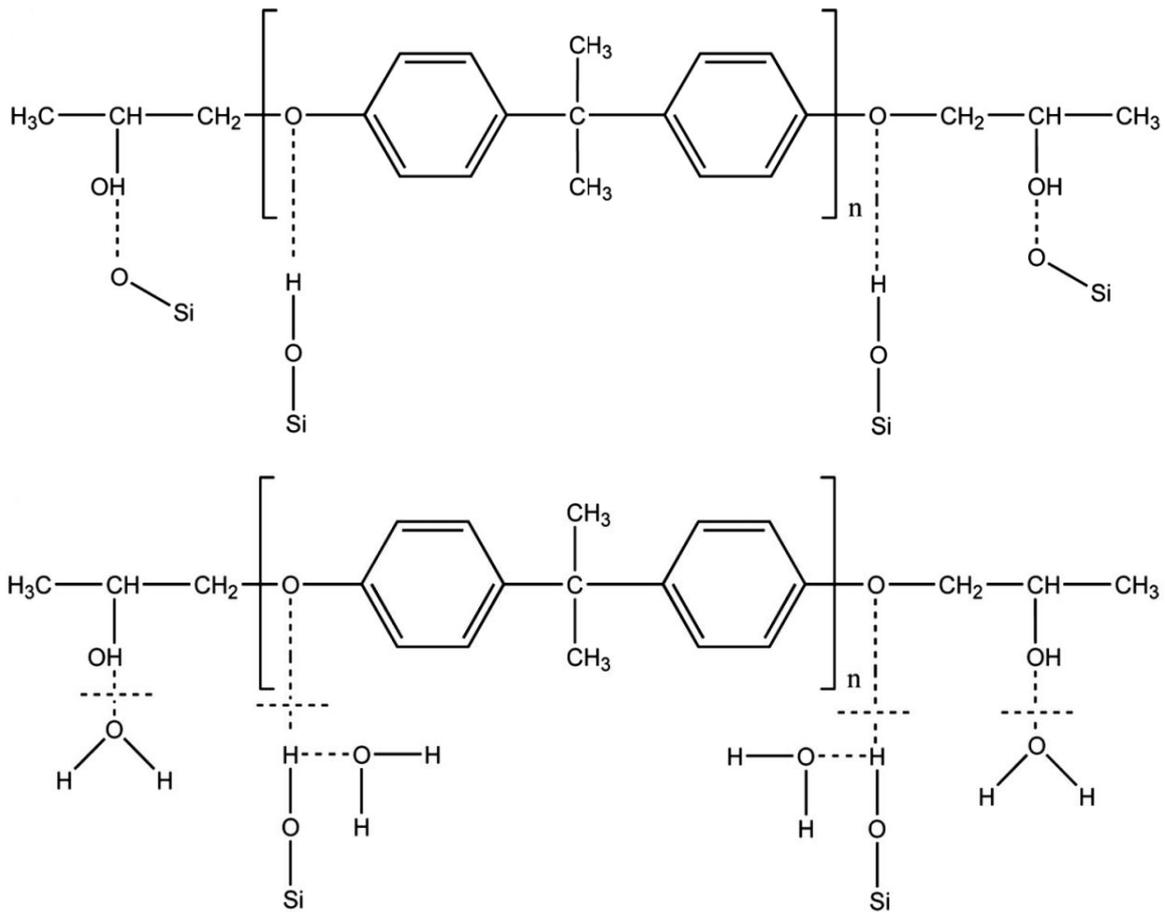
Da Figura 4.31 verifica-se ao final de 3000 horas de exposição significativas reduções tanto para a tensão de máxima de cisalhamento quanto para a energia de fratura. A tensão de cisalhamento máxima nos modelos S1 e S2 apresentou redução de 48% e 57%, respectivamente, enquanto a energia de fratura, apesar da elevada dispersão dos resultados, apresentou redução de 65% e 78%.

Taxas de reduções semelhantes também foram encontradas por Shrestha, Ueda e Zhang (2015) - 30% de redução na tensão de cisalhamento de modelos mantidos por um ano imersos em água - e Ceroni *et al.* (2018) - redução de 67% na resistência ao cisalhamento ao final de 74 dias de imersão em água à 30°C.

Dois mecanismos principais governam a aderência entre o compósito de CFRP e o substrato de concreto. O primeiro é a ligação mecânica, função do grau de rugosidade da superfície, enquanto o outro está relacionado às forças intermoleculares, ou ligações químicas entre os componentes da resina epóxi e do concreto, este último é o mais afetado pela presença da água (SHRESTHA; UEDA; ZHANG, 2015; MUKTHAR; PEIRIS, 2021).

Em escala molecular a aderência entre a resina epóxi e o C-S-H, principal componente químico do concreto, é função de ligações iônicas Ca-O e ligações de hidrogênio, sendo todas enfraquecidas na presença das moléculas de água (KAI; JI; DAI, 2022). A Figura 4.32 ilustra a quebra de algumas das ligações entre os compostos poliméricos e o silicato de cálcio hidratado.

Figura 4.32: Representação da quebra das ligações entre o epóxi e o C-S-H

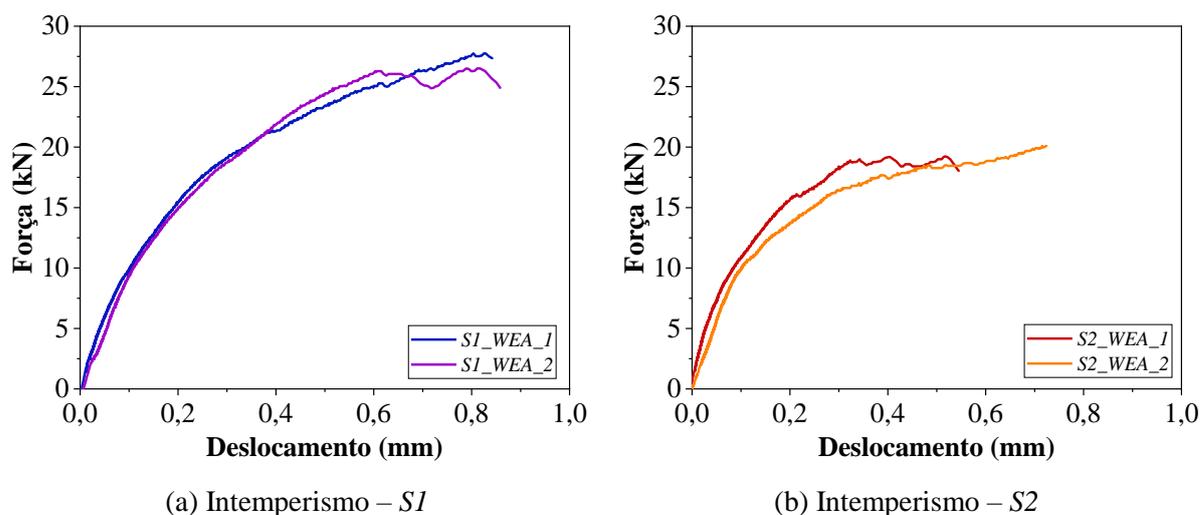


Fonte: Pan, Xian e Silva (2015)

A água reduz a força de ligação e acelera o processo de descolagem do FRP, atribuído ao enfraquecimento da ligação entre o epóxi e o C-S-H, além disso a transferência de carga é enfraquecida devido à presença das moléculas de água na interface (KAI; JI; DAI, 2022).

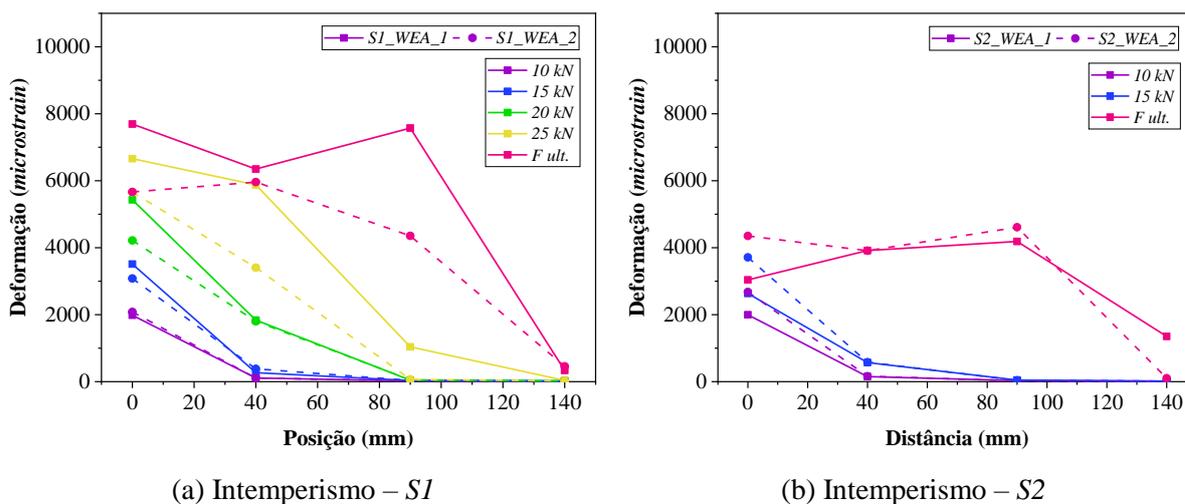
4.2.2.2 Intemperismo - WEA

A Figura 4.33 traz as curvas força *versus* deslocamento para os modelos ensaiados ao final de um ano de exposição ao intemperismo enquanto a Figura 4.34 traz a distribuição das deformações ao longo do comprimento do FRP para alguns níveis de carregamento.

Figura 4.33: Curvas força *versus* deslocamento para os modelos expostos ao intemperismo

Fonte: A Autora

Figura 4.34: Distribuição das deformações ao longo do comprimento do FRP para os modelos expostos ao intemperismo

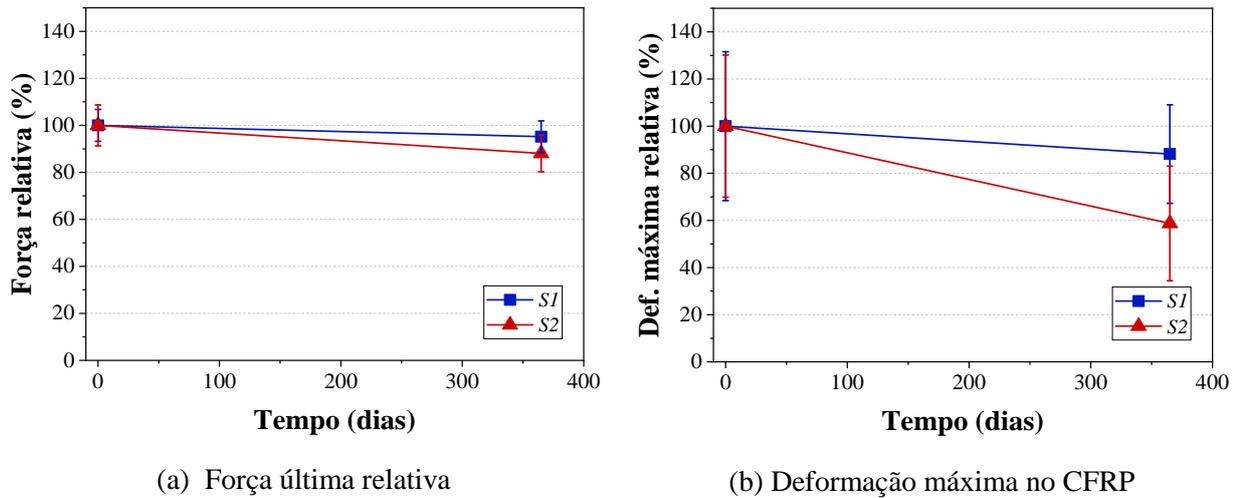


Fonte: A Autora

Observando os gráficos e os resultados da Tabela 4.9 constata-se que a capacidade de carga dos modelos se manteve constante, mesmo após a exposição ao intemperismo, ocorrendo redução na deformação do CFRP apenas para os modelos S2.

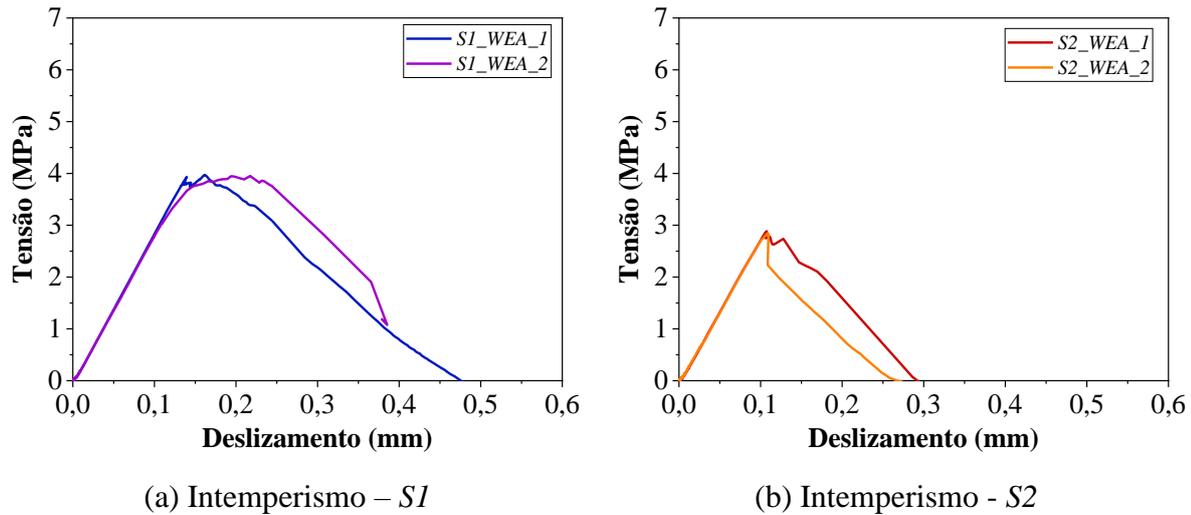
A Figura 4.35 traz os valores relativos para força última e deformação máxima no CFRP em relação à média dos ensaios de referência, destacando-se a redução de 12% na força última e de 41% na deformação máxima do CFRP para os modelos S2. Os modelos S1, por outro lado, não apresentaram redução em termos de força última, com redução de 12% na deformação máxima na manta de CFRP.

Figura 4.35: Propriedades mecânicas relativas para os modelos ensaiados ao cisalhamento



Fonte: A Autora

A Figura 4.36 a seguir ilustra as curvas tensão de cisalhamento *versus* deslizamento.

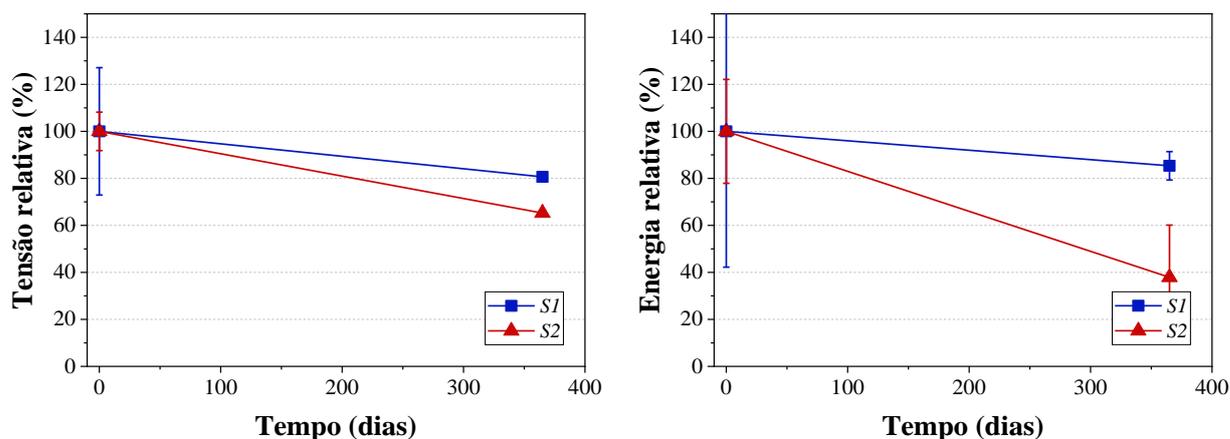
Figura 4.36: Curvas tensão de cisalhamento *versus* deslizamento para os modelos expostos ao intemperismo

Fonte: A Autora

A Figura 4.37 apresenta os valores relativos para tensão de cisalhamento máxima e energia de fratura na interface CFRP-concreto em relação à média dos ensaios de referência.

Ao final de um ano de exposição ao intemperismo a tensão de cisalhamento máxima nos modelos S1 e S2 apresentou redução de 19% e 35%, respectivamente. A energia de fratura da interface também foi reduzida, os modelos S1 e S2 apresentaram redução de 15% e 62%. Neste caso destaca-se que os modelos reforçados com a resina do tipo 2 se mostraram mais susceptíveis aos efeitos do intemperismo do que os modelos reforçados com a resina do tipo 1.

Figura 4.37: Propriedades mecânicas relativas para os modelos ensaiados ao cisalhamento



(b) Tensão de cisalhamento máxima

(b) Energia de fratura

Fonte: A Autora

Kabir, Shrestha e Samali (2016) constataram redução de 15% na resistência ao cisalhamento de corpos de prova expostos por 6 meses ao intemperismo, associando essa degradação à redução das propriedades mecânicas da resina epóxi. Os autores apontaram ainda modificação no modo de falha das amostras, ao final da exposição apenas uma pequena quantidade de concreto foi observada aderida à manta de FRP.

A Figura 4.38 apresenta os modos de falha observados após a exposição ao intemperismo. Todos os modelos ensaiados falharam por descolamento de uma das faixas de manta de FRP do substrato de concreto, com modos de falha caracterizados como adesivos.

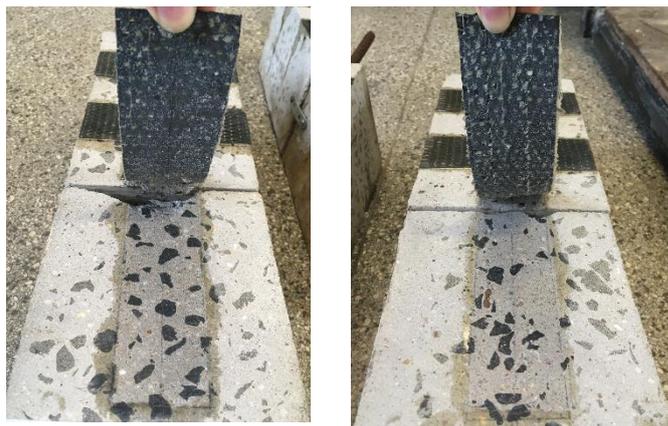
Comparando a Figura 4.22 e 4.38 verifica-se para os modelos S1 uma menor quantidade de concreto aderido à manta, fato que está diretamente relacionado à redução da aderência entre o FRP e o concreto.

Figura 4.38: Modos de falha observados para os modelos ensaiados ao cisalhamento



(a) S1_WEA_1

(b) S1_WEA_2



(c) S2_WEA_1

(d) S2_WEA_2

Fonte: A Autora

A exposição dos modelos ao intemperismo consiste em uma combinação de fatores atuando simultaneamente, dentre eles destaca-se a radiação UV, a variação de temperatura e a umidade. Uma possível explicação para a fragilização da aderência FRP-concreto pode estar na microfissuração da resina epóxi, o que facilita o ingresso de água e umidade na interface.

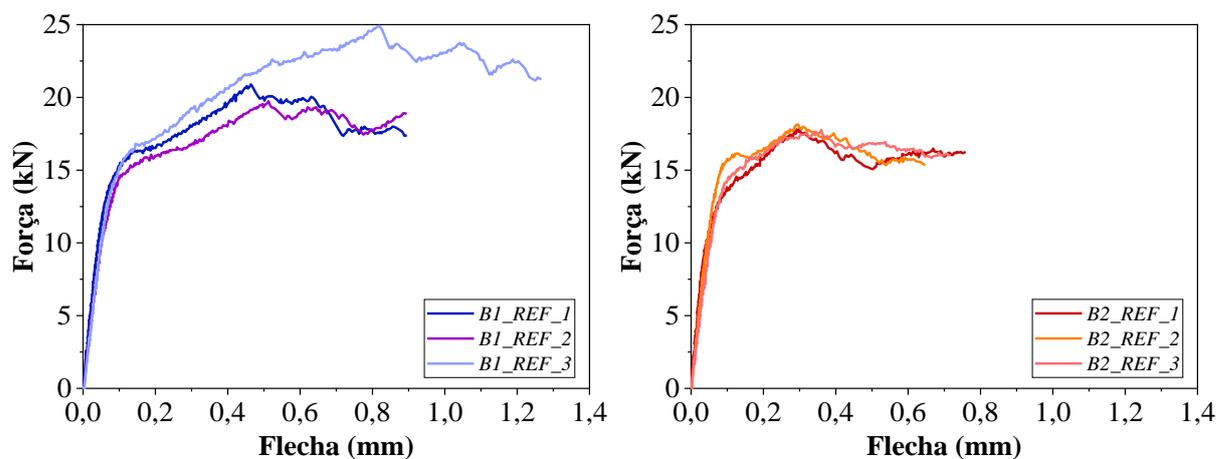
Os resultados dos modelos ensaiados ao cisalhamento após exposição ao protocolo de acondicionamento acelerado e ao intemperismo permitem concluir que ambas as condições tendem a reduzir a tensão de cisalhamento e a energia de fratura da interface FRP-concreto. Destaca-se também, com base nas observações dos modos de falha dos modelos S1, que as condições de exposição analisadas provocaram modificação no modo de falha, de adesivo na interface concreto-adesivo, para adesivo na interface FRP-adesivo.

Como consequência da redução da tensão de cisalhamento na interface, a deformação máxima na manta de CFRP também foi reduzida quando comparada com as deformações dos modelos de referência.

4.2.3 Flexão a três pontos

Ainda para avaliar a aderência FRP-concreto foram realizados ensaios de flexão a três pontos conforme proposto pelo ACI 440.9R (2015). A Figura 4.39 apresenta as curvas força *versus* flecha no meio do vão para os modelos de referência enquanto a Figura 4.40 ilustra os modos de falha observados nos modelos ensaiados.

Figura 4.39: Curvas força versus flecha para os modelos referência

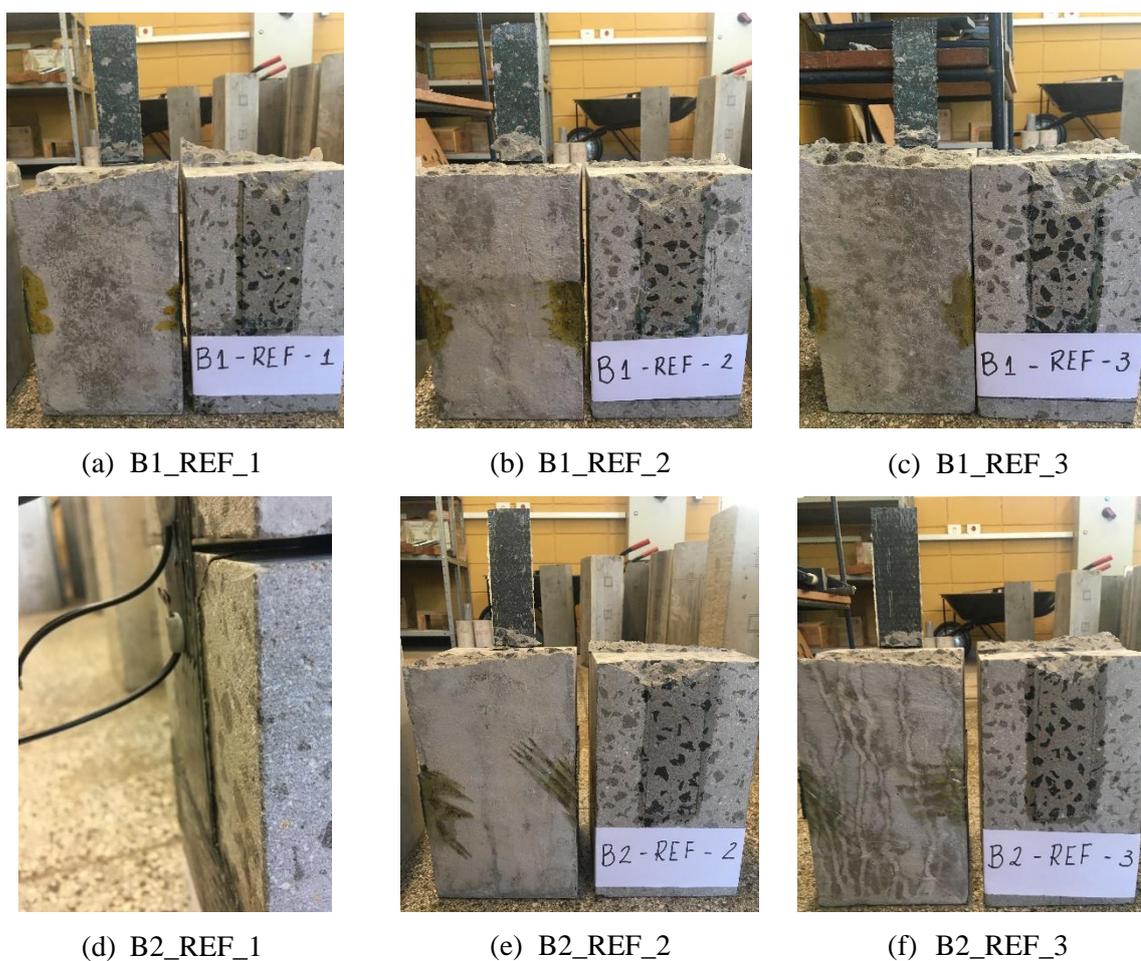


(a) Referência - B1

(b) Referência - B2

Fonte: A Autora

Figura 4.40: Modos de falha observados para os modelos ensaiados à flexão



(a) B1_REF_1

(b) B1_REF_2

(c) B1_REF_3

(d) B2_REF_1

(e) B2_REF_2

(f) B2_REF_3

Fonte: A Autora

Todos os modelos ensaiados falharam pelo descolamento adesivo da manta de FRP de

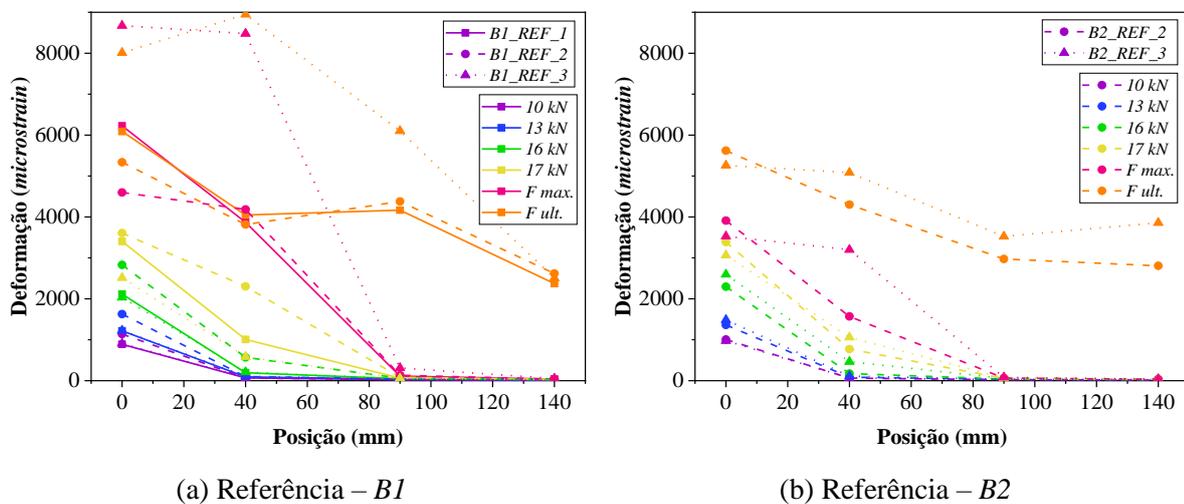
uma das extremidades do prisma de concreto conforme ilustra a Figura 4.40. O detalhe do prisma B2_REF_1 na Figura 4.40 indica que o FRP descolou na extremidade em que foi adicionada a faixa para ancoragem, impossibilitando a determinação da distribuição de deformações na região instrumentada.

O ACI 440.9R (2015) recomenda, para fins de avaliação da aderência do sistema EBR-FRP, que o modo de falha observado antes do condicionamento seja adesivo, uma vez que os modos de falha coesivos estão diretamente relacionados ao comportamento mecânico e durabilidade do concreto do substrato.

A força última resistida pelos modelos B1 e B2 foi de 19,17 kN e 15,87 kN, respectivamente e correspondem à força em que o FRP se desprende totalmente do substrato de concreto. Os gráficos força *versus* flecha (Figura 4.39) apresentam claramente dois trechos, num primeiro trecho com maior rigidez, a flecha aumenta pouco com o acréscimo da força, a partir de cerca de 15 kN os prismas perdem rigidez, sendo possível notar aumento da flecha enquanto a força pouco se altera. Analogamente ao que foi observado nos modelos ensaiados ao cisalhamento também é possível notar trecho da curva onde os deslocamentos evoluem consideravelmente para um pequeno aumento no valor da força o que corresponde à redistribuição das tensões de cisalhamento ao longo do comprimento do FRP.

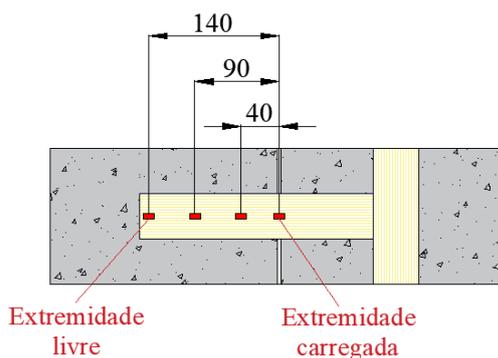
A Figura 4.41 apresenta a distribuição das deformações ao longo do comprimento do FRP para diferentes níveis de carregamento. A distância zero corresponde ao extensômetro posicionado no meio do vão, enquanto a distância 140 mm corresponde à posição em que foi instalado o último extensômetro (Figura 4.42).

Figura 4.41: Distribuição das deformações ao longo do comprimento do FRP



Fonte: A Autora

Figura 4.42: Distância dos extensômetros em relação à extremidade carregada (dimensões em mm)



Fonte: A Autora

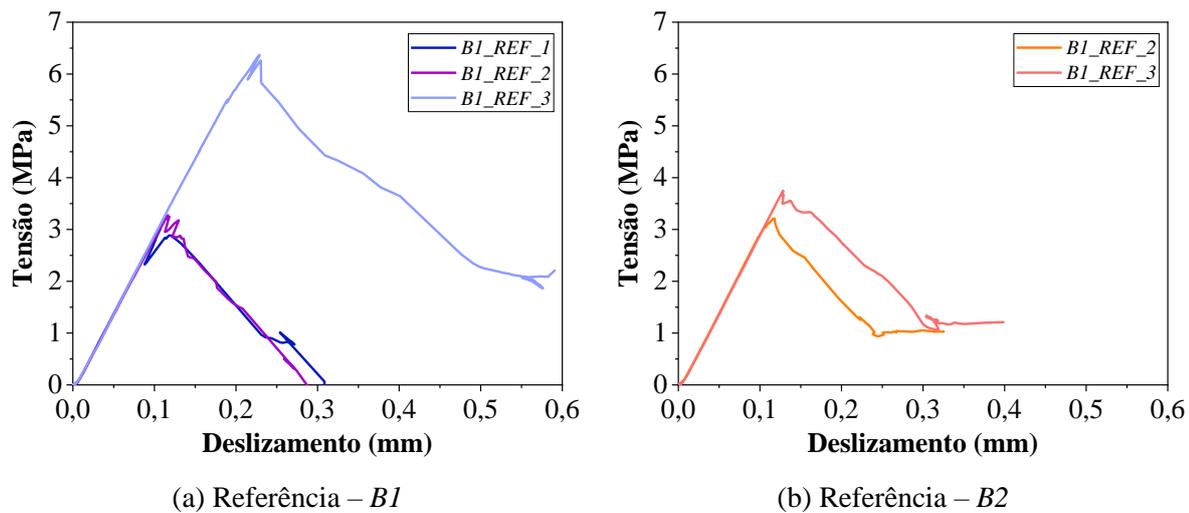
A média das deformações máximas na manta de CFRP aferidas no extensômetro central foram de 0,0065 mm/mm para os sistemas de reforço 1 e 2, deformações estas na mesma ordem de grandeza das obtidas por Guo *et al.* (2020) – deformação em torno de 0,005 mm/mm para os modelos reforçados com CFRP.

Assim como observado para os modelos ensaiados ao cisalhamento, conforme o esperado, as deformações resultaram inferiores às deformações obtidas dos ensaios de tração corpos de prova de CFRP (ACI 440.2R, 2017; FIB *Bulletin* 90, 2019).

A partir das deformações apresentadas na Figura 4.41 percebe-se, para carregamento inferior aos 17 kN, deformações apenas nos dois extensômetros mais centrais. Com o aumento da flecha a deformação nos extensômetros centrais estabilizam enquanto as deformações nos demais extensômetros aumentam, marcando o início da transferência das tensões de cisalhamento ao longo do comprimento do CFRP.

A Figura 4.43 traz as curvas tensão de cisalhamento *versus* deslizamento em um ponto central da interface FRP-concreto. O ponto em questão corresponde ao intervalo entre os extensômetros posicionados à 40 mm e à 90 mm da extremidade carregada (Figura 4.42).

Como resultados médios para a tensão de cisalhamento foram obtidos os valores de 4,22 MPa e 3,48 MPa para os prismas B1 e B2, respectivamente. Guo *et al.* (2020) encontraram valor muito similar, 4,26 MPa para a tensão de cisalhamento máxima na interface CFRP-concreto a partir de ensaios de flexão.

Figura 4.43: Curvas tensão de cisalhamento *versus* deslizamento

Fonte: A Autora

As Tabelas 4.9 e 4.10 resumem os resultados dos ensaios de flexão a três pontos. Os valores apresentados correspondem à média de três modelos ensaiados para cada idade e tipo de reforço, sendo os resultados individuais indicados no Apêndice H.

Tabela 4.9: Resumo dos resultados experimentais para força última e deformação máxima no CFRP

Identificação	Força última		Deformação máxima no CFRP		
	Média (kN)	D.P. (kN)	Média (%)	D.P. (%)	
B1	REF	19,17	1,94	0,65	0,14
	ACP – 1000 h	15,46	0,55	0,50	0,09
	ACP – 3000 h	13,86	1,40	0,46	0,06
	WEA	19,76	1,26	0,80	0,15
B2	REF	15,87	0,47	0,65	0,18
	ACP – 1000 h	11,86	0,35	0,46	0,03
	ACP – 3000 h	11,44	1,19	0,40	0,13
	WEA	14,70	2,24	0,49	0,13

Nota: D.P. = Desvio Padrão

Fonte: A Autora

Tabela 4.10: Resumo dos resultados para tensão de cisalhamento máxima, deslizamento inicial e energia de fratura na interface FRP-concreto

Identificação	Tensão máxima		Deslizamento inicial		Energia de fratura		
	Média (MPa)	D.P. (MPa)	Média (mm)	D.P. (mm)	Média (MPa.mm)	D.P. (MPa.mm)	
B1	REF	4,22	1,87	0,15	0,07	0,96	0,92
	ACP – 1000 h	3,07	0,46	0,11	0,01	0,55	0,19
	ACP – 3000 h	3,16	1,10	0,11	0,03	0,54	0,28
	WEA	4,20	0,59	0,18	0,03	0,88	0,12
B2	REF	3,48	0,38	0,13	0,01	0,66	0,18
	ACP – 1000 h	3,26	0,67	0,11	0,02	0,52	0,19
	ACP – 3000 h	2,29	0,54	0,08	0,01	0,25	0,19
	WEA	2,69	0,23	0,011	0,01	0,37	0,11

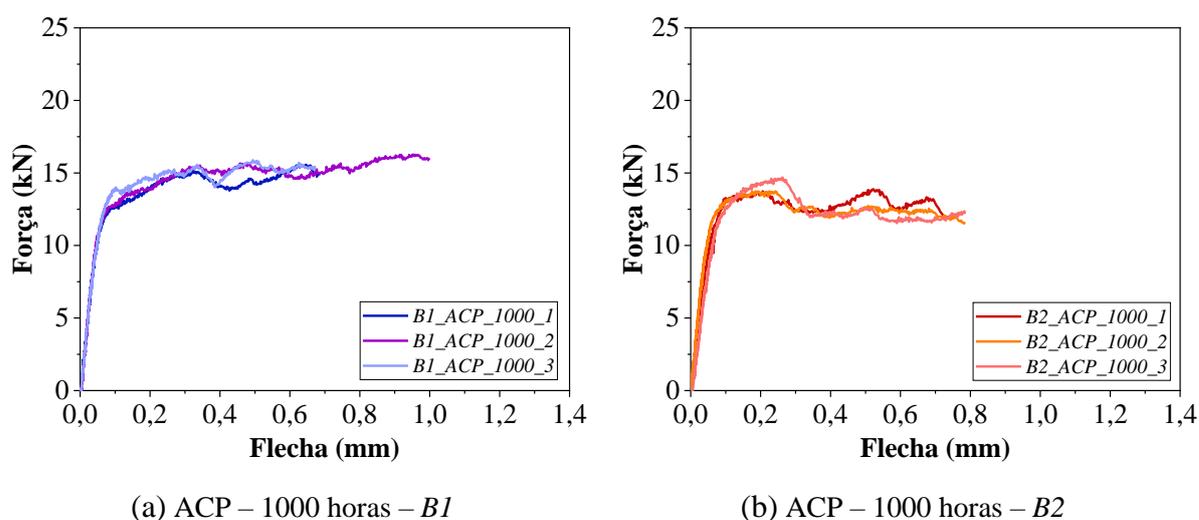
Nota: D.P. = Desvio Padrão

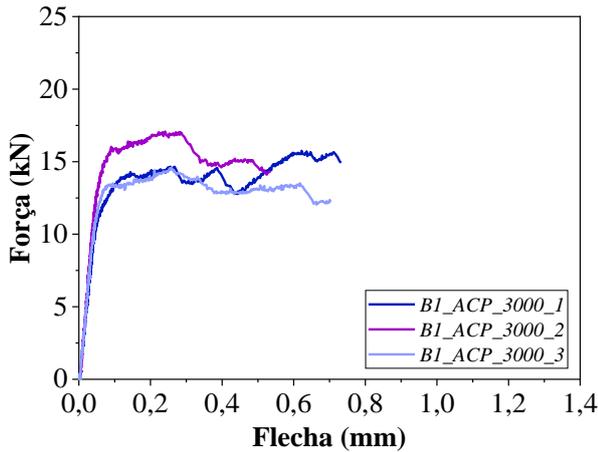
Fonte: A Autora

4.2.3.1 Protocolo de acondicionamento acelerado - ACP

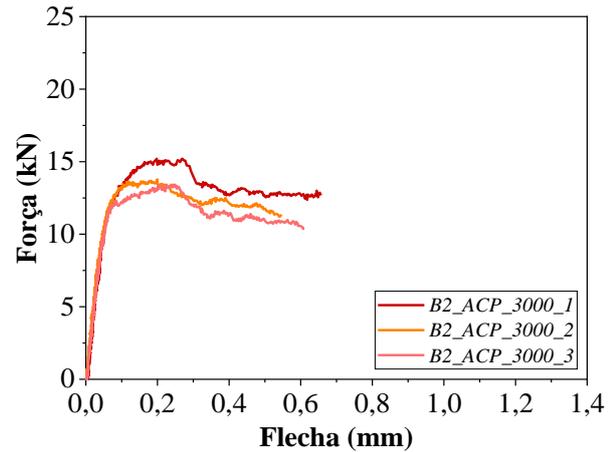
As curvas força *versus* flecha para os prismas ensaiados ao final de 1000 horas e 3000 horas de exposição ao protocolo de acondicionamento acelerado são apresentadas na Figura 4.44.

Figura 4.44: Curvas força *versus* flecha para prismas mantidos em acondicionamento acelerado





(c) ACP – 3000 horas – B1



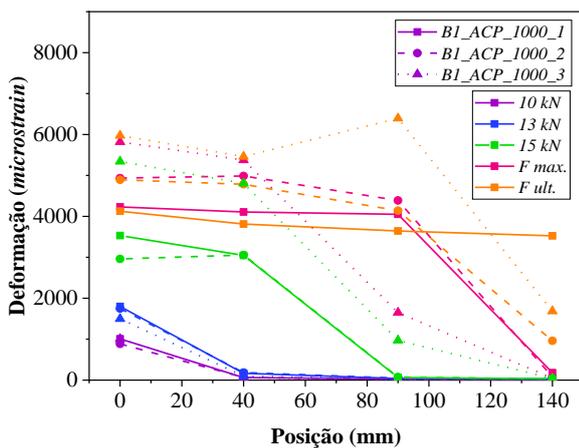
(d) ACP – 3000 horas – B2

Fonte: A Autora

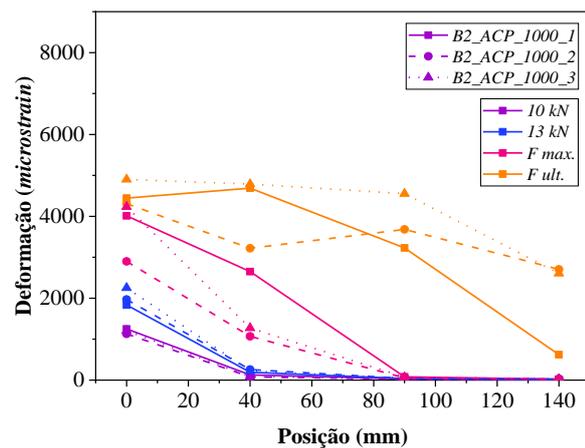
Analisando os gráficos da Figura 4.44 e os resultados da Tabela 4.9 fica clara a redução da capacidade de carga dos prismas ao final da exposição ao protocolo de acondicionamento acelerado. Em termos de força última, a redução foi de 28% ao final de 3000 horas de exposição.

A Figura 4.45 traz a distribuição das deformações no CFRP. Em comparação com a Figura 4.41, a deformação última no CFRP apresenta redução com a exposição ao protocolo de acondicionamento acelerado.

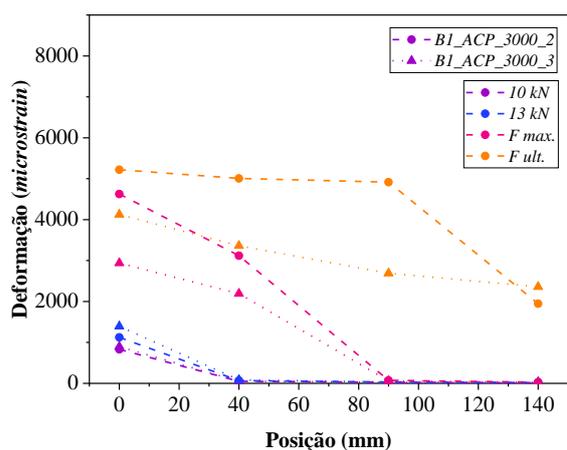
Figura 4.45: Distribuição das deformações ao longo do comprimento do FRP para os modelos mantidos em acondicionamento acelerado



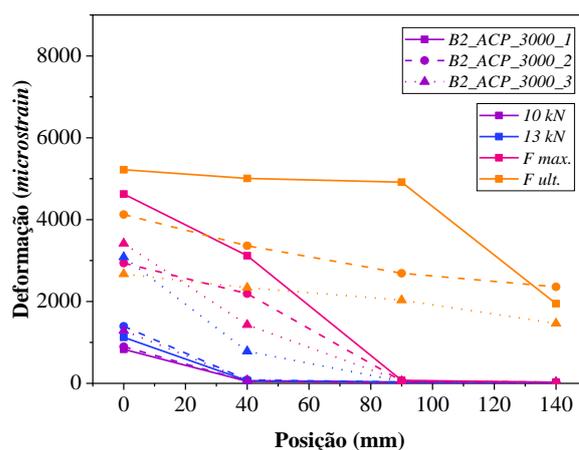
(a) ACP – 1000 horas – B1



(b) ACP – 1000 horas – B2



(c) ACP – 3000 horas – B1

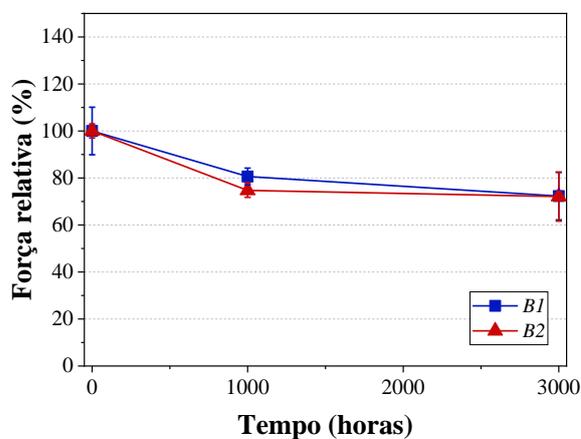


(d) ACP – 3000 horas – B2

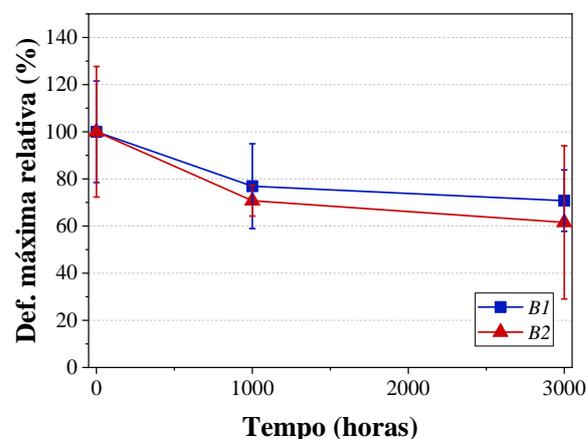
Fonte: A Autora

Com a finalidade de facilitar a compreensão da alteração das propriedades mecânicas com aumento do período de exposição a Figura 4.46 apresenta os valores relativos para força última e deformação máxima no CFRP em relação à média dos ensaios de referência.

Figura 4.46: Propriedades mecânicas relativas para os prismas ensaiados à flexão



(a) Força última



(b) Deformação máxima no CFRP

Fonte: A Autora

Conforme ilustra a Figura 4.46, ao final de 1000 horas de exposição a força última resistida pelos modelos B1 e B2 apresentou redução de 19% e 26%, respectivamente. Ao final das 3000 horas essas taxas de redução tendem a se manter em torno dos 28%. Com relação à deformação última no CFRP, ao final de 3000 horas as taxas de degradação apresentaram redução de 29% e 38% para os modelos B1 e B2.

Outros autores também observaram taxas de redução similares para a força última de

prismas expostos a ambientes higrotérmicos: Ceroni *et al.* (2018) - redução de 45% ao final de 74 dias de imersão em água à 30°C - e Tatar e Hamilton (2016a) – redução de 30% ao final de 8 semanas de imersão em água à 60°C.

Com relação aos modos de falha, todos os prismas apresentaram descolamento adesivo do FRP de uma das suas extremidades, com falha na interface FRP-adesivo (Figura 4.47).

Figura 4.47: Modos de falha observados para os prismas ensaiados à flexão



(a) B1_ACP_1000_1



(b) B1_ACP_1000_2



(c) B1_ACP_1000_3



(d) B2_ACP_1000_1



(e) B2_ACP_1000_2



(f) B2_ACP_1000_3



(g) B1_ACP_3000_2



(h) B1_ACP_3000_3



(i) B2_ACP_3000_1

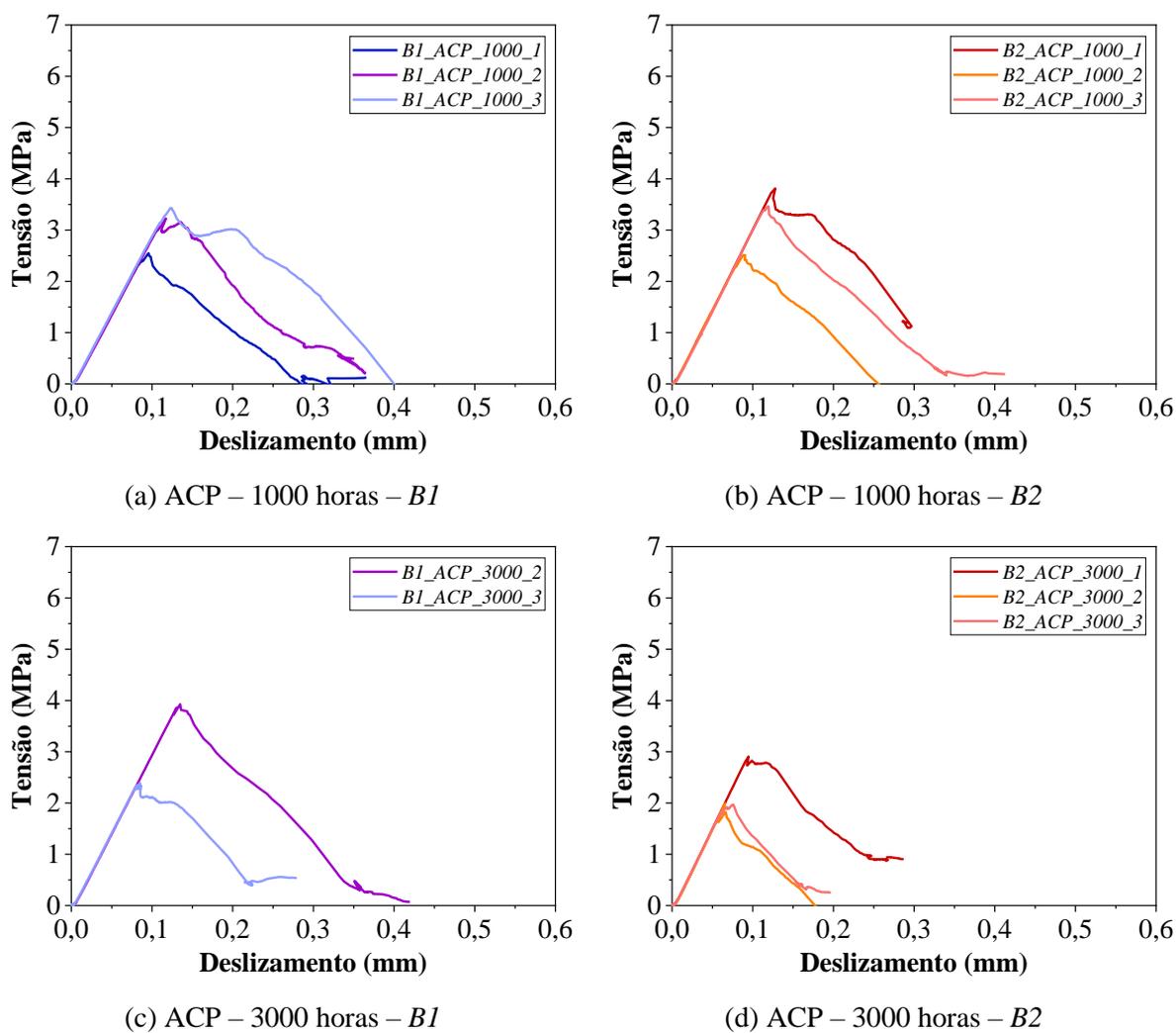
(j) B2_ACP_3000_2

(k) B2_ACP_3000_3

Fonte: A Autora

A Figura 4.48 traz as curvas tensão de cisalhamento *versus* deslizamento.

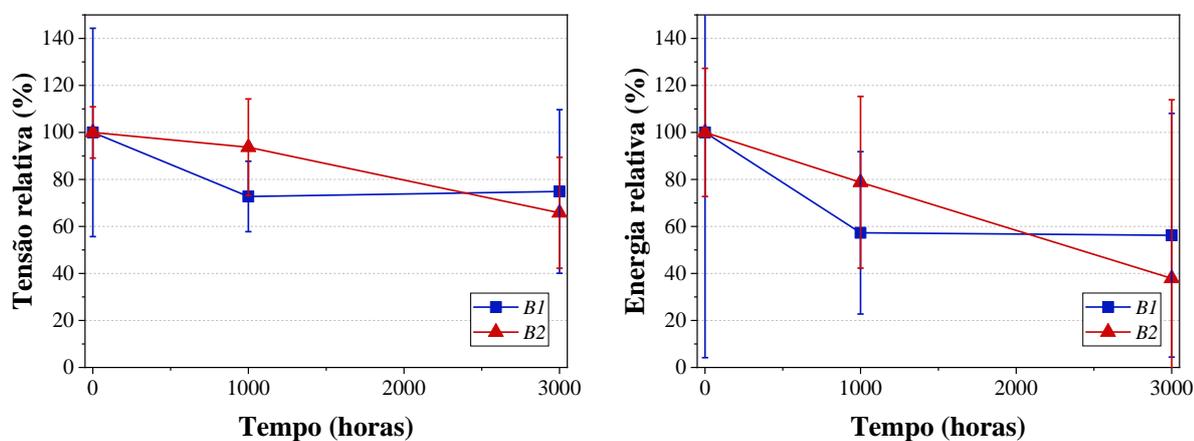
Figura 4.48: Curvas tensão de cisalhamento *versus* deslizamento para os prismas expostos ao ACP



Fonte: A Autora

A Figura 4.49 a seguir apresenta os valores relativos para tensão de cisalhamento e energia de fratura em relação à média dos ensaios de referência.

Figura 4.49: Propriedades mecânicas relativas para os modelos ensaiados à flexão



(a) Tensão de cisalhamento máxima

(b) Energia de fratura

Fonte: A Autora

Da Figura 4.48 fica clara a redução tanto da tensão máxima de cisalhamento quanto da energia de fratura na interface FRP-concreto. A tensão de cisalhamento dos modelos B1 e B2 reduziu em 26% e 35% ao final de 3000 horas de exposição, já a energia de fratura dos modelos B1 e B2 apresentou redução de 44% e 62%, respectivamente.

A significativa redução da tensão de cisalhamento e da energia de fratura da interface estão diretamente associados à presença de água na interface FRP-concreto conforme já foi detalhado no item 4.2.2.1.

Comparando as taxas de redução obtidas nos ensaios de flexão com as obtidas nos ensaios de cisalhamento – redução da tensão de cisalhamento entre 48% e 57% e redução da energia de fratura entre 65% e 78% - percebe-se que os ensaios de cisalhamento apresentam, embora de maneira sutil, maior sensibilidade ao protocolo de acondicionamento acelerado, o que corrobora com apontamento de Ceroni *et al.* (2018).

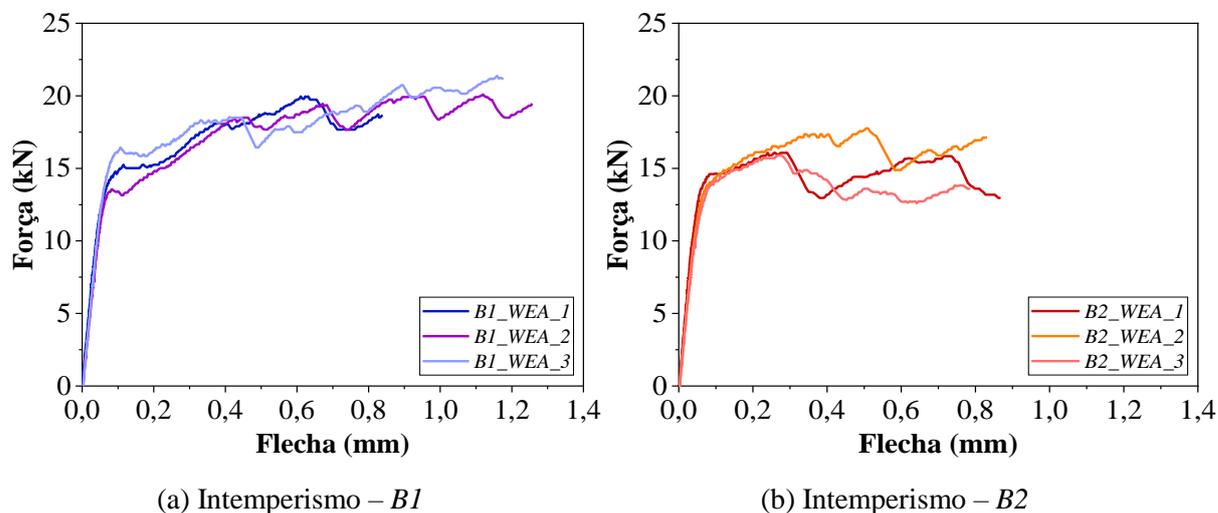
4.2.3.2 Intemperismo - WEA

A Figura 4.50 apresenta as curvas força versus flecha para os prismas ensaiados ao final de um ano de exposição ao intemperismo, já a Figura 4.51 traz a distribuição das deformações ao longo do FRP.

Os resultados apresentados na Tabela 4.9 deixam claro que a capacidade de carga dos

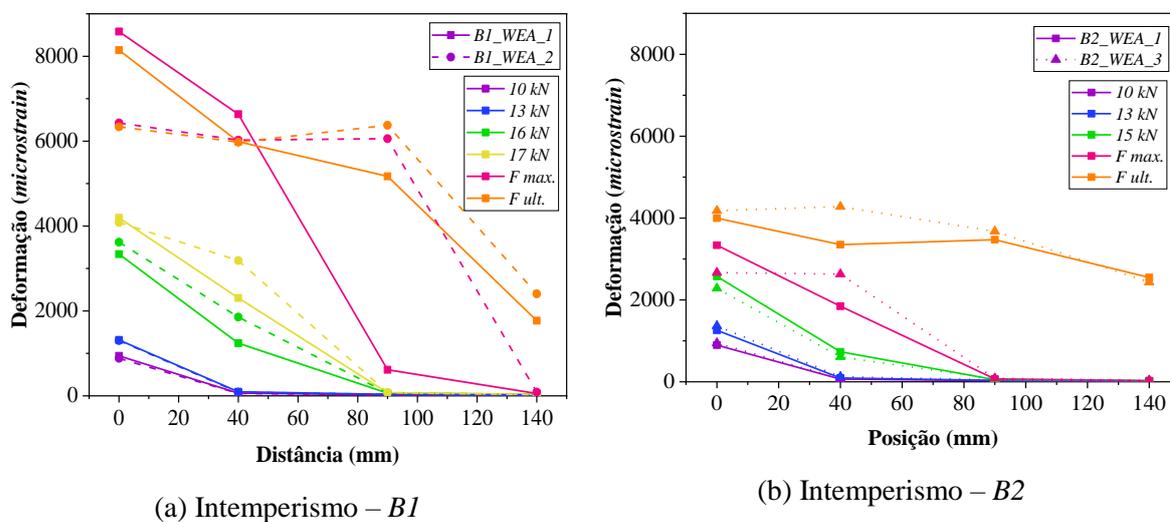
prisma se mantém mesmo após um ano de exposição ao intemperismo. Constatação análoga também foi feita com relação aos modelos ensaiados ao cisalhamento.

Figura 4.50: Curvas força *versus* flecha para prismas expostos ao intemperismo



Fonte: A Autora

Figura 4.51: Distribuição das deformações ao longo do comprimento do FRP



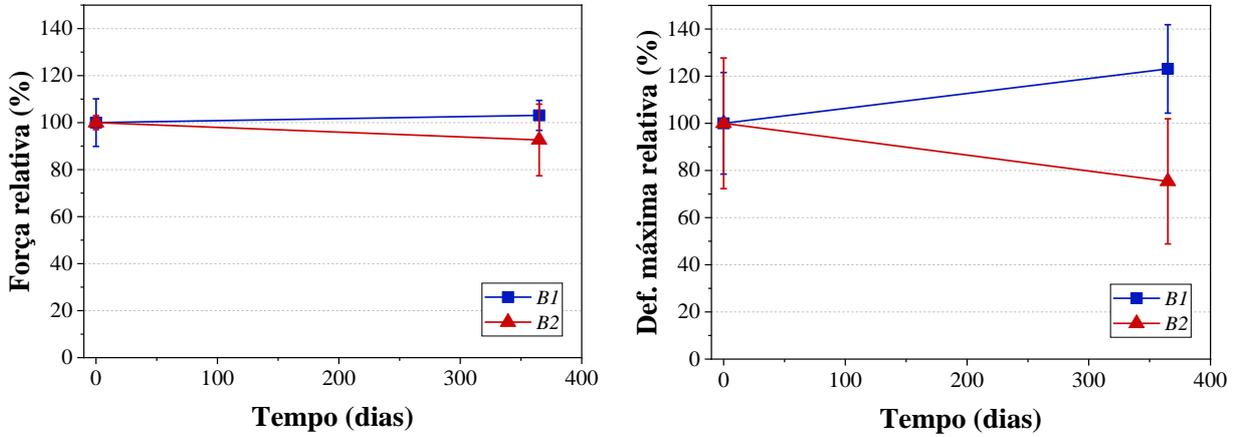
Fonte: A Autora

Observando a Figura 4.51 em comparação com a Figura 4.41, percebe-se um ligeiro aumento na deformação última aferida nas mantas de FRP dos prismas B1 após a exposição, enquanto a deformação observada nos prismas B2 tende a reduzir com a exposição.

A Figura 4.52 traz os valores relativos para força última e deformação máxima no CFRP em relação à média dos ensaios de referência, deixando claro que a capacidade de carga dos prismas não foi alterada, embora a deformação última no CFRP tenha aumentado em 23% para

os prismas B1 e reduzido em 25% para os prismas B2.

Figura 4.52: Propriedades mecânicas relativas para os prismas ensaiados à flexão



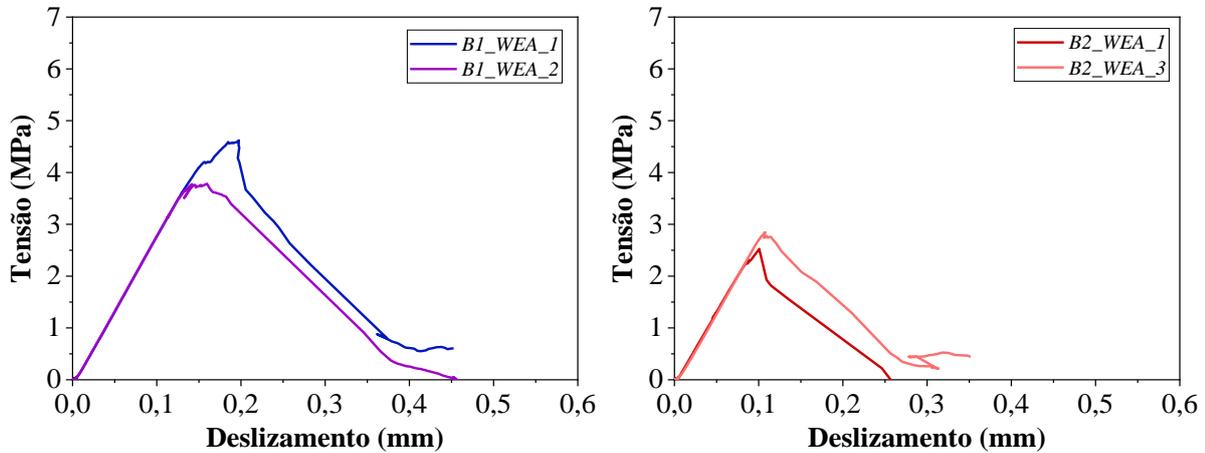
(c) Força última relativa

(b) Deformação máxima no CFRP

Fonte: A Autora

Para uma melhor compreensão dos processos atuando na interface FRP-concreto, a Figura 4.53 apresenta as curvas tensão de cisalhamento *versus* deslizamento.

Figura 4.53: Curvas tensão de cisalhamento *versus* deslizamento para os prismas expostos ao intemperismo



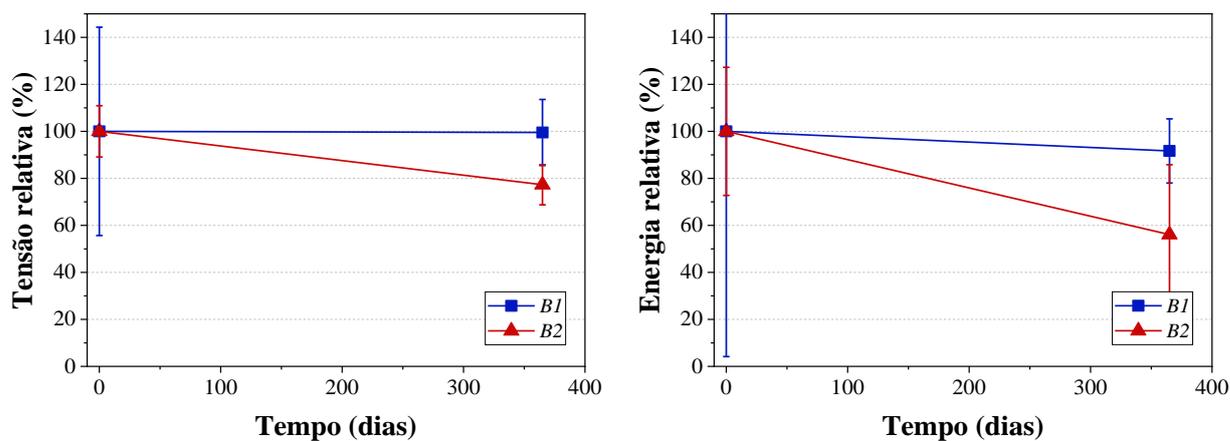
(a) Intemperismo – B1

(b) Intemperismo – B2

Fonte: A Autora

A Figura 4.54 apresenta os valores relativos para tensão de cisalhamento e energia de fratura.

Figura 4.54: Propriedades mecânicas relativas para os prismas ensaiados à flexão



(a) Tensão de cisalhamento máxima

(b) Energia de fratura

Fonte: A Autora

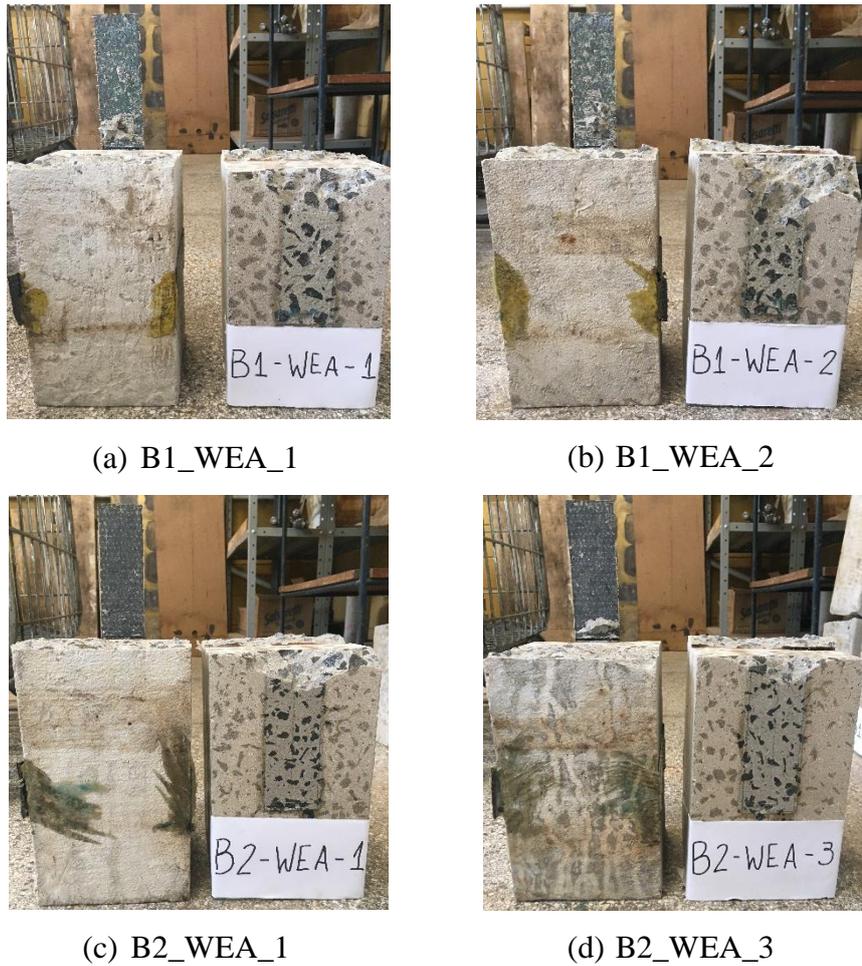
Analisando as Figuras 4.53 e 4.54, a exposição ao intemperismo alterou apenas a tensão de cisalhamento e energia de fratura dos prismas B2, propriedades estas reduzidas em 23% e 44%, respectivamente. Novamente a resina do tipo 2 se mostrou mais susceptível aos efeitos do intemperismo, assim como já havia sido notado para os modelos ensaiados ao cisalhamento.

Guo *et al.* (2020) também avaliaram a aderência FRP-concreto quando exposta a ambiente com clima subtropical. Ao final de um ano os autores notaram redução de 34% e 38% na tensão de cisalhamento máxima dos prismas reforçados com CFRP e BFRP, respectivamente, embora ao final de 6 meses as taxas de degradação já fossem significativas.

Choi *et al.* (2012) simularam a exposição ao intemperismo por meio da exposição a uma combinação de radiação UV e imersão em água à 50°C. Os autores apontaram redução na resistência à flexão entre 19% e 32% para prismas reforçados com CFRP (laminados *in-situ*) expostos por um período de 12 meses.

A Figura 4.55 ilustra os modos de falha para os prismas expostos ao intemperismo, sendo possível notar que todos falharam pelo descolamento adesivo do FRP de uma das extremidades, modos de falha semelhantes aos observados nos prismas de referência.

Figura 4.55: Modos de falha observados para os prismas ensaiados à flexão



Fonte: A Autora

Os resultados dos ensaios de flexão permitem concluir que a exposição ao protocolo de acondicionamento acelerado provocou redução na tensão de cisalhamento e na energia de fratura da interface FRP-concreto para ambas as resinas, entretanto a exposição ao intemperismo alterou apenas as propriedades da resina do tipo 2.

A partir dos resultados dos ensaios de flexão também foi constatada redução na deformação máxima na manta de CFRP ao final do acondicionamento acelerado e exposição ao intemperismo.

4.2.4 Arrancamento

O ensaio de arrancamento (*pull-off*) foi realizado conforme as recomendações do ASTM D7522/D7522M (2021). A Tabela 4.11 traz a média de três modelos ensaiados para cada idade e tipo de reforço, os resultados individuais podem ser visualizados no Apêndice I.

Tabela 4.11: Resumo dos resultados dos ensaios de arrancamento

Identificação	Tensão máxima		
	Média (MPa)	D.P. (MPa)	
P1	REF	3,69	0,12
	ACP – 1000 h	2,97	1,05
	ACP – 3000 h	2,73	0,76
	WEA	3,08	0,61
P2	REF	3,22	0,64
	ACP – 1000 h	2,31	0,91
	ACP – 3000 h	2,52	0,42
	WEA	3,28	0,56

Nota: D.P. = Desvio Padrão

Fonte: A Autora

O ACI 440.2R (2017) recomenda, como critério de aceitação, que a tensão de arrancamento seja superior a 1,4 MPa, com modo de falha coesivo no substrato de concreto. Analisando os resultados da Tabela 4.11 é possível verificar que todas as amostras apresentaram tensão de arrancamento superior a 1,4 MPa embora a exposição ao protocolo de acondicionamento acelerado tenha reduzido o valor da tensão de arrancamento.

Corroborando com a avaliação do critério de aceitação do ACI 440.2R (2017), as Figuras 4.56, 4.57 e 4.58 a seguir ilustram os modos de falha observados.

Figura 4.56: Modos de falha amostras referência



(a) P1_REF_1

(b) P1_REF_2



(c) P2_REF_1



(d) P2_REF_2

Fonte: A Autora

Figura 4.57: Modos de falha amostras expostas ao protocolo de acondicionamento acelerado



(a) P1_ACP_1000_1



(b) P1_ACP_1000_2



(c) P1_ACP_1000_3



(d) P2_ACP_1000_1



(e) P2_ACP_1000_2



(f) P2_ACP_1000_3



(g) P1_ACP_3000_1



(h) P1_ACP_3000_2



(i) P1_ACP_3000_3

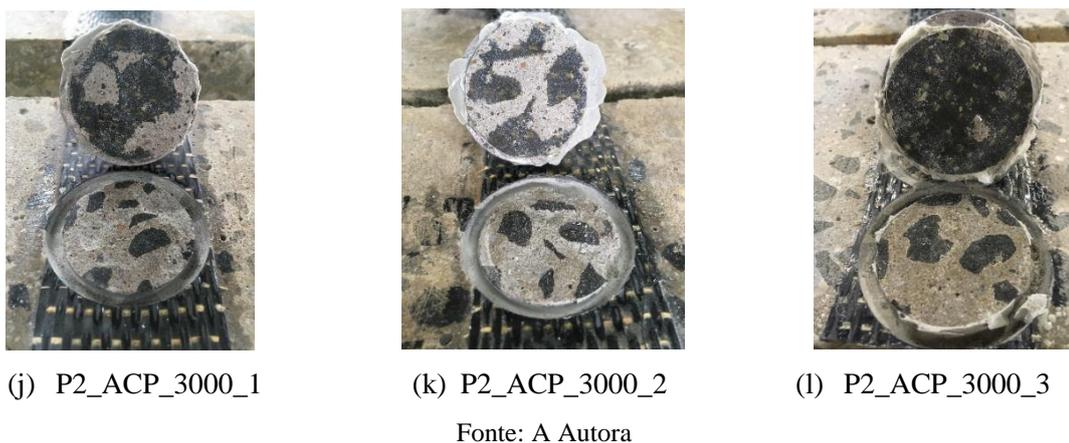
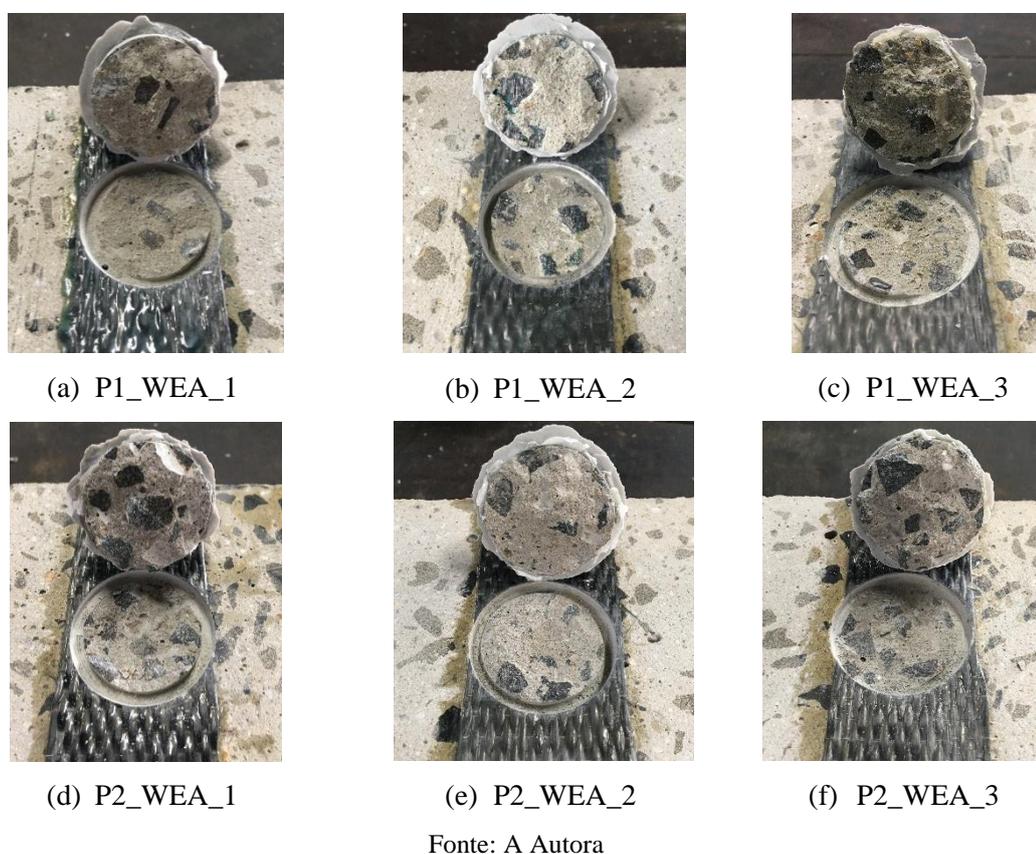


Figura 4.58: Modos de falha amostras expostas ao intemperismo



Conforme ilustra a Figura 4.56 as amostras de referência apresentaram modos de falha coesivos, com falha ocorrendo no substrato de concreto, sendo possível notar uma porção considerável de concreto aderido à pastilha metálica ao final do ensaio. Esse modo de falha é o desejável segundo o ASTM D7522/D7522M (2021) e indica que a aderência FRP-concreto é superior à resistência à tração do concreto.

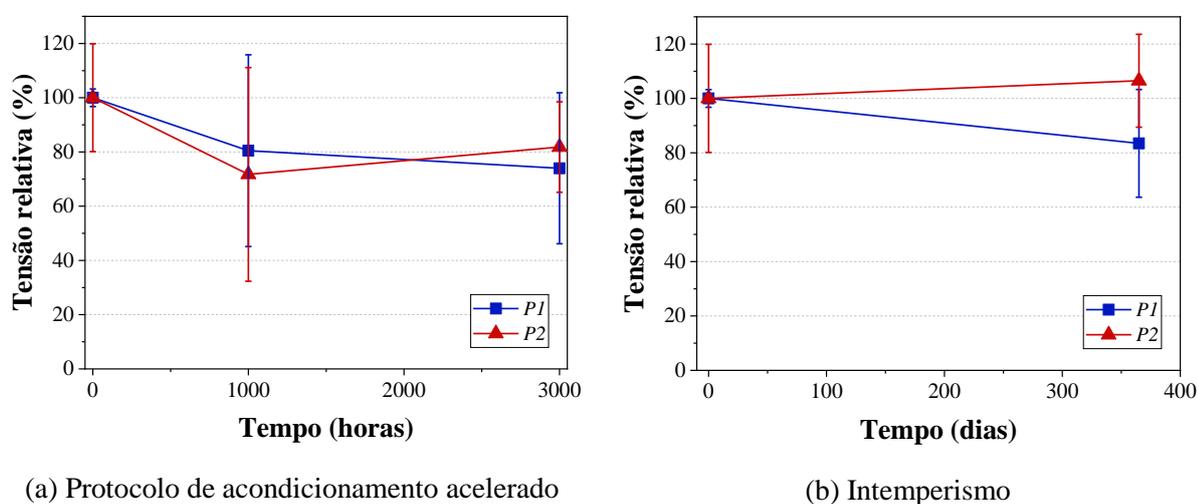
As amostras mantidas no protocolo de acondicionamento acelerado passaram a apresentar modos de falha parcialmente ou totalmente adesivos, conforme ilustra a Figura 4.57.

No caso das pastilhas com modos de falha parcialmente adesivos, diferente dos modos de falha de referência, apenas uma pequena porção de argamassa do substrato permaneceu aderida à pastilha.

Por fim as amostras expostas ao intemperismo (Figura 4.58) apresentaram modos de falha coesivos, similares aos observados nas amostras de referência.

Para facilitar a visualização do efeito das condições de exposição na tensão de arrancamento máxima a Figura 4.59 traz a tensão máxima relativa em relação à tensão máxima de referência.

Figura 4.59: Tensão de arrancamento máxima relativa



(a) Protocolo de acondicionamento acelerado

(b) Intemperismo

Fonte: A Autora

Ao final de 1000 horas de exposição ao protocolo de acondicionamento acelerado as amostras P1 e P2 apresentaram redução de 20% e 28%, respectivamente, na tensão de arrancamento. Essa taxa de redução tende a se manter ao final das 3000 horas de exposição (redução de 26% e 22% para as amostras do tipo P1 e P2, respectivamente).

Outros autores também observaram mudança nos modos de falha e redução da tensão de arrancamento após exposição à água e umidade: Karbhari e Gosh (2009) - redução entre 20% e 28% após 24 de meses de imersão em água à 23°C -, Benzarti *et al.* (2011) - redução de 46% ao final de 20 meses de exposição a um ambiente com temperatura de 40°C e umidade de 95% -, Tatar e Hamilton (2016a) - redução de 45% ao final de 8 semanas de imersão em água à 60°C.

A redução da tensão de aderência novamente pode ser relacionada à presença de água na interface FRP-concreto o que leva ao enfraquecimento das ligações moleculares existentes

entre a resina epóxi e o substrato de concreto (KAI; JI; DAI, 2022).

Com relação à exposição ao intemperismo, da Figura 4.59 (b) observa-se que apenas as amostras P1 apresentaram 16% de redução na tensão máxima de arrancamento. Como ambos os modos de falha observados (referência e intemperismo) consistiram no desprendimento do substrato de concreto, essa redução pode estar associada à heterogeneidade do concreto do substrato.

Do ponto de vista qualitativo os ensaios de arrancamento refletiram a redução da aderência FRP-concreto por meio da mudança do modo de falha, entretanto, quantitativamente, a tensão de arrancamento coesiva no concreto está associada à resistência à tração direta do concreto, sendo a tensão de aderência FRP-concreto de fato superior à tensão de arrancamento aferida.

4.3 Comparação com as recomendações normativas

Conforme detalhado na seção 2.2, as aplicações de reforço com FRP pela técnica EBR necessitam que seja garantido o efetivo contato e aderência entre o compósito e a superfície do elemento a ser reforçado. Nesse sentido as normas para dimensionamento dos sistemas de reforço - ACI 440.2R (2017) e FIB *Bulletin* 90 (2019) - impõe certos limites para as deformações efetivas atuando no FRP.

A seguir os resultados experimentais das deformações máximas no FRP são confrontados com as recomendações normativas. As etapas de cálculo das deformações efetivas propostas pelo ACI 440.2R (2017) e pela FIB *Bulletin* 90 (2019) são detalhadas no Apêndice J.

4.3.1 Confinamento

As deformações radiais máximas dos corpos de prova de concreto confinados com CFRP apresentaram redução quando expostos ao intemperismo e ao protocolo de acondicionamento acelerado. A Tabela 4.12 e a Figura 4.60 trazem a comparação entre as deformações radiais aferidas experimentalmente e as deformações radiais efetivas recomendadas pelas normas.

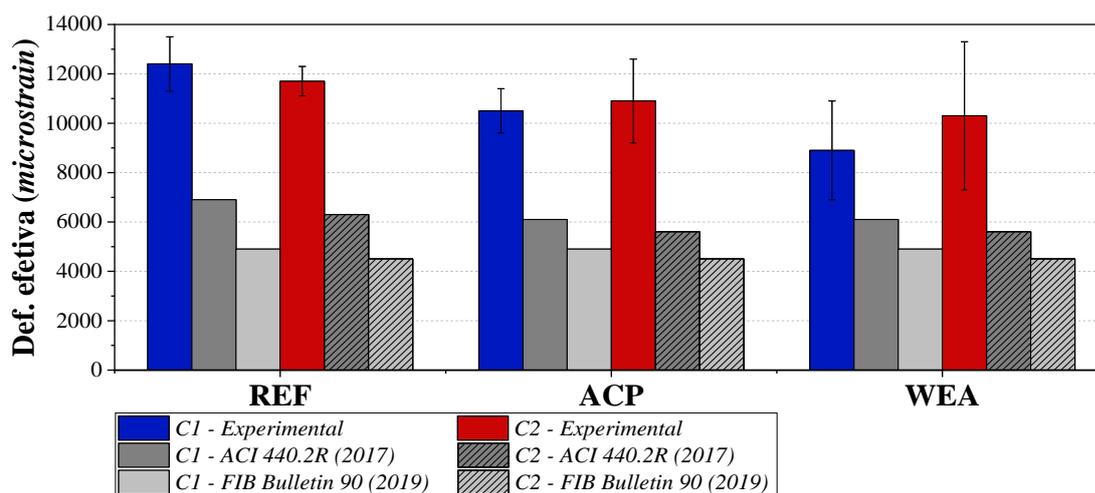
Tabela 4.12: Deformações radiais efetivas para os corpos de prova confinados com CFRP

Identificação	Experimental		ACI 440.2R (2017) (%)	FIB Bulletin 90 (2019) (%)
	Média (%)	D.P. (%)		
C1	REF	1,24	0,11	0,69
	ACP	1,05	0,09	0,61
	WEA	0,89	0,2	0,49
C2	REF	1,17	0,06	0,63
	ACP	1,09	0,17	0,56
	WEA	1,03	0,3	0,45

Nota: D.P. = Desvio Padrão

Fonte: A Autora

Figura 4.60: Deformações circunferenciais efetivas para os corpos de prova confinados com CFRP



Fonte: A Autora

As deformações efetivas calculadas por ambas as normas resultaram valores aproximadamente iguais, conforme ilustra a Figura 4.60. Quando comparado com os resultados experimentais, as deformações efetivas propostas pelas normas resultaram inferiores para os dois sistemas de reforço analisados e para ambas as condições de exposição.

Com base no exposto é possível concluir que as recomendações tanto do ACI 440.2R (2017) como da FIB *Bulletin* 90 (2019) se mostraram, neste caso, conservadoras no que se refere às deformações efetivas para fins de dimensionamento de elementos de concreto confinados.

4.3.2 Reforço ao cisalhamento

As deformações máximas atuando nas mantas de CFRP empregados para promover o reforço ao cisalhamento também reduziram quando expostas ao intemperismo e ao protocolo de acondicionamento acelerado.

A Tabela 4.13 e a Figura 4.61 apresentam a comparação entre as deformações máximas medidas experimentalmente e as deformações efetivas recomendadas pelas normas, vale ressaltar aqui que a FIB *Bulletin* 90 (2019) não recomenda o emprego do esquema de reforço constituído por apenas duas fixas de manta de FRP aderidas em faces opostas.

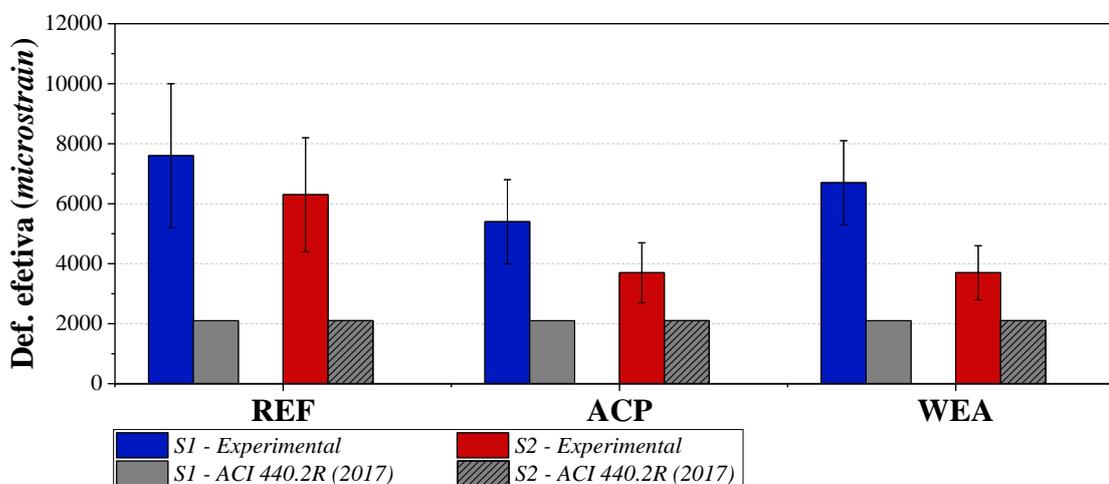
Tabela 4.13: Deformações efetivas para os corpos de prova reforçados ao cisalhamento – 2 lados

Identificação	Experimental		ACI 440.2R (2017) (%)	FIB Bulletin 90 (2019) (%)	
	Média (%)	D.P. (%)			
S1	REF	0,76	0,24	0,21	_*
	ACP	0,54	0,14	0,21	_*
	WEA	0,67	0,14		
S2	REF	0,63	0,19	0,21	_*
	ACP	0,37	0,10	0,21	_*
	WEA	0,37	0,09		

Nota: D.P. = Desvio Padrão; * A norma não recomenda o emprego da configuração de reforço

Fonte: A Autora

Figura 4.61: Deformações efetivas no CFRP para os corpos de prova reforçados ao cisalhamento



Fonte: A Autora

Conforme ilustra a Figura 4.61, a deformação efetiva recomendada pelo ACI 440.2R (2017) se mostrou conservadora quando em comparação com os resultados obtidos experimentalmente, entretanto, considerando o esquema do ensaio de cisalhamento realizado, tendo em vista a ancoragem do CFRP na porção superior do modelo, talvez o esquema de ensaio reproduza melhor o caso do reforço ao cisalhamento constituído por três faces reforçadas.

A Tabela 4.14 e a Figura 4.62 comparam as deformações obtidas experimentalmente com as deformações recomendadas pelas normas, considerando agora o caso de três lados do elemento reforçados. Percebe-se que as deformações efetivas calculadas com base nas recomendações do ACI 440.2R (2017) e da FIB *Bulletin* 90 (2019) foram bastante semelhantes.

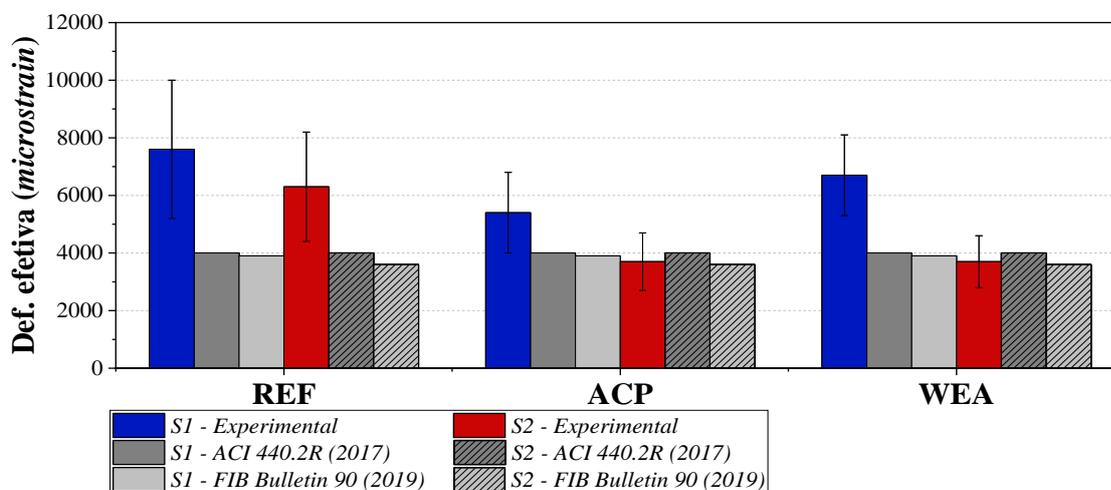
Tabela 4.14: Deformações efetivas para os corpos de prova reforçados ao cisalhamento – 3 lados

Identificação	Experimental		ACI 440.2R (2017) (%)	FIB Bulletin 90 (2019) (%)	
	Média (%)	D.P. (%)			
S1	REF	0,76	0,24	0,4	0,39
	ACP	0,54	0,14	0,4	0,39
	WEA	0,67	0,14		
S2	REF	0,63	0,19	0,4	0,36
	ACP	0,37	0,10	0,4	0,36
	WEA	0,37	0,09		

Nota: D.P. = Desvio Padrão

Fonte: A Autora

Figura 4.62: Deformações efetivas no CFRP para os corpos de prova reforçados ao cisalhamento



Fonte: A Autora

Considerando inicialmente os modelos de referência, as recomendações normativas se mostraram conservadoras, entretanto, conforme ilustra a Figura 4.62, as deformações médias obtidas experimentalmente para os modelos expostos ao protocolo de acondicionamento acelerado reforçados a partir do emprego da resina 2 foram cerca de 8% inferiores à recomendação do ACI 440.2R (2017) e apenas 3% superiores à recomendação da FIB *Bulletin* 90 (2019).

As recomendações normativas para determinação das deformações efetivas no CFRP quando aplicado para promover o reforço ao cisalhamento, apesar de conservadoras para os modelos de referência, representaram bem as deformações obtidas nos modelos expostos ao protocolo de acondicionamento acelerado e ao intemperismo.

4.3.3 Reforço à flexão

A partir dos resultados dos ensaios de flexão foi observado que as deformações máximas nas mantas de CFRP também reduziram. A Tabela 4.15 e a Figura 4.63 apresentam a comparação entre as deformações experimentais máximas e as deformações efetivas recomendadas pelas normas. Neste caso, é possível notar que as deformações efetivas calculadas com base nas recomendações do ACI 440.2R (2017) e da FIB *Bulletin* 90 (2019) divergiram.

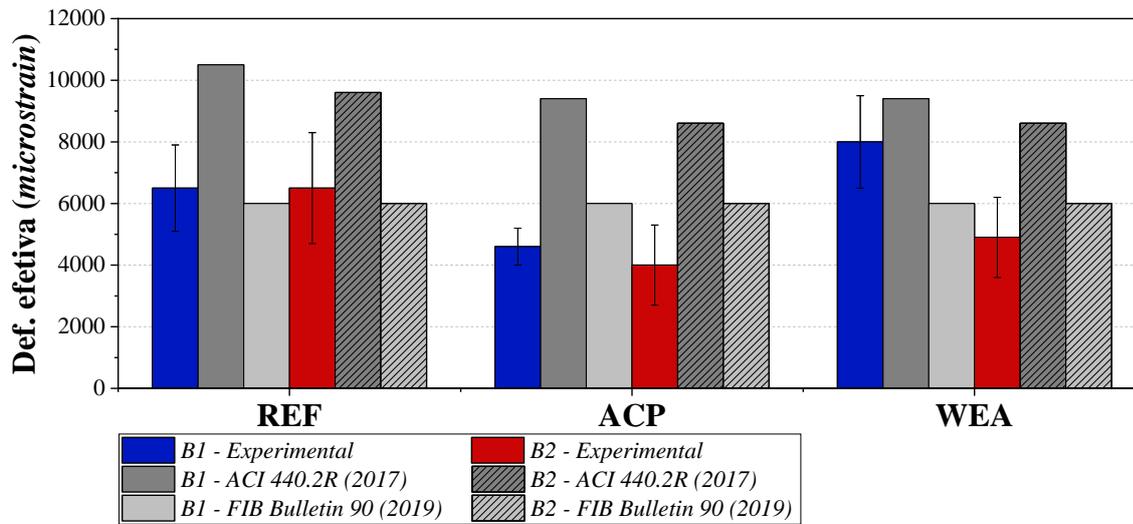
Tabela 4.15: Deformações efetivas para os corpos de prova reforçados à flexão

Identificação	Experimental		ACI 440.2R (2017) (%)	FIB Bulletin 90 (2019) (%)	
	Média (%)	D.P. (%)			
B1	REF	0,65	0,14	1,05	0,6
	ACP	0,46	0,06	0,94	0,6
	WEA	0,8	0,15		
B2	REF	0,65	0,18	0,96	0,6
	ACP	0,4	0,13	0,86	0,6
	WEA	0,49	0,13		

Nota: D.P. = Desvio Padrão

Fonte: A Autora

Figura 4.63: Deformações efetivas no CFRP para os corpos de prova reforçados à flexão



Fonte: A Autora

A partir da Figura 4.63 é possível concluir que, para os modelos de referência, a recomendação da FIB *Bulletin* 90 (2019) se aproxima bastante dos resultados obtidos experimentalmente, enquanto as deformações calculadas com base nas recomendações do ACI 440.2R (2017) resultaram entre 62% e 48% superiores aos resultados experimentais. Para os modelos expostos ao protocolo de condicionamento acelerado, ambas as recomendações normativas superestimam as deformações efetivas no CFRP.

Comparando agora as deformações aferidas experimentalmente para os corpos de prova expostos ao intemperismo com as deformações recomendadas pela norma, percebe-se da Figura 4.63 que a recomendação da FIB *Bulletin* 90 (2019) se mostrou conservadora quando comparada com as deformações dos modelos reforçados com a resina 1, enquanto para os modelos reforçados com a resina 2, as recomendações da FIB *Bulletin* 90 (2019) superestimaram as deformações máximas em 22%. Neste caso as recomendações do ACI 440.2R (2017) superestimam as deformações para os modelos reforçados com as resinas 1 e 2 em 18% e 76%, respectivamente.

Com base nos resultados apresentados anteriormente, pode-se afirmar que as recomendações do ACI 440.2R (2017) fornecem valores de deformações efetiva superiores aos apontados experimentalmente, mesmo para os modelos ensaiados em condição de referência. No caso das recomendações da FIB *Bulletin* 90 (2019), apesar de representarem bem as deformações experimentais dos modelos de referência, elas não refletem a redução da deformação máxima no CFRP quando expostos às diferentes condições avaliadas.

Tendo em vista os resultados de deformação efetiva divergentes encontrados

anteriormente, a seguir na Tabela 4.16 e na Figura 4.64 são apresentadas as comparações entre os resultados experimentais e analíticos com base nas equações propostas por Teng *et al.* (2003) e recomendados pela norma americana da AASHTO FRPS-1 (2010).

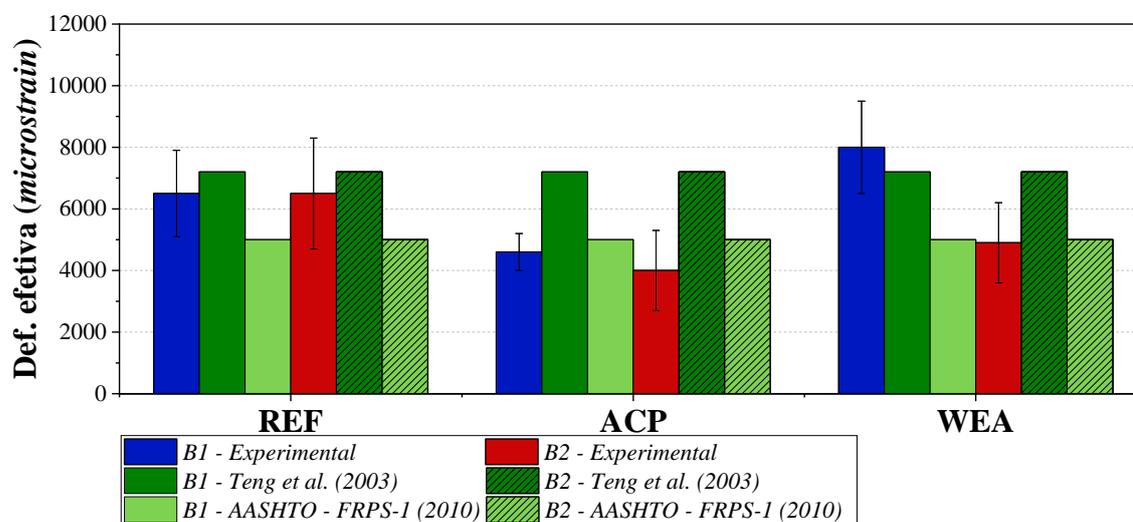
Tabela 4.16: Deformações efetivas para os corpos de prova reforçados à flexão

Identificação	Experimental		Teng <i>et al.</i> (2003) (%)	AASHTO FRPS-1 (2010) (%)
	Média (%)	D.P. (%)		
B1	REF	0,65	0,14	0,72
	ACP	0,46	0,06	0,72
	WEA	0,8	0,15	0,5
B2	REF	0,65	0,18	0,72
	ACP	0,4	0,13	0,72
	WEA	0,49	0,13	0,5

Nota: D.P. = Desvio Padrão

Fonte: A Autora

Figura 4.64: Deformações efetivas no CFRP para os corpos de prova reforçados à flexão



Fonte: A Autora

Com base na Figura 4.64 é possível concluir que a limitação da deformação efetiva no FRP em 0,005 mm/mm conforme recomenda a AASHTO FRPS-1 (2010), embora mais conservadora, consegue representar melhor as deformações máximas experimentais dos modelos sujeitos à degradação ambiental.

Ainda da Figura 4.64, percebe-se que a deformação calculada com base na equação proposta por Teng *et al.* (2003) representou bem as deformações dos modelos de referência e

dos modelos reforçados com a resina 1 expostos ao intemperismo, entretanto, para os modelos mantidos em acondicionamento acelerado, a equação proposta superestimou as deformações nos modelos B1 e B2 em 64% e 80%, respectivamente.

Nesse contexto destaca-se que outros autores já apontaram divergência entre os resultados de deformações efetivas experimentais e teóricas propostas pelo ACI 440.2R (2017): Sarti Júnior (2020) ensaiou vigas reforçadas à flexão com CFRP após 1000 horas mantidas no protocolo de acondicionamento acelerado, o autor também apontou que as deformações experimentais no CFRP foram inferiores às deformações teóricas propostas pelo ACI 440.2R (2017); Tatar e Hamilton (2016b) propuseram a inclusão do coeficiente de 0,6 (BDF – *Bond Durability Fator*, em língua inglesa) na Equação 2.4 do ACI 440.2R (2017) com a finalidade de refletir a redução da deformação efetiva no FRP resultado da degradação da aderência FRP-concreto.

Com base na recomendação proposta por Tatar e Hamilton (2016b) foram incluídos os coeficientes BDF nas equações propostas pelo ACI 440.2R (2017) (Equação 4.1), por Teng *et al.* (2003) (Equação 4.2) e pela FIB *Bulletin* 90 (2019) (Equação 4.3).

$$\varepsilon_{fd} = BDF \times 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9 \varepsilon_{fu} \quad (4.1)$$

$$f_{fbd,IC} = BDF \times \frac{k_{cr,k} \cdot k_k \cdot k_b \sqrt{\frac{2E_f}{t_f} f_{cm}^{2/3}}}{\gamma_{fb}} \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_{fd} = BDF \times 0,48 \beta_p \sqrt{\frac{\sqrt{f'_c}}{nE_p t_p}} \quad (4.3)$$

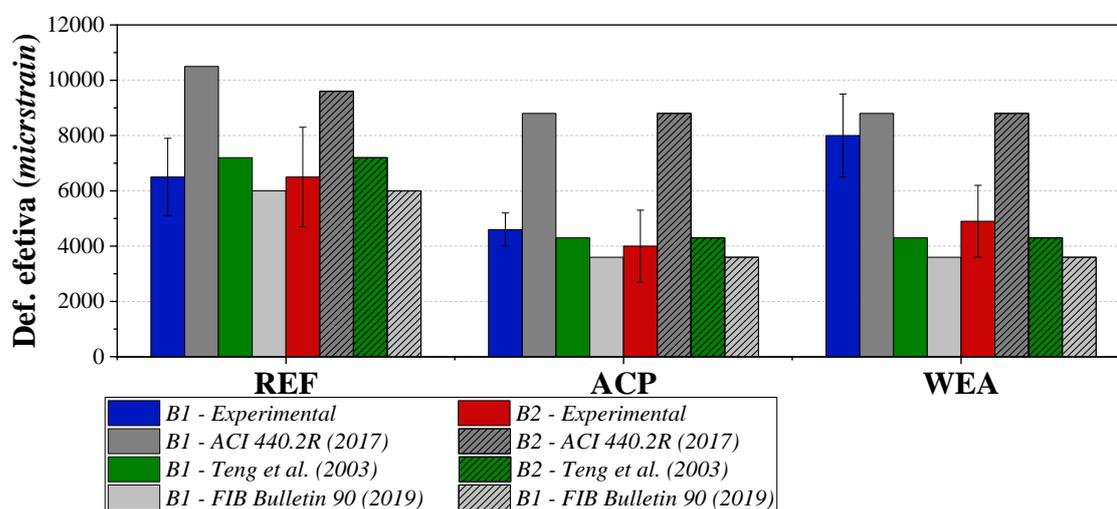
A Tabela 4.17 e a Figura 4.65 trazem a comparação entre os resultados experimentais e teóricos para as deformações efetivas, neste caso, para o cálculo das deformações foi incluído o coeficiente de degradação da aderência de 0,6 proposto por Tatar e Hamilton (2016b).

Tabela 4.17: Deformações efetivas para os corpos de prova reforçados à flexão incluindo o coeficiente BDF

Identificação	ACI 440.2R (2017) BDF (%)	Teng et al. (2003) BDF (%)	FIB Bulletin 90 (2019) BDF (%)
B1	REF	1,05	0,72
	ACP	0,88	0,43
	WEA		
B2	REF	0,96	0,6
	ACP	0,88	0,43
	WEA		

Fonte: A Autora

Figura 4.65: Deformações efetivas no CFRP incluindo o coeficiente BDF



Fonte: A Autora

A partir da Figura 4.65 conclui-se que o emprego do coeficiente BDF nas Equações 4.2 e 4.3 melhora os resultados teóricos para deformações efetiva nos modelos expostos ao acondicionamento acelerado e intemperismo mas, apesar do emprego do coeficiente BDF na Equação 4.1, os resultados teóricos fornecidos pelo ACI 440.2R (2017) continuam superestimando as deformações no CFRP.

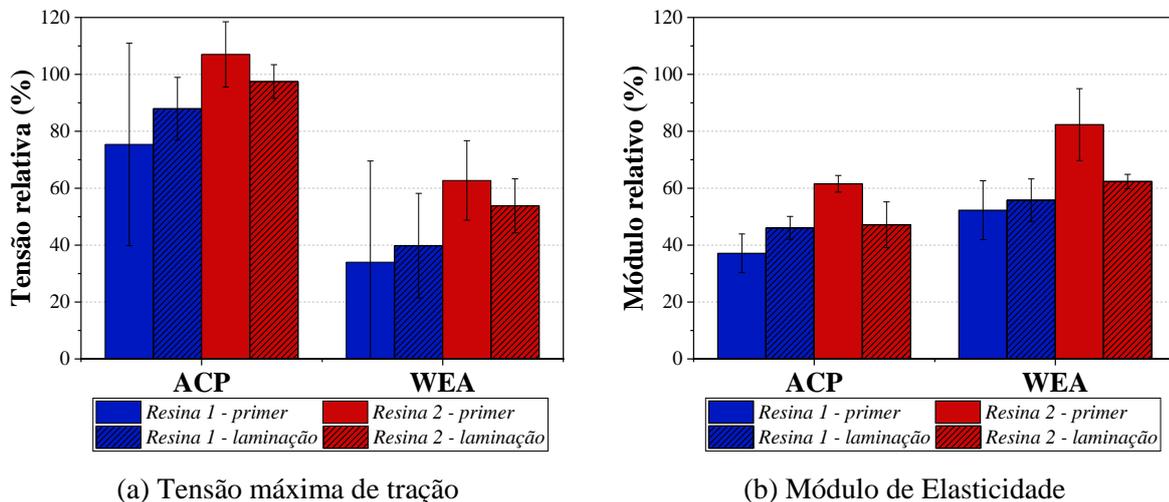
Por fim, com base no apresentado nessa seção conclui-se que as recomendações normativas propostas pelo ACI 440.2R (2017) e pela FIB *Bulletin* 90 (2019) para o cálculo das deformações efetivas no FRP forneceram resultados superiores aos observados experimentalmente, neste ponto, recomendações da AASHTO FRPS-1 (2010) ou a inclusão de um coeficiente associado à degradação da interface - BDF - forneceram resultados para a deformação efetiva mais condizentes com os experimentais.

4.4 Conclusão dos resultados experimentais

O presente capítulo apresentou os resultados do programa experimental, detalhando e discutindo os resultados de degradação obtidos para os materiais e para o sistema EBR-FRP.

Os ensaios de tração realizados nos corpos de prova de resina epóxi apontaram significativa redução no módulo de elasticidade quando mantidos no protocolo de acondicionamento acelerado (ACP), já a exposição ao intemperismo (WEA) provocou maiores reduções na tensão máxima de tração das resinas. A Figura 4.66 apresenta, para cada condição de exposição, os valores relativos das propriedades mecânicas da resina quando comparados aos valores de referência.

Figura 4.66: Propriedades mecânicas relativas para as resinas



Fonte: A Autora

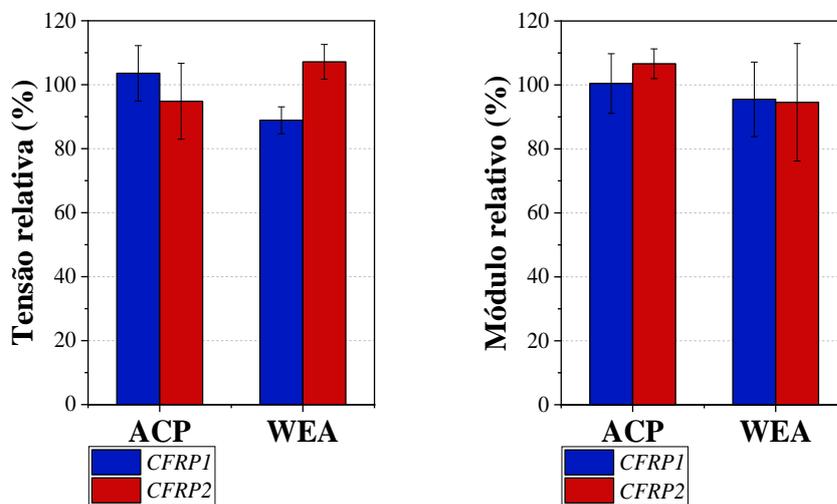
Foi possível concluir que a absorção de água pela resina epóxi alterou as suas propriedades mecânicas através de reações de plastificação e hidrólise, sendo possível correlacionar a estabilização na absorção de umidade com a redução das propriedades mecânicas. As resinas expostas ao intemperismo, além de susceptíveis à absorção de umidade, também podem ter sofrido processo de fotodegradação, o que explica as maiores reduções para a tensão de tração nesse ambiente.

Destaca-se ainda que o comportamento observado para as resinas expostas a cada uma das condições estudadas foi distinto, as resinas mantidas em água apresentaram comportamento elasto-plástico enquanto as expostas ao intemperismo tiveram comportamento frágil.

Apesar das modificações observadas nas amostras de resina epóxi, os corpos de prova de CFRP não apresentaram modificação na tensão máxima de tração ou módulo de elasticidade

(Figura 4.67) uma vez que as propriedades mecânicas da fibra é que ditam o comportamento mecânico dos CFRP's ensaiados à tração paralela às fibras.

Figura 4.67: Propriedades mecânicas relativas para o CFRP



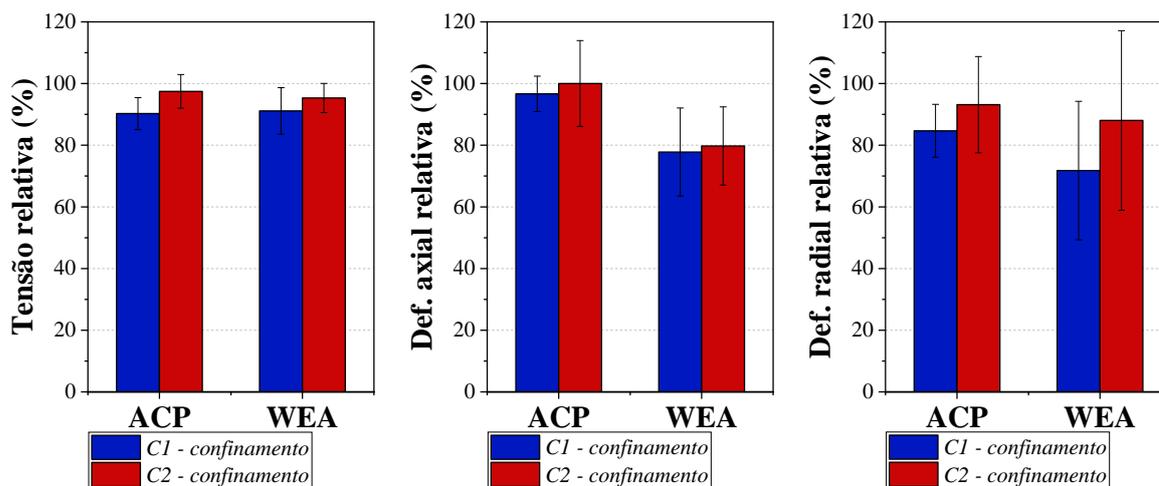
(a) Tensão máxima de tração

(b) Módulo de Elasticidade

Fonte: A Autora

Como o comportamento mecânico dos corpos de prova confinados com CFRP está diretamente associado ao comportamento do CFRP, conforme ilustra a Figura 4.68 também não foi notada nenhuma modificação na tensão máxima de compressão dos corpos de prova confinados.

Figura 4.68: Propriedades mecânicas relativas os corpos de prova confinados com CFRP



(a) Tensão máxima de compressão

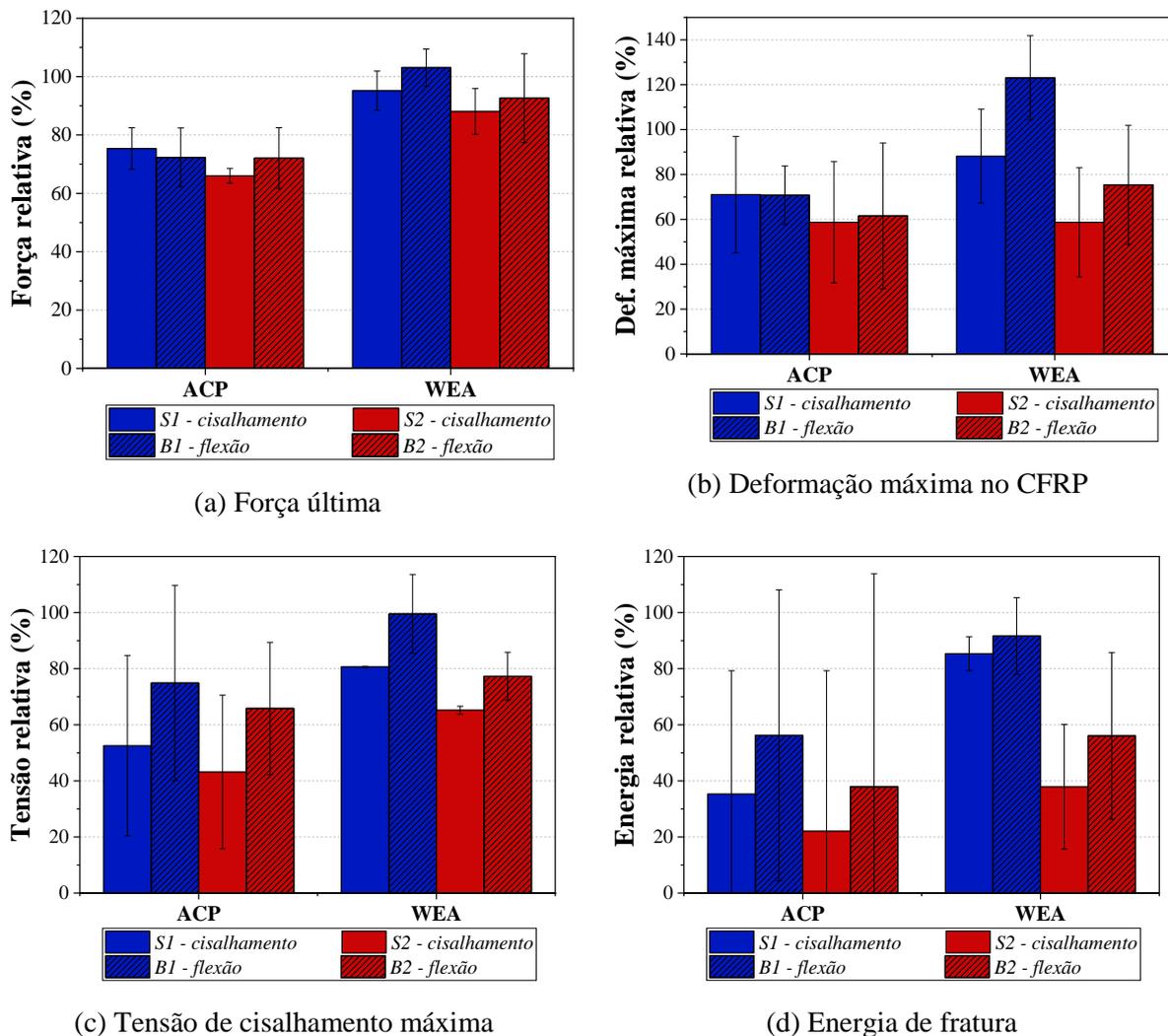
(b) Deformação máxima axial

(c) Deformação máxima radial

Fonte: A Autora

Conforme ilustra a Figura 4.69, com relação aos ensaios de cisalhamento e flexão, foi constatada significativa redução na tensão de cisalhamento máxima e na energia de fratura da interface FRP-concreto ao final da exposição ao protocolo de acondicionamento acelerado (ACP) já a exposição ao intemperismo alterou de maneira mais evidente as propriedades mecânicas dos modelos reforçados com a resina do tipo 2.

Figura 4.69: Propriedades mecânicas relativas para os modelos ensaiados ao cisalhamento e à flexão



Fonte: A Autora

A aderência entre a manta de CFRP e o substrato de concreto é função de ligações mecânicas e químicas entre esses dois materiais, na presença da água ou umidade, as ligações químicas entre os compostos poliméricos e o C-S-H são enfraquecidas, resultando em redução na capacidade de transferência de esforços entre o FRP e o concreto.

Apesar de alguns autores, dentre eles Tatar e Hamilton (2016a), afirmarem que o condicionamento em ambiente com umidade e temperatura elevada gere resultados de

durabilidade pessimistas quando comparados com os resultados de amostras expostas ao intemperismo o mesmo não pode ser afirmado a partir dos resultados da presente pesquisa.

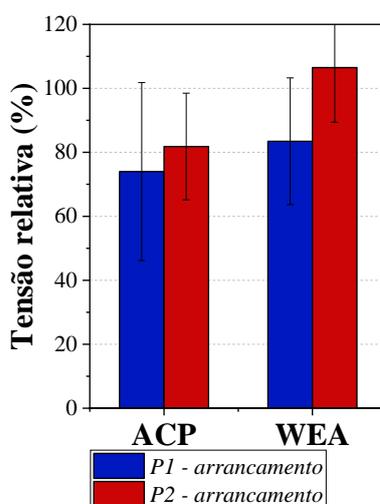
Observando a Figura 4.69 é possível notar que as taxas de redução na aderência FRP-concreto para os modelos reforçados com a resina 2 expostos por 12 meses ao intemperismo foram muito similares às taxas de degradação observadas nos modelos acondicionados conforme o protocolo de acondicionamento acelerado, entretanto, para os modelos reforçados com a resina 1, as taxas de degradação das amostras mantidas no protocolo foram superiores às taxas observadas para os modelos expostos ao intemperismo.

Neste caso é possível que a resina 1 realmente apresente durabilidade superior à resina 2 quando exposta ao intemperismo ou então a velocidade de degradação da resina 1 quando exposta ao intemperismo seja inferior à velocidade de degradação da resina 2, fato que só pode ser comprovado por meio de ensaios de degradação envolvendo períodos de exposição ao intemperismo mais longos.

Por fim, os resultados dos ensaios de cisalhamento e de flexão aqui apresentados indicaram que a aderência FRP-concreto assim como a sua durabilidade estão diretamente relacionadas ao tipo de resina epóxi empregada, constatação análoga também é apontada por Choi *et al.* (2012). Deng *et al.* (2015) complementam afirmando que os sistemas de reforço EBR-FRP apresentam características de durabilidade que só podem ser estabelecidas mediante ensaio.

Os resultados para o ensaio de arrancamento são apresentados na Figura 4.70 a seguir.

Figura 4.70: Tensão de arrancamento máxima relativa



Fonte: A Autora

Os ensaios de arrancamento também apontaram redução na tensão de aderência entre o FRP e o substrato de concreto, conforme indica a Figura 4.70, além disso, do ponto de vista qualitativo, o ensaio refletiu com clareza a modificação nos modos de falha das amostras expostas ao protocolo de acondicionamento acelerado.

Finalmente, as recomendações normativas referentes à deformação efetiva atuando no FRP foram comparadas com os resultados aferidos experimentalmente, sendo possível concluir que as formulações teóricas tanto do ACI 440.2R (2017) como da FIB *Bulletin* 90 (2019) referentes à deformação efetiva para elementos confinados se mostraram conservadoras.

Com relação às recomendações propostas pelas normas para a deformação efetiva no caso de reforço ao cisalhamento, apesar de conservadoras para os modelos de referência, as recomendações tanto do ACI 440.2R (2017) como da FIB *Bulletin* 90 (2019) representaram bem as deformações obtidas nos modelos expostos à degradação ambiental.

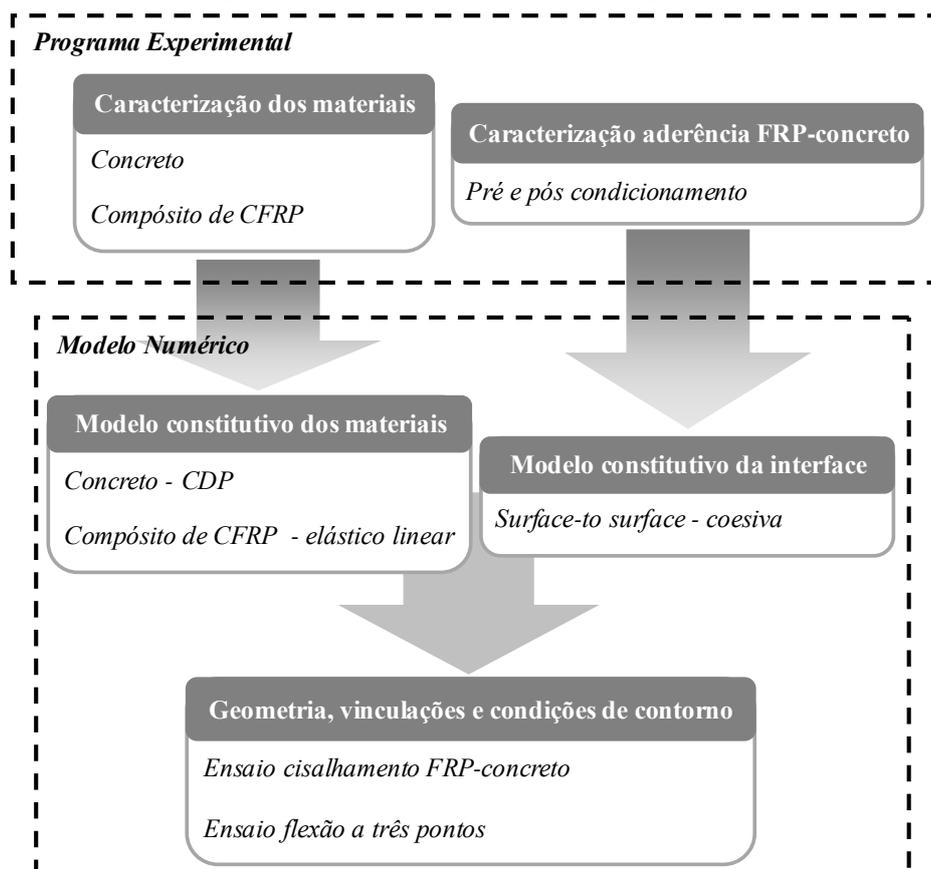
As recomendações propostas pelo ACI 440.2R (2017) e pela FIB *Bulletin* 90 (2019) para o cálculo das deformações efetivas no caso de reforço à flexão forneceram resultados superiores aos observados experimentalmente. O emprego de uma deformação limite conforme proposto pela AASHTO FRPS-1 (2010) ou a inclusão de um coeficiente associado à degradação da interface - BDF conforme proposto por Tatar e Hamilton (2016b) - foram capazes de representar melhor as deformações no CFRP para os modelos expostos ao acondicionamento acelerado e ao intemperismo.

5 MODELAGEM NUMÉRICA DA INTERFACE FRP-CONCRETO

Conforme apontado pelos resultados experimentais, a aderência FRP-concreto em estruturas reforçadas à flexão e ao cisalhamento se mostrou bastante sensível à degradação quando as amostras foram expostas às diferentes condições ambientais.

Nesse sentido, o presente capítulo traz a modelagem numérica dos ensaios de cisalhamento e flexão com a finalidade de melhor entender o comportamento da interface FRP-concreto e propor parâmetros de calibração. A Figura 5.1 ilustra um resumo das etapas que envolvendo o desenvolvimento do modelo.

Figura 5.1: Resumo das etapas da modelagem numérica



Fonte: A autora

Os modelos numéricos foram desenvolvidos em elementos finitos com o auxílio do *software* Abaqus 6.14. Os modelos constitutivos empregados para a simulação do concreto, do

FRP e para a modelagem da interface FRP-concreto são apresentados detalhadamente a seguir.

5.1 Modelo constitutivo dos materiais

Nas simulações numéricas optou-se por representar os elementos de concreto e a manta de FRP enquanto a aderência FRP-concreto foi considerada por meio de uma lei constitutiva para a interface.

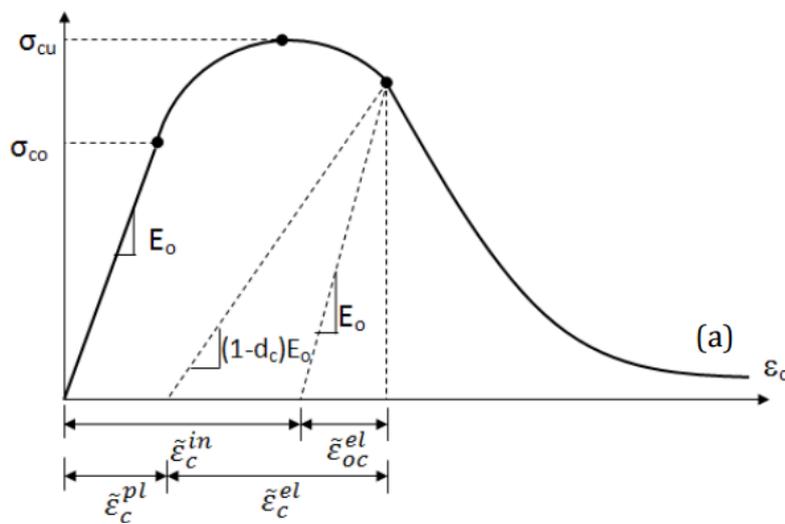
5.1.1 Concreto

O modelo constitutivo empregado para a representação do comportamento do concreto foi o *Concrete Damaged Plasticity* (CDP).

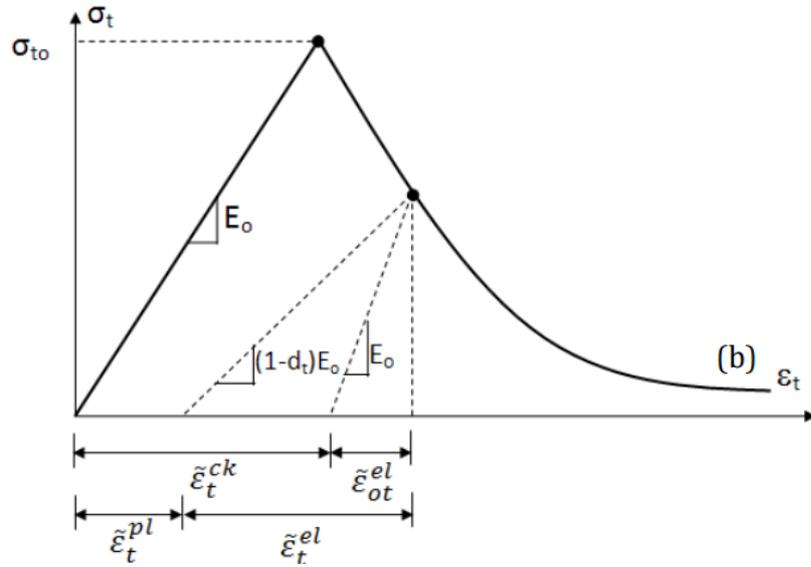
O CDP é um modelo de dano acoplado à plasticidade proposto por Lubliner *et al.* (1989) e modificado por Lee e Fenves (1998), sendo um modelo já implementado no Abaqus e consolidado na representação do comportamento mecânico do concreto e outros materiais quase-frágeis. O modelo assume dois mecanismos de falha: a fissuração por tração e o esmagamento à compressão do concreto. A evolução da superfície de plastificação é controlada pelas deformações plásticas de tração e compressão equivalentes.

A resposta do concreto à tração e à compressão uniaxial neste modelo é apresentada na Figura 5.2 a seguir.

Figura 5.2: Resposta do concreto quando submetido à compressão ou à tração



(a) Compressão



(b) Tração

Fonte: Abaqus (2014)

Da Figura 5.2 é possível notar que a resposta do concreto no descarregamento é penalizada em função da degradação da rigidez elástica do material. Essa degradação é caracterizada pelas variáveis de dano d_c e d_t variando de zero a um (em que “0” está associado à rigidez do material íntegro e “1” à total perda de rigidez).

Dessa forma, as relações tensão-deformação para o concreto sob tração e compressão uniaxial são dadas pelas Equações 5.1 e 5.2 a seguir, em que E_0 é o módulo de elasticidade do material não degradado; ε_t e ε_c são as deformações totais; σ_t e σ_c são as tensões efetivas e $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ e $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ são as deformações plásticas.

$$\sigma_t = (1 - d_t) \cdot E_0 \cdot (\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (5.1)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) \cdot E_0 \cdot (\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (5.2)$$

O critério de plastificação do modelo foi proposto por Lubliner *et al.* (1988) e aplicado por Lee e Fenves (1998), conforme a Equação 5.3.

$$F = \frac{1}{1 - \alpha} \left(\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\tilde{\varepsilon}^{pl}) \langle \bar{\sigma}_{\max} \rangle - \gamma \langle -\bar{\sigma}_{\max} \rangle \right) - \bar{\sigma}_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (5.3)$$

Na Equação 5.3, \bar{p} é a tensão hidrostática, \bar{q} é a tensão equivalente de Mises e $\beta(\tilde{\epsilon}^{pl})$ é a função de plastificação, expressa pela Equação 5.4, em que $\bar{\sigma}_c$ e $\bar{\sigma}_t$ são as tensões efetivas de compressão e tração e $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$ e $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ as respectivas deformações plásticas.

$$\beta(\tilde{\epsilon}^{pl}) = \frac{\bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl})}{\bar{\sigma}_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl})} (1 - \alpha) - (1 + \alpha) \quad (5.4)$$

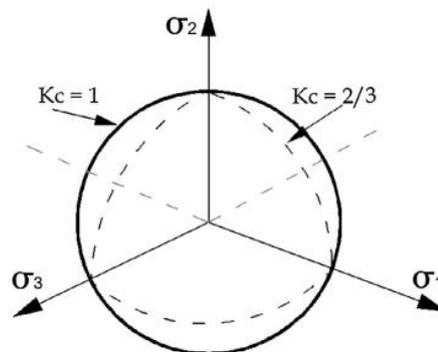
Ainda na Equação 5.4, o parâmetro α é calculado por meio da Equação 5.5, em que f_{b0} é a resistência à compressão biaxial e f_{c0} é a resistência à compressão uniaxial.

$$\alpha = \frac{f_{b0}/f_{c0} - 1}{2(f_{b0}/f_{c0}) - 1} \quad (5.5)$$

O formato da superfície de plastificação é definida pelo parâmetro γ , indicado na Equação 5.6. Em que K_c é a razão entre as tensões de Mises nos meridianos de tração e compressão que definem o formato da superfície de plastificação no plano desviador (Figura 5.3).

$$\gamma = \frac{3(1 - K_c)}{2K_c - 1} \quad (5.6)$$

Figura 5.3: Superfície de plastificação no plano desviador (2/3 corresponde ao critério de falha de Rankine e 1 corresponde ao critério de Drucker-Prager)



Fonte: Abaqus (2014)

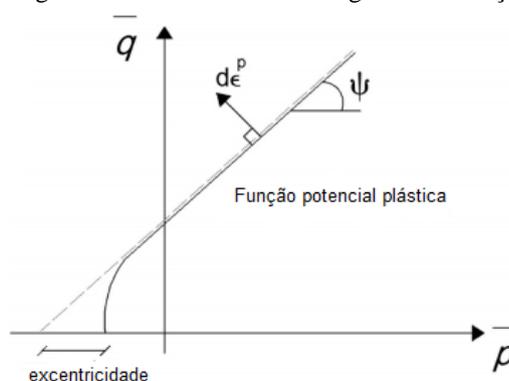
O potencial de plastificação assume um fluxo não-associativo sendo utilizada a função

hiperbólica $G(\sigma)$ de Drucker-Prager indicada na Equação 5.7. Em que ε é o parâmetro de excentricidade, que define a taxa com que a função potencial plástica se aproxima da assíntota, ψ é o ângulo de dilatação medido no plano meridional da maior pressão de confinamento e f_{t0} é a resistência à tração uniaxial.

$$G(\sigma) = \sqrt{(\varepsilon f_{t0} \operatorname{tg} \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \operatorname{tg} \psi \quad (5.7)$$

A Figura 5.4 a seguir representa esquematicamente os parâmetros de excentricidade e de ângulo de dilatação.

Figura 5.4: Excentricidade e ângulo de dilatação



Fonte: Genikomsou e Polak (2015)

Dessa forma, os valores dos parâmetros de entrada do modelo numérico são apresentados na Tabela 5.1 em que E_c indica o módulo de elasticidade tangente inicial do concreto obtido por meio da média dos resultados experimentais e ν é o coeficiente de Poisson.

Tabela 5.1: Parâmetros para o modelo numérico do concreto no Abaqus

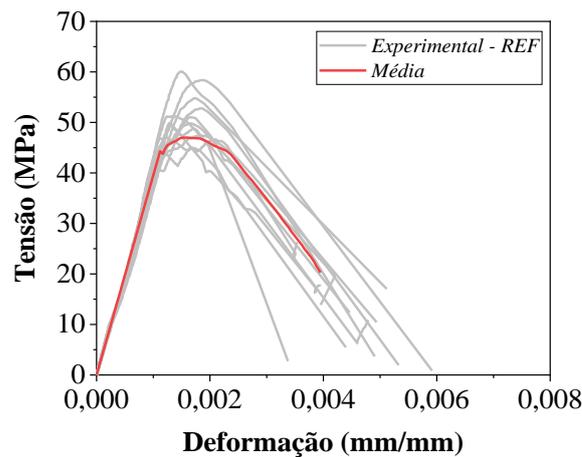
Parâmetros do concreto	
E_c	39556 MPa
ν	0,2
K_c	0,667
f_{b0}/f_{c0}	1,16
ε	0,1
ψ	30°
μ	0,0001

Fonte: A Autora

Além dos parâmetros apresentados na Tabela 5.1 é necessário ainda informar a relação entre as tensões e deformações plásticas do concreto tanto na compressão como na tração.

A curva empregada para o concreto à compressão foi baseada nos resultados obtidos experimentalmente para a caracterização do material (Figura 5.5), já para a representação do comportamento do concreto à tração foi empregada a fórmula proposta pelo FIB *Model Code* (2010).

Figura 5.5: Relação tensão *versus* deformação para o concreto comprimido



Fonte: A Autora

A resistência à tração f_t foi baseada nos valores de referência obtidos experimentalmente dos ensaios de tração por compressão diametral enquanto a energia de fratura G_f foi determinada a partir da Equação 5.8 proposta pelo FIB *Model Code* (2010), em que f_{cm} é a resistência à compressão média obtida experimentalmente.

$$G_f = 73f_{cm}^{0,18} \quad (5.8)$$

5.1.2 Compósito de CFRP

Para representar o comportamento do compósito de FRP foi considerada uma camada de CFRP com comportamento elástico-linear isotrópico.

A Tabela 5.2 apresenta as propriedades mecânicas empregadas para o FRP no modelo numérico. O módulo de elasticidade E_f foi baseado nos resultados experimentais de referência para a caracterização do compósito, destacando-se que os dois tipos de compósitos ensaiados (CFRP1 e CFRP2) apresentaram módulos de elasticidade equivalentes, sendo

representados numericamente pelas mesmas propriedades mecânicas.

Tabela 5.2: Propriedades do modelo numérico do FRP no Abaqus

Propriedades do CFRP	
E_f	232 GPa
ν	0,3
Espessura (por camada)	0,168 mm

Fonte: A Autora

O acoplamento do FRP à superfície de concreto é feito por meio da inserção de propriedades coesivas para a interface FRP-concreto.

5.2 Modelo constitutivo da interface FRP-concreto

O Abaqus permite que juntas adesivas sejam simuladas por meio de elementos finitos coesivos ou interfaces coesivas. O Guia de Usuário do Abaqus (2014) indica, para o caso de juntas adesivas em que a espessura do adesivo seja insignificamente pequena, que a melhor estratégia para a modelagem é por meio de interfaces coesivas.

A interface coesiva é definida para um par de superfícies por meio de uma lei de tração *versus* separação com comportamento elástico linear seguido pelo início do dano e a sua evolução. O comportamento elástico é escrito em termos de uma matriz constitutiva elástica K que relaciona as tensões normais e de cisalhamento com as respectivas separações normais e tangenciais na interface (ABAQUS, 2014).

O comportamento elástico da interface pode ser representado pela Equação 5.9, em que o vetor de tensões t consiste de três componentes (no caso de problemas tridimensionais): t_n , associado à tensão na direção normal, t_s e t_t , associados às tensões de cisalhamento. As correspondentes separações são representadas pelos componentes δ_n , δ_s e δ_t .

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{sn} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{tn} & K_{ts} & K_{tt} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = K \cdot \delta \quad (5.9)$$

Por padrão o Abaqus considera que os componentes de rigidez normal e tangencial não

são acoplados, ou seja, a separação normal pura não dá origem a forças coesivas nas direções de cisalhamento e o deslizamento puro não dá origem a forças coesivas na direção normal. Neste caso a Equação 5.9 pode ser reescrita conforme a Equação 5.10 e os coeficientes de rigidez elástica K_{nn} , K_{ss} e K_{tt} deverão ser definidos pelo usuário.

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = K \cdot \delta \quad (5.10)$$

Quando a tensão na interface atinge o limite da parcela elástica tem-se o início do dano no material. Os critérios de dano para interface existentes no Abaqus consistem no de máxima tensão nominal, máxima separação nominal, critério de tensão quadrática e critério de separação quadrática.

No caso de se optar pelo critério de máxima tensão nominal, o dano tem início quando uma ou todas as tensões na interface superam o limite determinado na Equação 5.11 em que t_n^0 , t_s^0 e t_t^0 são as tensões máximas ocorrendo na interface sem que o dano tenha iniciado.

$$\max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1 \quad (5.11)$$

Conforme o critério de tensão quadrática o dano tem início quando o limite indicado pela Equação 5.12 for superado.

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (5.12)$$

Uma vez que o critério de iniciação do dano é atingido, a lei de evolução do dano descreve a taxa de degradação da rigidez coesiva. Neste caso, uma lei de degradação linear foi usada para descrever a evolução do dano, sendo o critério de fratura de Benzeggagh e Kenane (1996) empregado para definir a degradação da superfície coesiva, conforme indica a Equação 5.13.

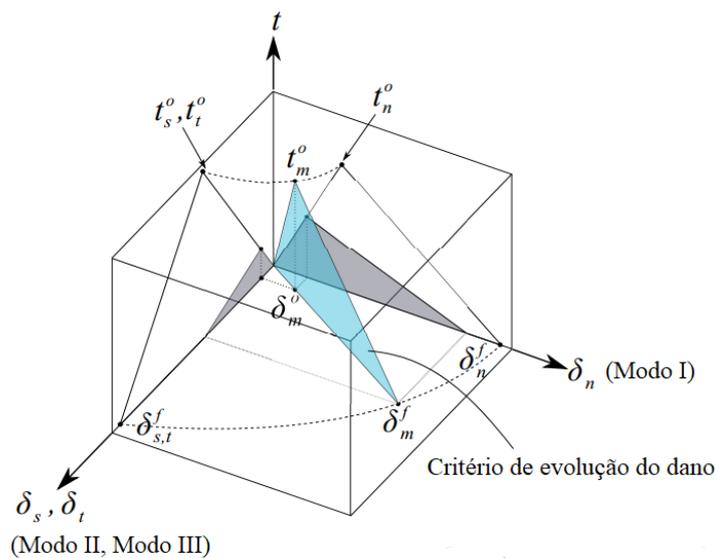
Na Equação 5.13 G_{mc} é a energia crítica de fratura, considerando o comportamento

misto; G_n , G_s e G_t representam as energias de fratura no Modo I, Modo II e Modo III, respectivamente e η é um parâmetro da propriedade coesiva.

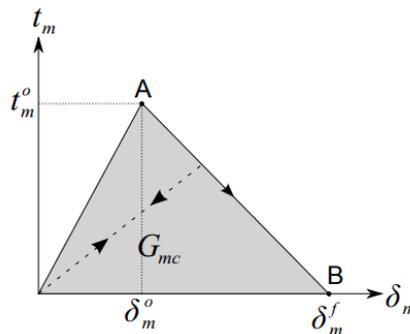
$$G_n^c + (G_s^c - G_n^c) \left\{ \frac{G_s + G_t}{G_n + G_s + G_t} \right\}^\eta = G_{mc} \quad (5.13)$$

A Figura 5.6 a seguir ilustra a dependência do início e evolução do dano para um modo misto de falha. A figura representa a tensão no eixo vertical e as separações normais e de cisalhamento ao longo dos dois eixos horizontais. Os triângulos ilustrados nos dois planos de coordenadas verticais representam a resposta sob tensão normal pura e cisalhamento puro, respectivamente, enquanto o plano vertical intermediário (destacado em azul) representa a resposta ao critério de dano em condições de modo misto.

Figura 5.6: Critério de evolução do dano da interface



(a) Modo misto de evolução do dano



(b) Lei linear de degradação

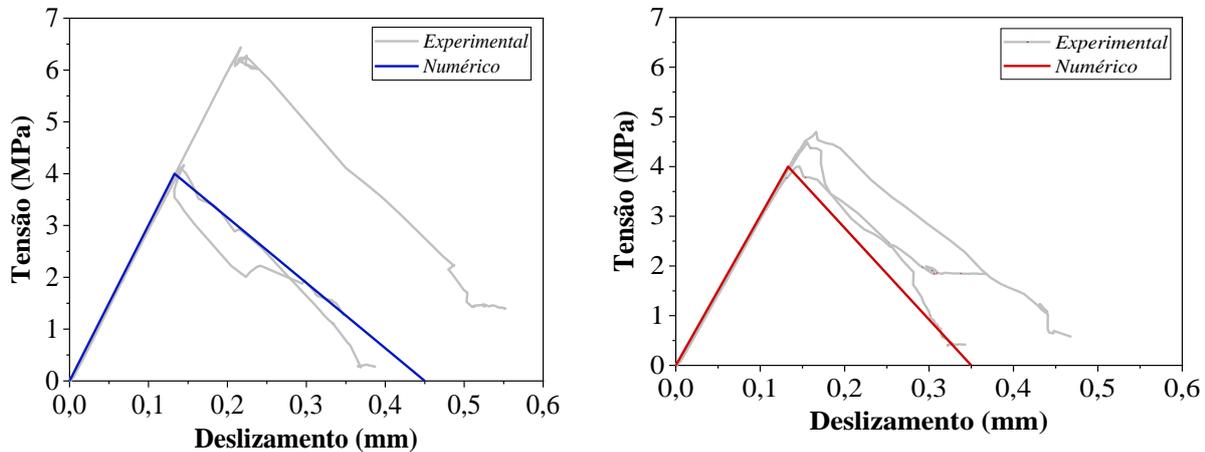
Fonte: Baran, Warnet e Akkerman (2018)

Dessa forma, para representar o processo de descolamento do FRP, o modelo numérico empregado considerou propriedade de contato coesiva entre a superfície de concreto e do FRP.

A rigidez elástica K_{ss} assim como a tensão limite t_s^0 e a energia de fratura na interface G_s para o Modo II foram baseadas nas curvas simplificadas obtidas a partir dos resultados experimentais dos ensaios de cisalhamento da interface FRP-concreto e de flexão a três pontos.

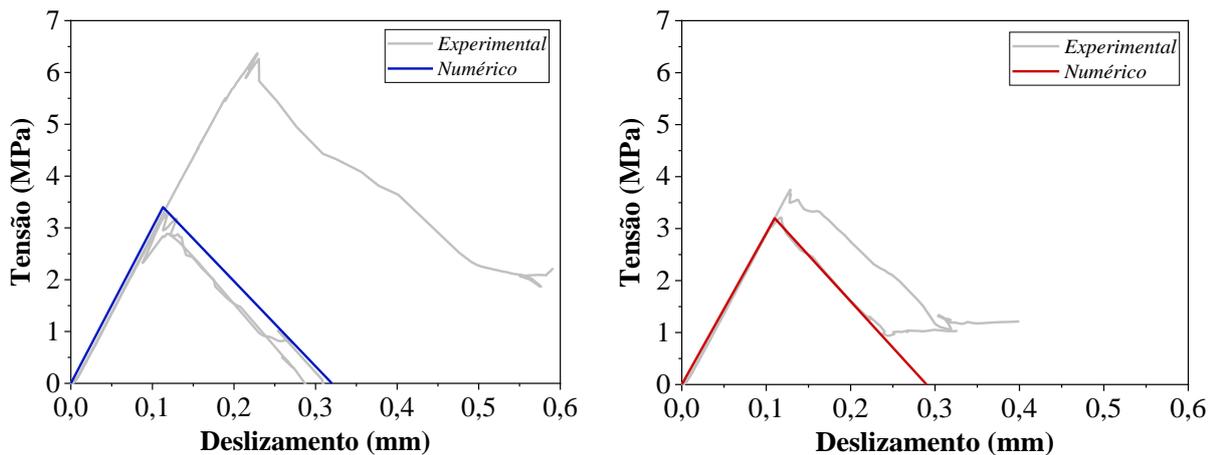
A Figura 5.7 a seguir ilustra algumas das curvas empregadas para a determinação dos parâmetros de simulação para Modo II de fratura (direção paralela à orientação das fibras do compósito). As curvas foram ajustadas a partir de análises paramétricas a fim de se obter a melhor resposta numérica em comparação com os resultados experimentais.

Figura 5.7: Curvas simplificadas para tensão de cisalhamento *versus* deslizamento



(a) Referência – Cisalhamento - Resina 1

(b) Referência – Cisalhamento - Resina 2



(c) Referência – Flexão - Resina 1

(d) Referência – Flexão - Resina 2

Fonte: A Autora

Considerando a falta de ensaios para a caracterização do Modo III de fratura (direção

perpendicular às fibras), os parâmetros do modelo numérico foram considerados iguais aos empregados para o Modo II.

Nos ensaios de flexão a três pontos e de cisalhamento o Modo I de fratura na interface FRP-concreto não é mobilizado e, portanto, não interfere nos resultados das simulações. Assim, na falta de resultados experimentais para a definição do coeficiente de rigidez K_{mn} , da energia de fratura G_n e da tensão limite t_n^0 os mesmos foram considerados iguais aos parâmetros utilizados para o Modo II.

Para iniciação do dano foi empregado o critério de máxima tensão nominal, com evolução linear do dano e critério de fratura de Benzeggagh e Kenane (1996). O parâmetro η da propriedade coesiva foi estimado conforme Obaidat, Heyden e Dahlblom (2010).

A Tabela 5.3 indica os valores dos parâmetros empregados para representação da interface FRP-concreto.

Tabela 5.3: Propriedades da interface coesiva FRP-concreto

	Cisalhamento		Flexão	
	Resina 1	Resina 2	Resina 1	Resina 2
$K_{mn} = K_{ss} = K_{tt}$	30 MPa/mm	30 MPa/mm	30 MPa/mm	30 MPa/mm
$t_n^0 = t_s^0 = t_t^0$	4,0 Mpa	4,0 MPa	3,4 MPa	3,2 MPa
$G_n = G_s = G_t$	0,9 MPa.mm	0,7 MPa.mm	0,54 MPa.mm	0,46 MPa.mm
η	1,45	1,45	1,45	1,45

Fonte: A Autora

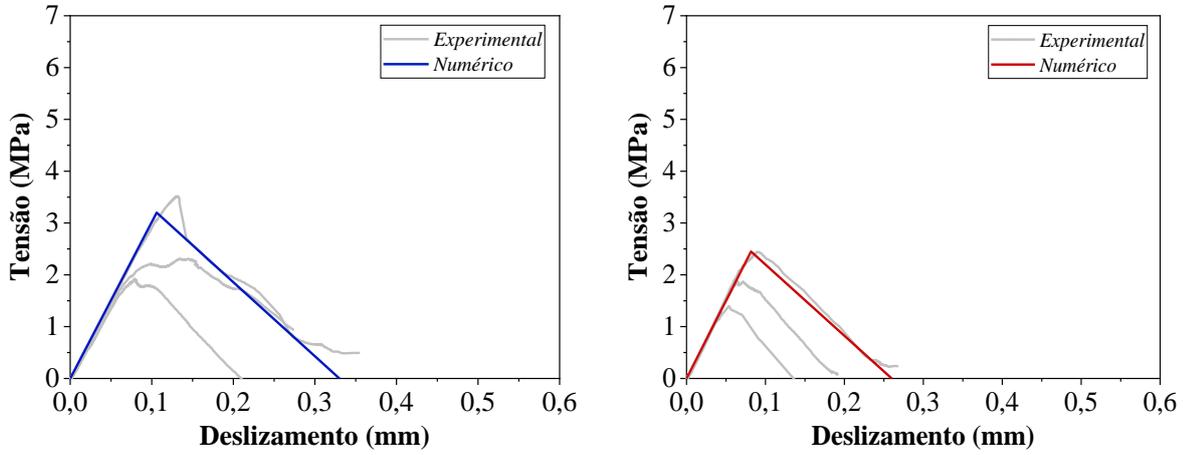
Conforme observação experimental, a exposição dos modelos ao protocolo de acondicionamento acelerado e ao intemperismo modificou as curvas tensão de cisalhamento *versus* deslizamento na interface, dessa forma, os parâmetros da interface foram modificados para melhor representar o comportamento dos modelos ensaiados. Estratégia semelhante também foi empregada por Ghiassi (2013) para simular o descolamento FRP-alvenaria e por Arruda *et al.* (2016) para simular o efeito de elevadas temperaturas no descolamento FRP-concreto.

As Figuras 5.8 e 5.9 ilustram as curvas simplificadas adotadas para a simulação do comportamento da interface FRP-concreto após exposição ao protocolo de acondicionamento acelerado (ACP) e ao intemperismo (WEA).

A partir das curvas ajustadas a Tabela 5.5 apresenta os valores dos parâmetros

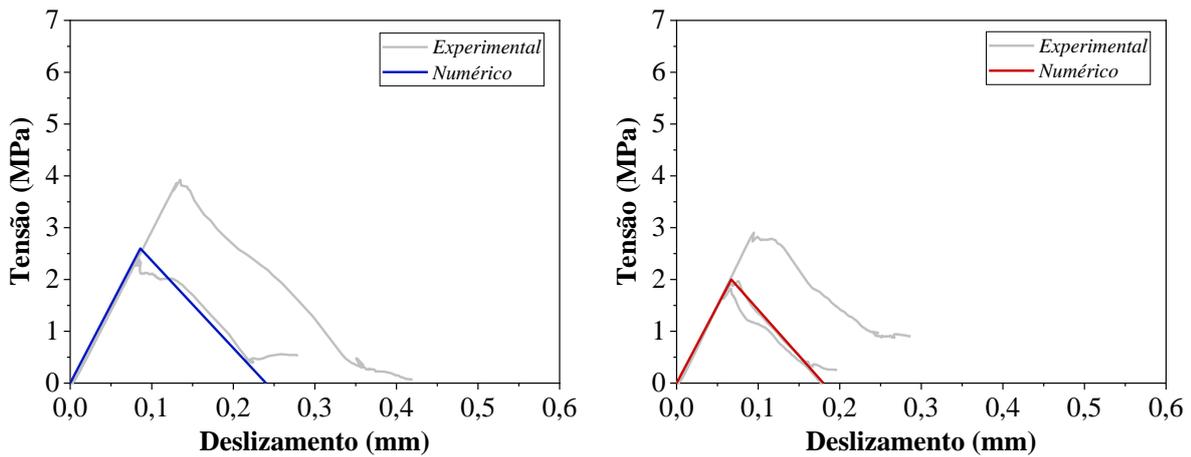
empregados para simulação da interface.

Figura 5.8: Curvas simplificadas para tensão de cisalhamento *versus* deslizamento



(a) ACP – Cisalhamento - Resina 1

(b) ACP – Cisalhamento - Resina 2

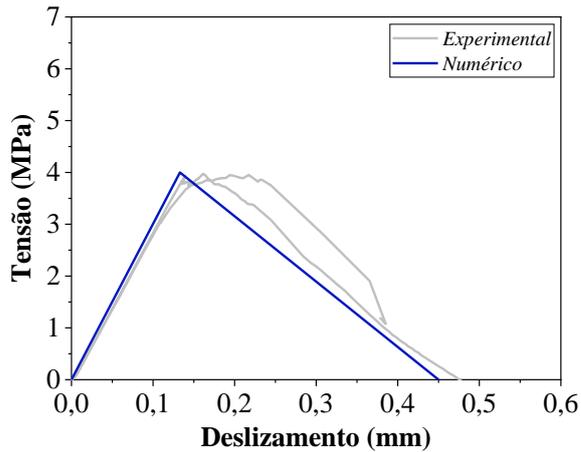


(c) ACP – Flexão - Resina 1

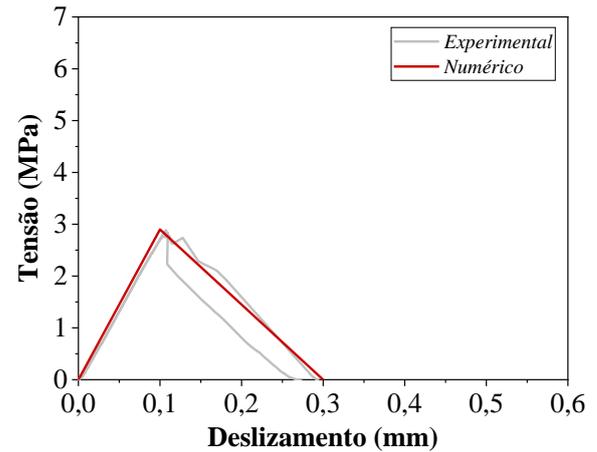
(d) ACP – Flexão - Resina 2

Fonte: A Autora

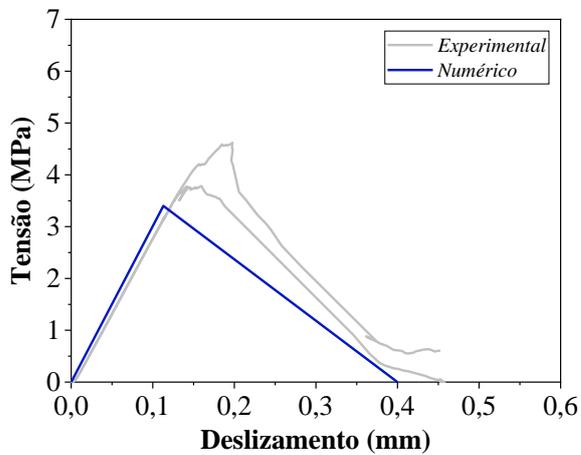
Figura 5.9: Curvas simplificadas para tensão de cisalhamento *versus* deslizamento



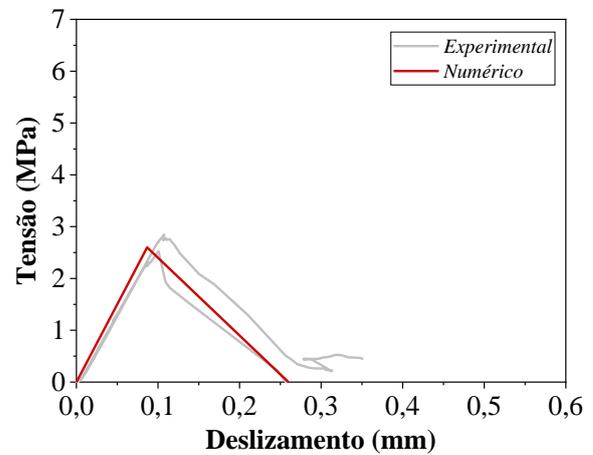
(a) WEA – Cisalhamento - Resina 1



(b) WEA – Cisalhamento - Resina 2



(c) WEA – Flexão - Resina 1



(d) WEA – Flexão - Resina 2

Fonte: A Autora

Tabela 5.5: Propriedades da interface coesiva FRP-concreto

	Cisalhamento		Flexão		
	Resina 1	Resina 2	Resina 1	Resina 2	
ACP	$K_{mn} = K_{ss} = K_{tt}$	30 MPa/mm	30 MPa/mm	30 MPa/mm	30 MPa/mm
	$t_n^0 = t_s^0 = t_t^0$	3,2 MPa	2,45 MPa	2,6 MPa	2,0 MPa
	$G_n = G_s = G_t$	0,53 MPa.mm	0,32 MPa.mm	0,31 MPa.mm	0,18 MPa.mm
	η	1,45	1,45	1,45	1,45
WEA	$K_{mn} = K_{ss} = K_{tt}$	30 MPa/mm	30 MPa/mm	30 MPa/mm	30 MPa/mm
	$t_n^0 = t_s^0 = t_t^0$	4,0 MPa	2,9 MPa	3,4 MPa	2,6 MPa
	$G_n = G_s = G_t$	0,9 MPa.mm	0,44 MPa.mm	0,68 MPa.mm	0,34 MPa.mm
	η	1,45	1,45	1,45	1,45

Fonte: A Autora

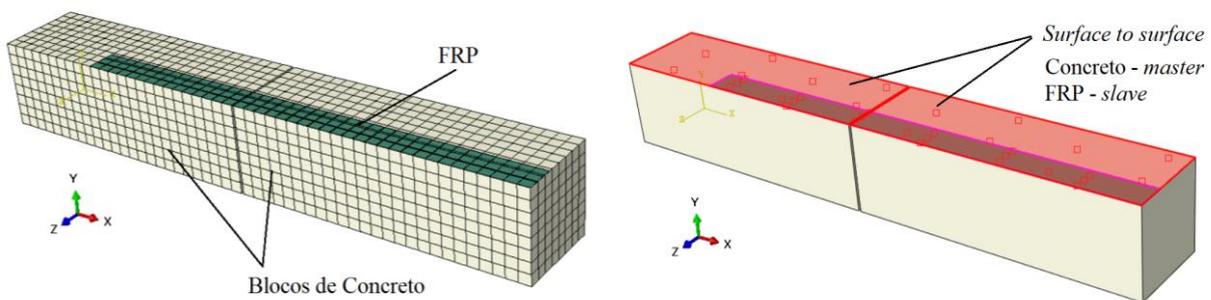
5.3 Geometria, vinculação e condições de contorno

A seguir são apresentados maiores detalhes com relação à malha, geometria, vinculação e condições de contorno para cada modelo simulado.

5.3.1 Cisalhamento FRP-concreto

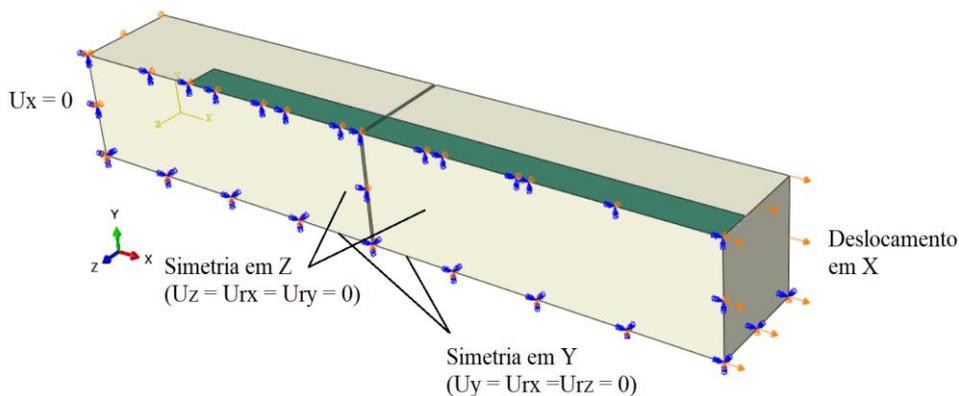
Para simular o ensaio de cisalhamento FRP-concreto, tanto os prismas de concreto quanto o reforço em FRP foram discretizados por meio de elementos tridimensionais quadrilaterais com ordem de aproximação linear (C3D8R - elemento sólido tridimensional com 8 nós e número de pontos de integração reduzido) e 10 mm de dimensão característica definida após análise de convergência de malha conforme representa a Figura 5.10 (a). As propriedades coesivas da interface FRP-concreto são inseridas para o par de superfícies indicada na Figura 5.10 (b).

Figura 5.10: Características do modelo numérico de cisalhamento



(a) Geometria e malha

(b) Interface coesiva



(c) Condições de contorno

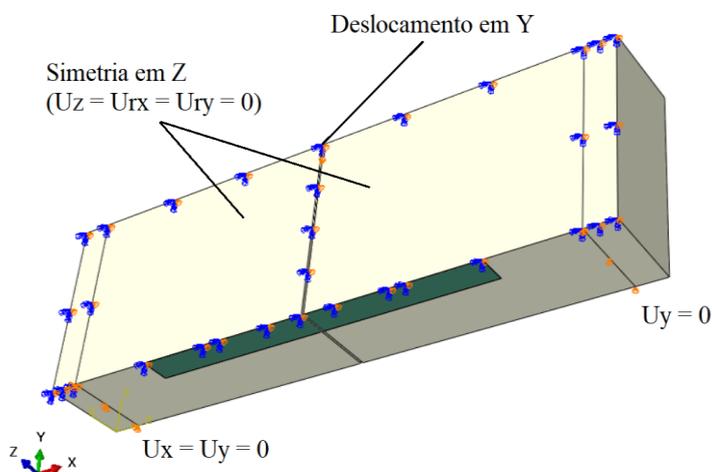
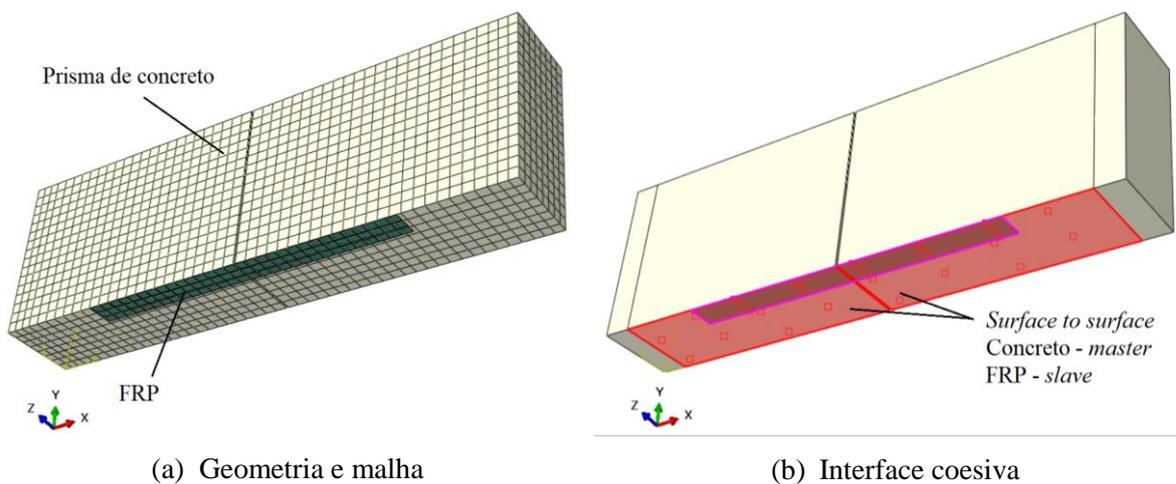
Fonte: A Autora

Conforme ilustra a Figura 5.10 (c), para representar o ensaio realizado a extremidade de um dos prismas foi considerada fixa ($U_x = 0$) e a extremidade oposta carregada por meio de deslocamentos impostos na direção X, além disso, a fim de reduzir o custo computacional do modelo 3D foi considerada a simetria em relação ao eixo Y e Z do modelo.

5.3.2 Flexão a três pontos

O ensaio de flexão a três pontos também foi discretizado por meio de elementos tridimensionais quadrilaterais com ordem de aproximação linear (C3D8R) e 10 mm de dimensão característica também definida após análise de convergência de malha (Figura 5.11 (a)). As propriedades coesivas da interface FRP-concreto são inseridas para as superfícies indicadas na Figura 5.11 (b).

Figura 5.11: Características do modelo numérico de flexão



Fonte: A Autora

A Figura 5.11 (c) indica o esquema para representação numérica do ensaio de flexão. No prisma de concreto com entalhe central foram considerados dois apoios, um fixo ($U_y = 0$) e um móvel ($U_x = U_y = 0$), com carregamento aplicado na região central do prisma por meio de deslocamentos impostos na direção Y. Para reduzir o custo computacional foi considerada a simetria em relação ao eixo Z do modelo 3D.

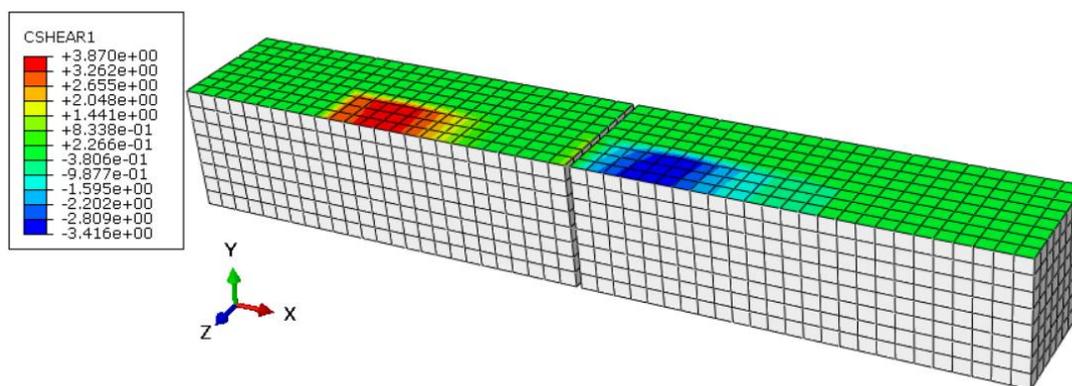
5.4 Resultados modelo numérico

Os resultados dos modelos numéricos de flexão e cisalhamento pré e pós condicionamento são apresentados e discutidos a seguir.

5.4.1 Cisalhamento FRP-concreto

Em conformidade com as observações experimentais, todos os modelos numéricos também falharam pelo completo descolamento do FRP da superfície de concreto. A Figura 5.12 ilustra a distribuição das tensões de cisalhamento na superfície de concreto no momento de falha do FRP ancorado no prisma esquerdo.

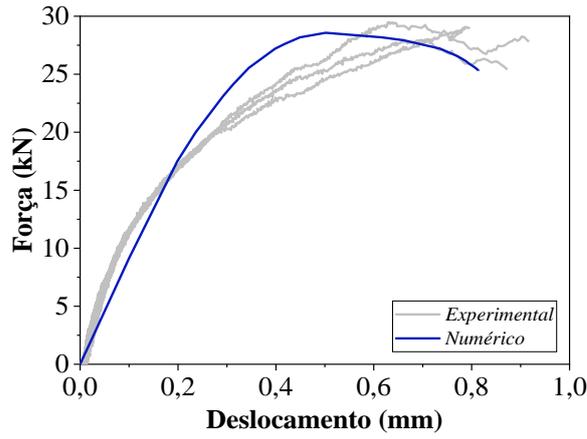
Figura 5.12: Tensão de cisalhamento ao longo da direção X no momento de falha do modelo de referência S1



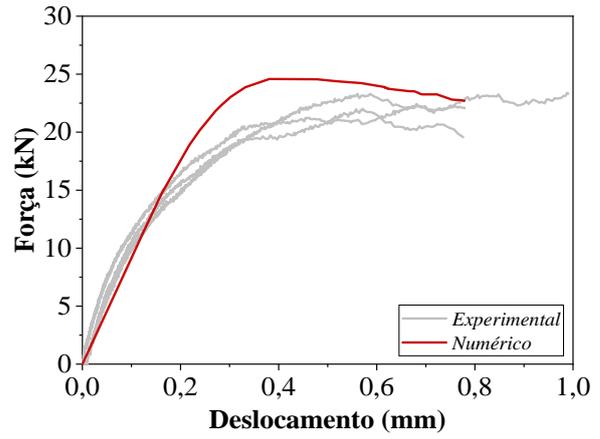
Fonte: A Autora

As Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 apresentam a comparação entre os resultados numéricos e experimentais para os modelos de referência (REF), expostos ao protocolo de acondicionamento acelerado (ACP) e ao intemperismo (WEA), respectivamente.

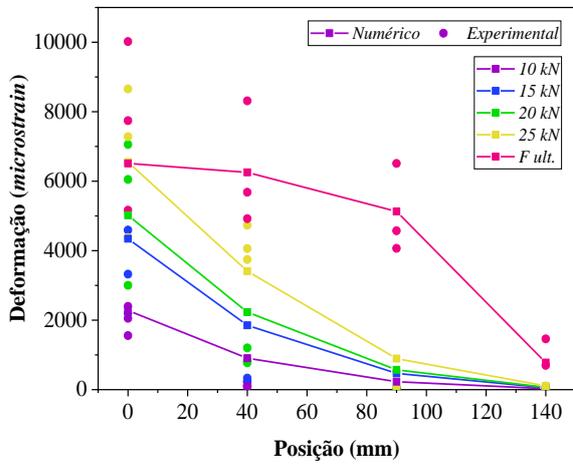
Figura 5.13: Curvas força *versus* deslocamento experimentais e numéricas



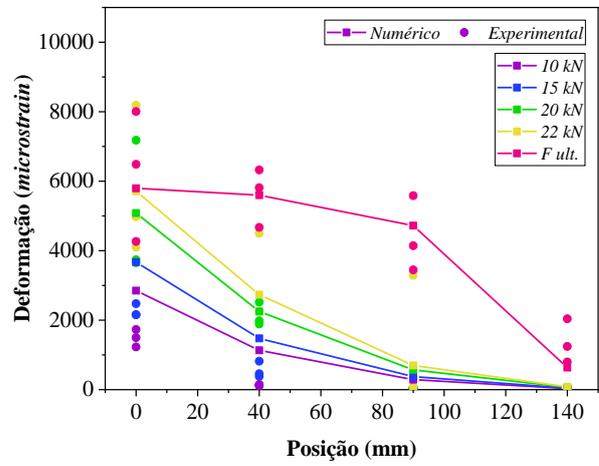
(a) Referência – Resina 1



(b) Referência – Resina 2



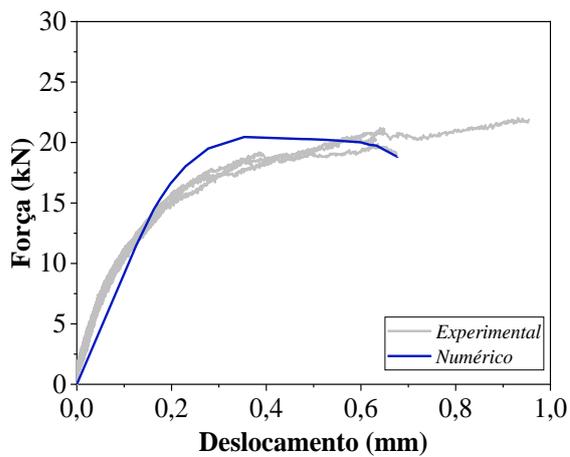
(c) Referência – Resina 1



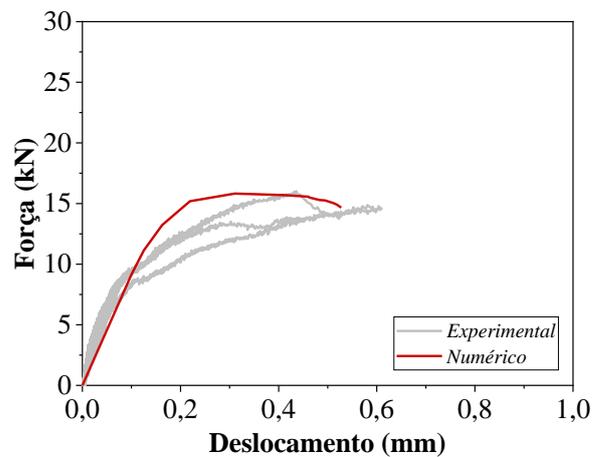
(d) Referência – Resina 2

Fonte: A Autora

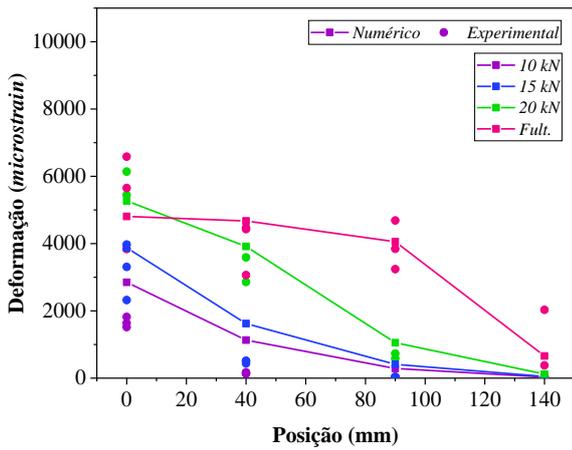
Figura 5.14: Curvas força versus deslocamento experimentais e numéricas



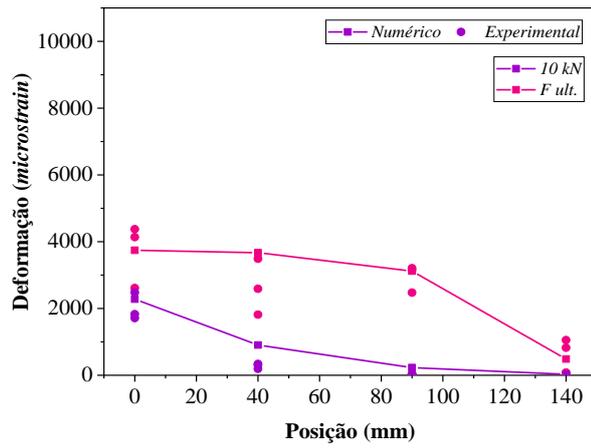
(a) Acondicionamento acelerado – Resina 1



(b) Acondicionamento acelerado – Resina 2



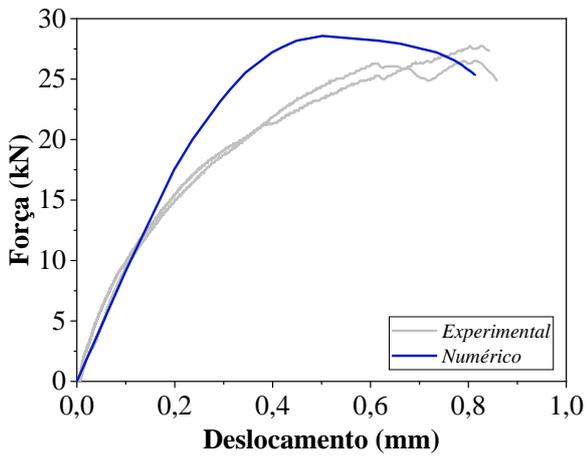
(c) Acondicionamento acelerado – Resina 1



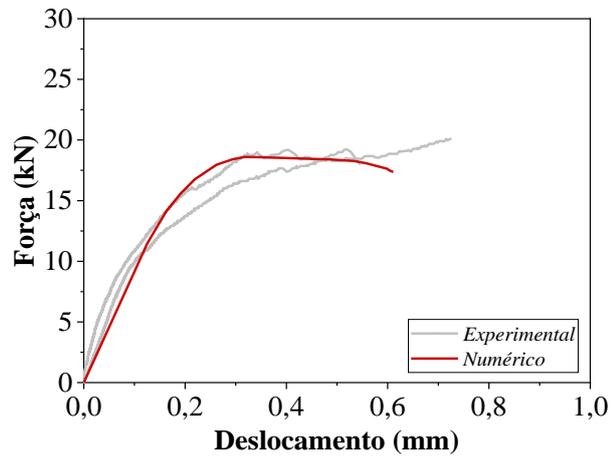
(d) Acondicionamento acelerado – Resina 2

Fonte: A Autora

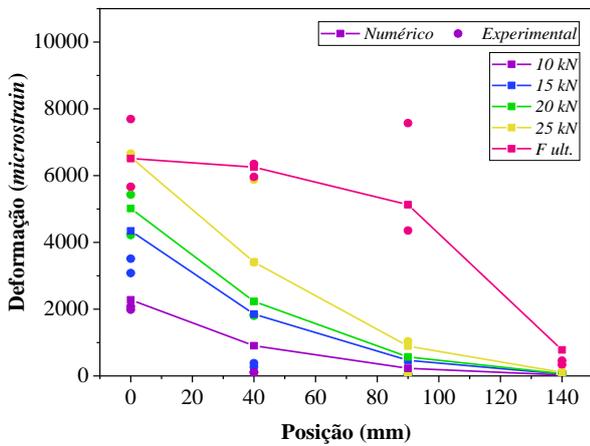
Figura 5.15: Curvas força versus deslocamento experimentais e numéricas



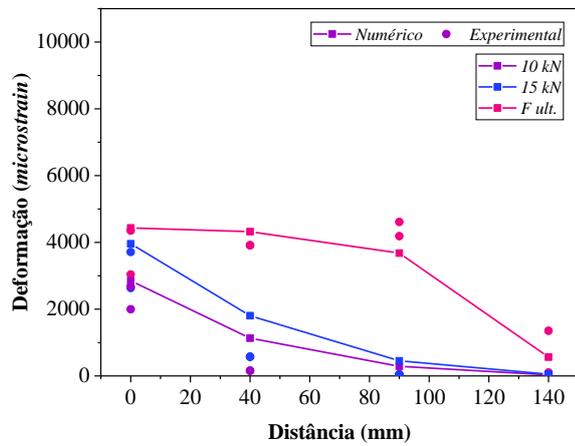
(a) Intemperismo – Resina 1



(b) Intemperismo – Resina 2



(c) Intemperismo – Resina 1



(d) Intemperismo – Resina 2

Fonte: A Autora

Observando as Figuras 5.13 a 5.15 é possível notar que o modelo numérico representou bem o comportamento força *versus* deslocamento, com boa correlação entre as rigidezes iniciais, representando bem a força última e deslocamento último experimentais. Além disso, observa-se também boa correspondência entre as deformações experimentais e numéricas ao longo do comprimento do FRP.

A Tabela 5.6 traz, em termos de força última e deformação última no FRP, a comparação entre os resultados experimentais e numéricos do ensaio de cisalhamento.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 5.6 e os gráficos das Figuras 5.13 a 5.15 fica evidente que a modificação da propriedade coesiva da interface FRP-concreto em função de cada ambiente de exposição conseguiu representar bem os modelos ensaiados, com diferenças entre os resultados não ultrapassando os 17%.

Tabela 5.6: Comparação dos resultados numéricos e experimentais para o ensaio de cisalhamento FRP-concreto

Identificação		Força última			Deformação no CFRP		
		Exp. (kN)	Num. (kN)	Exp./Num.	Exp. (%)	Num. (%)	Exp./Num.
S1	REF	27,42	25,30	1,08	0,76	0,65	1,17
	ACP	20,66	18,83	1,10	0,54	0,48	1,13
	WEA	26,10	25,30	1,03	0,67	0,65	1,03
S2	REF	21,63	22,68	0,95	0,63	0,58	1,09
	ACP	14,28	14,67	0,97	0,37	0,37	1,00
	WEA	19,05	17,36	1,10	0,37	0,44	0,84

Fonte: A Autora

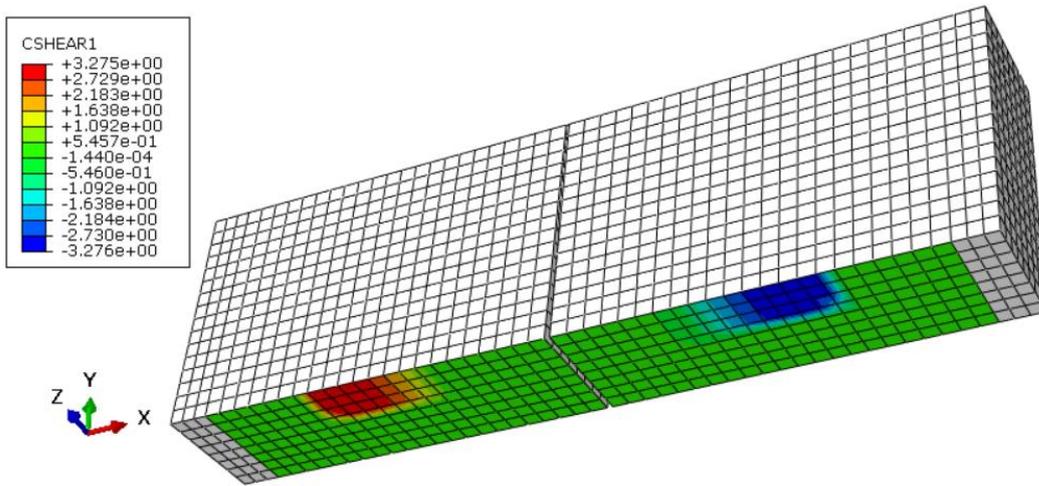
5.4.2 Flexão a três pontos

Os modelos numéricos simulados à flexão também falharam pelo completo descolamento do FRP da superfície de concreto, corroborando com as observações experimentais. A Figura 5.16 apresenta a distribuição das tensões de cisalhamento na superfície de concreto no momento de falha do modelo numérico marcado pelo descolamento do FRP.

As comparações entre as curvas provenientes dos resultados numéricos e experimentais para os modelos de referência (REF), expostos ao protocolo de acondicionamento acelerado (ACP) e ao intemperismo (WEA) são apresentadas nas Figuras 5.17, 5.18 e 5.19,

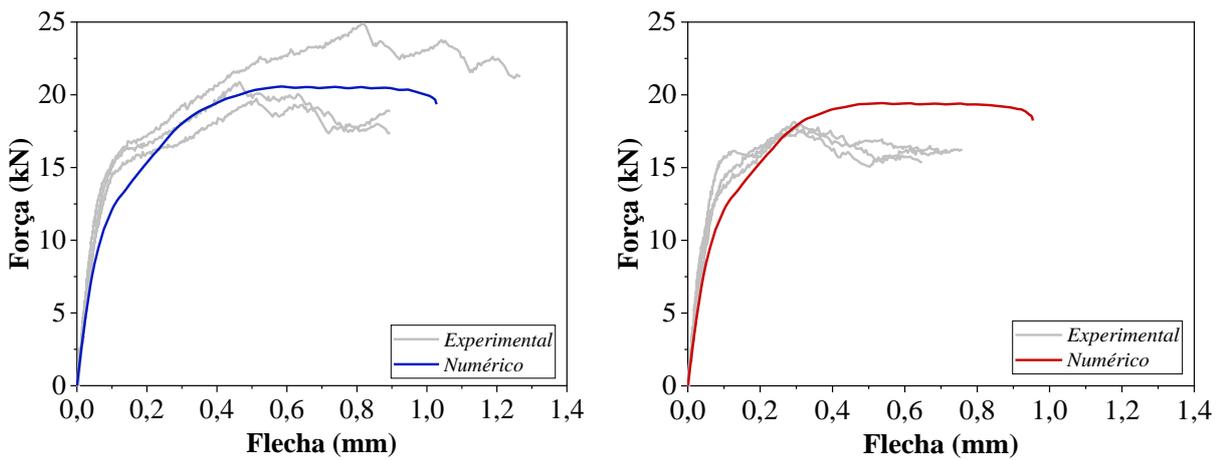
respectivamente.

Figura 5.16: Tensão de cisalhamento ao longo da direção X no momento de falha do modelo de referência B1



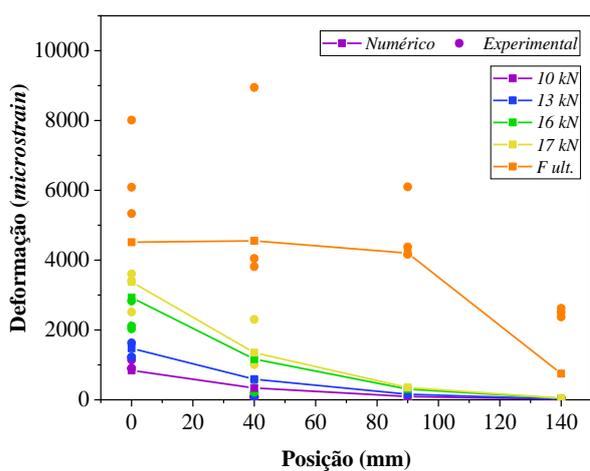
Fonte: A Autora

Figura 5.17: Curvas força versus deslocamento experimentais e numéricas

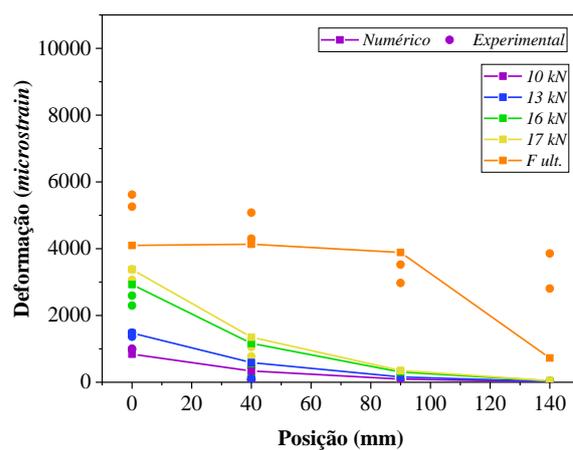


(a) Referência – Resina 1

(b) Referência – Resina 2



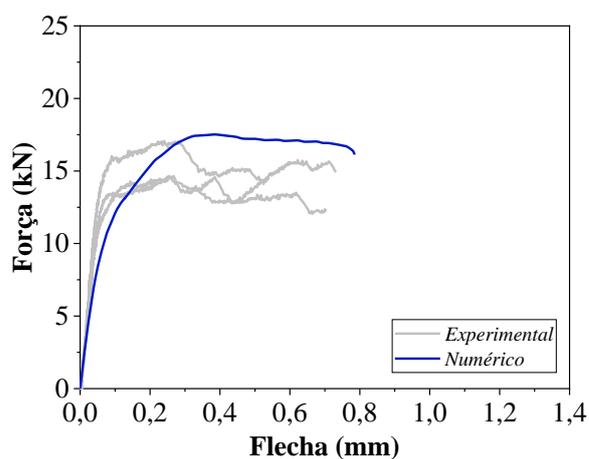
(c) Referência – Resina 1



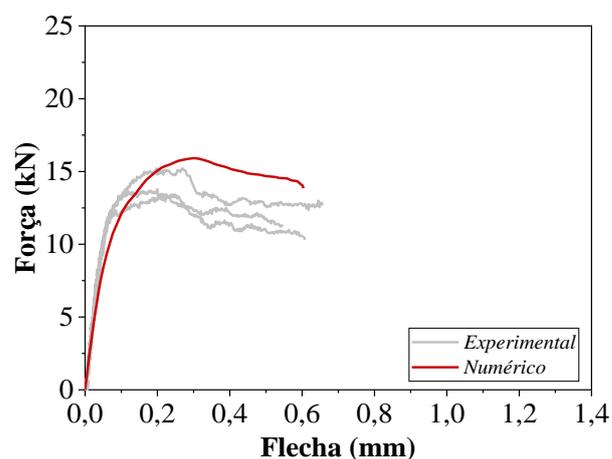
(d) Referência – Resina 2

Fonte: A Autora

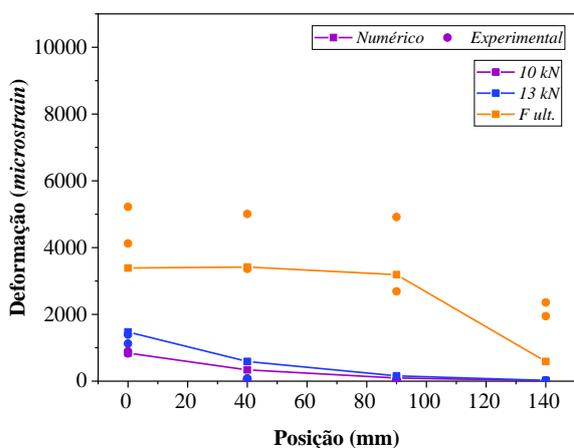
Figura 5.18: Curvas força versus deslocamento experimentais e numéricas



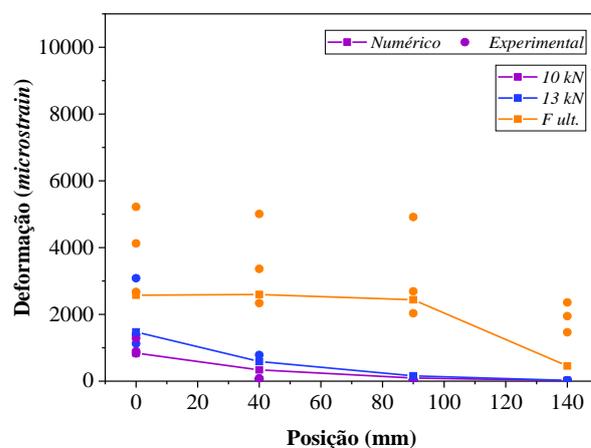
(a) Acondicionamento acelerado – Resina 1



(b) Acondicionamento acelerado – Resina 2

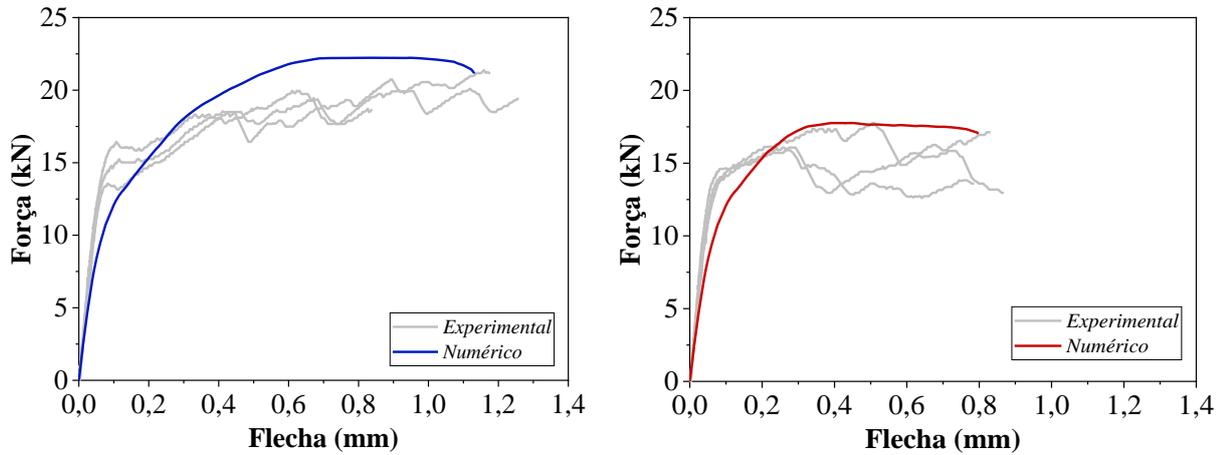


(c) Acondicionamento acelerado – Resina 1



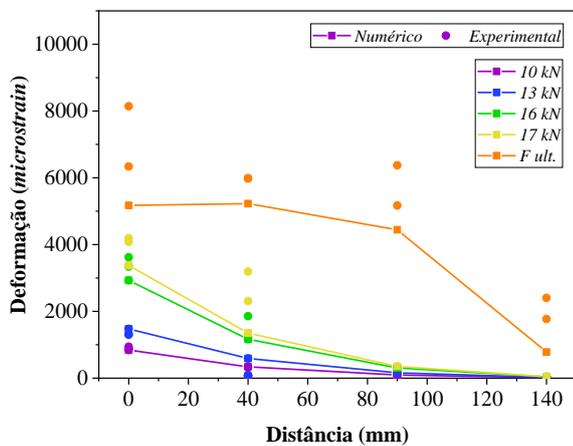
(d) Acondicionamento acelerado – Resina 2

Fonte: A Autora

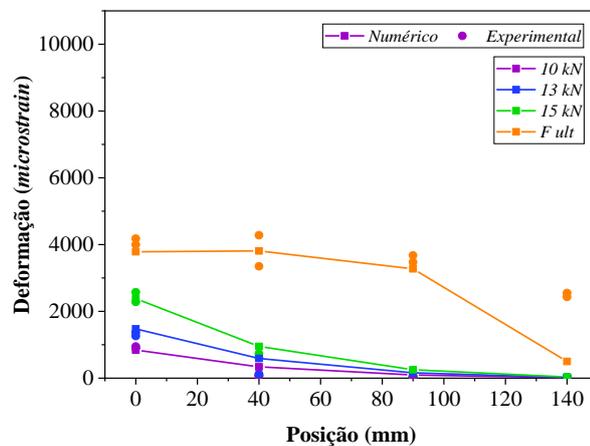
Figura 5.19: Curvas força *versus* deslocamento experimentais e numéricas

(a) Intemperismo – Resina 1

(b) Intemperismo – Resina 2



(c) Intemperismo – Resina 1



(d) Intemperismo – Resina 2

Fonte: A Autora

O modelo numérico para representação do ensaio de flexão reproduziu bem o comportamento força *versus* flecha. Conforme ilustram as Figuras 5.17 a 5.19, a rigidez inicial do modelo numérico foi bastante similar à rigidez experimental, sendo reproduzida de maneira consistente a força última e respectiva flecha do modelo ensaiado. Também foi observado no modelo numérico uma boa representação das deformações experimentais ao longo do FRP.

A Tabela 5.7 apresenta uma comparação entre os resultados experimentais e numéricos do ensaio de flexão.

Tabela 5.7: Comparação dos resultados numéricos e experimentais para o ensaio de flexão a três pontos

Identificação	Força última	Deformação no CFRP
---------------	--------------	--------------------

		Exp. (kN)	Num. (kN)	Exp./Num.	Exp. (%)	Num. (%)	Exp./Num.
B1	REF	19,17	19,36	0,99	0,65	0,45	1,44
	ACP	13,86	16,13	0,86	0,46	0,34	1,35
	WEA	19,76	21,14	0,93	0,8	0,52	1,54
B2	REF	15,87	18,23	0,87	0,65	0,41	1,59
	ACP	11,44	13,86	0,83	0,4	0,26	1,54
	WEA	14,70	17,01	0,86	0,49	0,38	1,29

Fonte: A Autora

Os resultados da Tabela 5.7 evidenciam novamente que a modificação da propriedade coesiva da interface FRP-concreto representou bem os modelos ensaiados, com diferenças entre os resultados experimentais e numéricos em termos de força última não ultrapassando os 17%. Apesar disso, em termos de deformação última no FRP, os resultados do modelo numérico divergiram quando comparados com os resultados experimentais, com diferenças de 59%.

De fato existe uma camada intermediária de resina epóxi entre o compósito de FRP e a superfície de concreto, assim, a simplificação do modelo numérico e o elevado módulo de elasticidade do compósito de FRP acarretam em diferenças relativas entre as deformações numéricas e experimentais (ZHANG; HUANG, 2022).

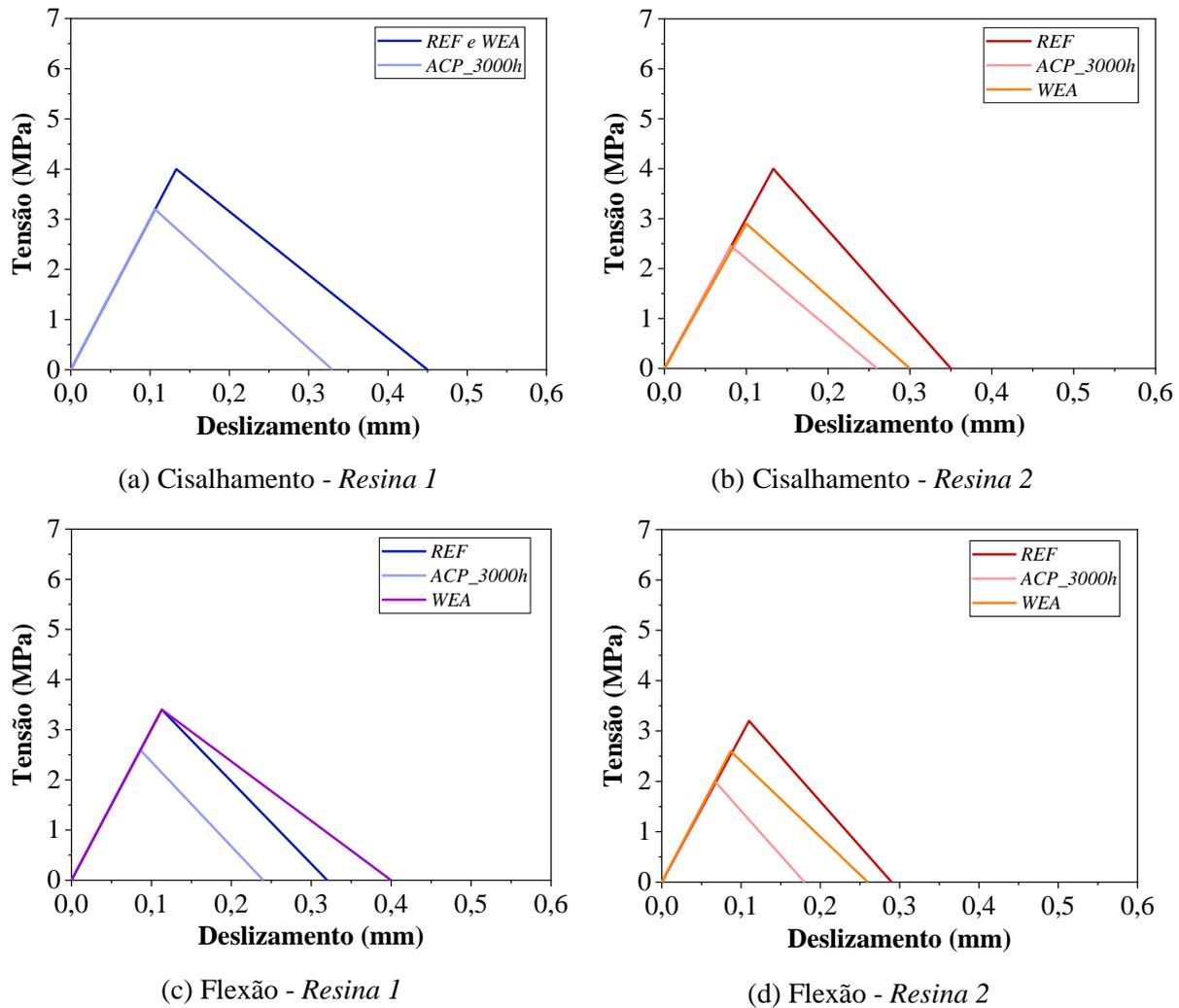
Outra possível explicação para a diferença entre as deformações no CFRP obtidas pelo modelo numérico pode estar associada à distribuição não uniforme das tensões de cisalhamento na interface, função da não homogeneidade do concreto, o que não é considerado no modelo numérico (ARRUDA *et al.*, 2016).

5.5 Conclusão da modelagem numérica

O presente capítulo detalhou as estratégias empregadas para a simulação do descolamento do FRP do substrato de concreto, apresentando e discutindo os resultados obtidos pela modelagem numérica.

Foi possível concluir que a associação de experimentos para avaliação da degradação da aderência FRP-concreto forneceu parâmetros que permitiram a calibração dos modelos numéricos para representação da interface.

A Figura 5.20 apresenta curvas utilizadas na simulação do descolamento FRP-concreto.

Figura 5.20: Curvas adotadas para tensão de cisalhamento *versus* deslizamento

Fonte: A Autora

A alteração do modelo constitutivo para a interface, função do tipo de resina epóxi e condição de exposição, representou de maneira satisfatória o comportamento força *versus* deslocamento ou força *versus* flecha para os modelos reforçados ao cisalhamento e à flexão. Os modelos numéricos também foram capazes de representar bem a distribuição das deformações ao longo do CFRP.

Os modelos numéricos aqui calibrados constituem ferramentas que permitem a simulação do comportamento mecânico de estruturas de concreto reforçadas com FRP levando em consideração a degradação do sistema EBR-FRP. Ghiassi (2013) e D'Altri e Miranda (2020), por exemplo, utilizaram resultados de análises de degradação acelerada para simular o comportamento estrutural de painéis de alvenaria reforçados com GFRP.

6 CONCLUSÕES

A presente pesquisa avaliou a durabilidade frente às ações ambientais do sistema EBR-FRP quando aplicado em elementos de concreto.

Foram realizados ensaios para caracterização dos materiais constituinte do sistema de reforço (resina epóxi e compósitos de CFRP) e para caracterização do sistema (quando aplicado para confinamento de elementos de concreto, reforço ao cisalhamento e à flexão). Dois fabricantes de resina epóxi e duas condições de exposição (acondicionamento acelerado e intemperismo) também foram avaliados.

Além disso, modelos numéricos foram desenvolvidos com o objetivo de refletir o efeito da degradação da interface FRP-concreto no comportamento de estruturas de concreto reforçadas com FRP.

A seguir são detalhadas as principais conclusões obtidas de cada etapa do estudo.

Com relação aos ensaios de tração das amostras de resina epóxi:

- a) Foi possível constatar significativa redução no módulo de elasticidade das resinas mantidas em acondicionamento acelerado enquanto a exposição ao intemperismo reduziu de maneira mais evidente a resistência à tração das resinas;
- b) A partir dos ensaios de tração também ficou evidente que o comportamento mecânico das resinas expostas a cada uma das condições foi distinto, as resinas mantidas em água apresentaram comportamento elasto-plástico enquanto as expostas ao intemperismo tiveram comportamento frágil;
- c) Reações de plastificação e hidrólise explicam as alterações das propriedades mecânicas das resinas mantidas em água, enquanto as resinas expostas ao intemperismo, além de susceptíveis à absorção de água ainda podem ter sofrido processos de fotodegradação.

Com relação aos ensaios de tração dos compósitos de CFRP:

- a) Apesar das modificações observadas nas amostras de resina epóxi, os corpos de prova de CFRP não apresentaram modificação na tensão máxima de tração ou módulo de elasticidade tendo em vista que as propriedades mecânicas da fibra definem o comportamento mecânico dos CFRP's ensaiados à tração paralela às
-

fibras.

Dos ensaios dos corpos de prova de concreto confinados com CFRP:

- a) Não foi constatada nenhuma alteração no comportamento mecânico dos corpos de prova confinados com CFRP, o que já era de se esperar uma vez que o comportamento mecânico dos corpos de prova confinados com CFRP está diretamente associado ao comportamento do compósito.

Dos ensaios de cisalhamento FRP-concreto e flexão a três pontos:

- a) Ao final da exposição ao protocolo de acondicionamento acelerado foi apontada significativa redução na tensão de cisalhamento máxima e na energia de fratura da interface FRP-concreto;
- b) Na presença de água ou umidade as ligações químicas existentes entre os compostos poliméricos e o C-S-H são enfraquecidas, resultando em redução da aderência FRP-concreto;
- c) A exposição ao intemperismo alterou, neste caso, apenas a aderência dos modelos reforçados com a resina do tipo 2. A primeira possível explicação para esse fenômeno é que a resina 1 apresente durabilidade superior à resina 2 quando exposta ao intemperismo ou então que a velocidade de degradação da resina 1 quando exposta ao intemperismo seja inferior à velocidade de degradação da resina 2, fato que só pode ser comprovado por meio de ensaios de degradação envolvendo períodos de exposição ao intemperismo mais longos;
- d) Os resultados evidenciam que a degradação da aderência FRP-concreto está diretamente associada ao tipo de resina epóxi utilizada no reforço.

Dos ensaios de arrancamento:

- a) A exposição ao protocolo de acondicionamento acelerado provocou redução na tensão de aderência entre o FRP e o substrato de concreto, modificando o modo de falha de coesivo para adesivo;
- b) Apesar de indicar qualitativamente com clareza a mudança no modo de falha, destaca-se que quantitativamente a tensão de arrancamento coesiva no concreto está associada à resistência à tração direta do concreto, sendo a tensão de aderência FRP-concreto de fato superior à tensão de arrancamento aferida.

Com relação às recomendações normativas associadas à durabilidade do sistema EBR-FRP:

- a) As recomendações tanto do ACI 440.2R (2017) como da FIB *Bulletin* 90 (2019)
-

referentes à deformação efetiva para elementos confinados com CFRP se mostraram conservadoras, mesmo para os elementos que foram mantidos em diferentes condições ambientais;

- b) No caso de reforço ao cisalhamento, apesar de conservadoras para os modelos de referência, as recomendações do ACI 440.2R (2017) e da FIB *Bulletin* 90 (2019) representaram bem as deformações obtidas nos modelos expostos à degradação ambiental;
- c) As recomendações propostas pelo ACI 440.2R (2017) e pela FIB *Bulletin* 90 (2019) para o cálculo das deformações efetivas no caso de reforço à flexão forneceram resultados superiores aos observados experimentalmente. O emprego de uma deformação limite de 0,005 mm/mm conforme proposto pela AASHTO FRPS-1 (2010) ou a inclusão de um coeficiente associado à degradação da interface - BDF - conforme proposto por Tatar e Hamilton (2016b) nas formulações da FIB *Bulletin* 90 (2019) e de Teng *et al.* (2003) foram capazes de representar melhor o efeito da redução das deformações no CFRP para os modelos expostos ao acondicionamento acelerado e ao intemperismo.

Com relação aos modelos numéricos para a interface FRP-concreto:

- a) Os experimentos para avaliação da degradação da aderência FRP-concreto forneceram parâmetros que permitiram a calibração dos modelos numéricos para representação da interface;
- b) A alteração do modelo constitutivo para a interface (função do tipo de resina e condição de exposição) conseguiu reproduzir de maneira satisfatória o comportamento dos modelos reforçados ao cisalhamento e à flexão;
- c) Os modelos numéricos aqui calibrados podem ser empregados como ferramenta na simulação do comportamento mecânico de estruturas de concreto reforçadas com FRP levando em consideração a degradação da aderência do sistema EBR-FRP.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Em suma os principais objetivos da pesquisa foram alcançados, embora algumas limitações e outros pontos de interesse tenham sido levantados e possam ser objeto de estudos futuros, dentre eles destaca-se:

- a) Ampliação do programa experimental, avaliando a durabilidade de outros
-

fabricantes de resina epóxi, tipos de fibra (vidro, por exemplo) e laminados pré-fabricados. Algumas pesquisas parecem apontar uma maior degradação em sistemas de reforço empregando laminados pré-fabricados e compósitos de fibra de vidro (CHOI *et al.*, 2012; HELBLING; KARBHARI, 2007);

- b) Ampliação do programa experimental, com ensaios que envolvam a exposição ao intemperismo por períodos mais longos (acima de 10 anos). Siavashi *et al.* (2019) apontaram reduções na aderência FRP-concreto em torno de 35 e 44% ao final de 15 anos de exposição ao intemperismo;
 - c) Ampliação do programa experimental, avaliando o comportamento e durabilidade de outros sistemas de reforço com FRP (NSM - *Near Surfaced Mounted* e TRM – *Textile Reinforced Mortar*). Ceroni *et al.* (2018) apontam que a durabilidade frente à combinação de temperatura e umidade elevada dos sistemas TRM tende a ser superior à dos sistemas EBR;
 - d) Avaliar experimentalmente o efeito de outros tipos de preparação superficial (jato de areia, apicoamento, etc) na aderência e durabilidade da interface FRP-concreto. Shrestha, Ueda e Zhang (2015) também recomendam que a durabilidade entre o FRP e a superfície de concreto submetida a outros tipos de preparação superficial seja analisada;
 - e) Desenvolvimento de novas formulações de resinas epóxicas ou tratamentos superficiais que melhorem a resistência do sistema de reforço com FRP frente às ações ambientais. Algumas pesquisas parecem apontar que o tratamento do concreto com silano antes da aplicação do reforço com FRP melhora a sua durabilidade quando exposto à água (AMIDI; WANG, 2016);
 - f) Desenvolvimento de modelos numéricos baseados em dinâmica molecular pra representação do descolamento FRP-concreto. Tendo em vista que o processo de degradação da aderência FRP-concreto ocorre em escala molecular, modelos como os de Büyüköztürk *et al.* (2011) parecem ser ferramentas promissoras na representação mais realista da degradação dos materiais.
-

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO FRPS-1. **Guide specifications for design of bonded FRP systems for repair and strengthening of concrete bridge elements**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, United States, 2010.

ABAQUS 6.14. **Abaqus analysis user's manual**. ProvidenceDassault Systèmes. Version 6.14, 2014.

ABANILLA, M. A.; LI, Y.; KARBHARI, V. M. Durability characterization of wet layup graphite/epoxy composites used in external strengthening. **Composites: Part B**, v.37, p.200-212, 2006.

ABNT NBR 5738. **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2015.

ABNT NBR 5739. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2018.

ABNT NBR 6118. **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**, Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2014.

ABNT NBR 7222. **Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2011.

ABNT NBR NM 67. **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1998.

ACI 440.2R. **Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures**. Reported by ACI Committee 440. American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2017.

ACI 440.9R. **Guide to accelerated conditioning protocols for durability assessment of internal and external fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcement**. American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2015.

AIELLO, M. A.; LEONE, M. Interface analysis between FRP EBR system and concrete. **Composites Part B**, v.39, p.618-626, 2008.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711–728, 2013.

AMIDI, S.; WANG, J. Subcritical debonding of FRP-to-concrete bonded interface under synergistic effect of load, moisture, and temperature. **Mechanics of Materials**, v.92, p.80-93, 2016.

APICELLA, A.; MIGLIARESI, C.; NICODEMO, C.; NICOLAIS, L.; IACCARINO, L.; ROCCOTELLI, S. Water sorption and mechanical properties of a glass-reinforced polyester resin. **Composites**, v.13, n.4, p.406–410, 1982.

ARRUDA, M. R. T.; FIRMO, J. P.; CORREIA, J. R.; TIAGO, C. Numerical modelling of the bond between concrete and CFRP laminates at elevated temperatures. **Engineering Structures**, v.110, p.233-243, 2016.

ASTM C469/C469M. **Standart test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression**. West Conshohocken, Pa, United States, 2014.

ASTM C78/C78M. **Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)**. West Conshohocken, Pa, United States, 2010.

ASTM D7522/D7522M. **Standard test method for pull-off strength for FRP bonded to concrete or masonry substrates**, West Con-shohocken, Pa, United States, 2021.

BARAN, I.; WANET, L. L.; AKKERMAN, R. Assessment of failure and cohesive zone length in co-consolidated hybrid C/PEKK butt joint. **Engineering Structures**, v.168, p.420-430, 2018.

BELARBI, A.; MYERS, J. J.; CHANDRASHEKHARA, K.; WATKINS, S. E.; BAE, S. W. **Structural integrity of RC columns wrapped with FRP sheet subjected to various environmental conditions including corrosion**. Technical Report RDT 04-021, Missouri Department of Transportation, 2004.

BENZARTI, K.; CHATAIGNER, S.; QUIERTANT, M.; MARTY, C.; AUBAGNAC, C. Accelerated ageing behavior of the adhesive bond between concrete specimens and CFRP overlays. **Construction and Building Materials**, v.25, p.523-538, 2011.

BENZEGGAGH, M. L; KENANE, M. Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus. **Composites Science and Technology**, v.56, n.4, p.439-449, 1996.

BÜYÜKÖZTÜRK, O.; BUEHLER, M. J.; LAU, D.; TUAKTA, C. Structural solution using molecular dynamics: Fundamentals and a case study of epoxy-silica interface. **International Journal of Solids and Structures**, v.48, n.14-15, p.2131-2140, 2011.

CARRAZEDO, R. **Mecanismos de confinamento e suas implicações no reforço de pilares de concreto por encamisamento com compósito de fibras de carbono**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.

CABRAL-FONSECA, S.; CORREIA, J. R.; CUSTÓDIO, J.; SILVA, H. M.; MACHADO, A. M.; SOUSA, J. Durability of FRP-concrete bonded joints in structural rehabilitation: A review. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v.83, p.153-167, 2018.

-
- CERONI, F.; BONATI, A.; GALIMBERTI, V.; OCCHIUZZI, A. Effects of environmental conditioning on the bond behavior of FRP and FRCM systems applied to concrete elements, **Journal of Engineering Mechanics**, v.144, n.1, 2018.
- CHEN, C.; LI, X.; ZHAO, D.; HUANG, Z.; SUI, L.; XING, F.; ZHOU, Y. Mechanism of surface preparation on FRP-Concrete bond performance: A quantitative study. **Composites Part B**. v.163, p.193-206, 2019.
- CHEN, D.; ZOU, J.; ZHAO, L.; XU, S.; XIANG, T.; LIU, C. Degradation of Dynamic Elastic Modulus of Concrete under Periodic Temperature-Humidity Action. **Materials**, v.13, n.3, 2020.
- CHOI, S.; GARTNER, A. L.; VAN ETTEN, N.; HAMILTON, H. R.; DOUGLAS, E. P. Durability of concrete beams externally reinforced with CFRP composites exposed to various environments. **Journal of Composites for Construction**, v.16, n.1, 2012.
- CHOTICKAI, P.; SOMANA, S. Performance of CFRP-strengthened concrete beams after exposure to wet/dry cycles. **Journal of Composites for Construction**, v.22, n.6, 2018.
- CHOWDHURRY, E. U.; EEDSON, R.; GREEN, M. F.; BISBY, L. A. Mechanical characterization of fibre reinforced polymers materials at high temperature. **Fire Technology**, v.47, p.1063-1080, 2011.
- D'ALTRI, A. M.; MIRANDA, S. Environmentally-induced loss of performance in FRP strengthening systems bonded to full-scale masonry structures. **Construction and Building Materials**, v.249, 118757, 2020.
- DENG, J.; TANNER, J. E.; MUKAI, D.; HAMILTON, H. R.; DOLAN, C. W. Durability Performance of Carbon Fiber-Reinforced Polymer in Repair/Strengthening of Concrete Beams. **ACI Materials Journal**, v.112, n.2, p.247-257, 2015.
- FERREIRA, D. C. **Avaliação da degradação de vigas reforçadas com FRP quando expostas ao intemperismo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, 2019.
- FIB *Bulletin* 90. **Externally applied FRP reinforcement for concrete structures**. Technical Report by the Fédération Internationale du Béton, Switzerland, 2019.
- FIB MODEL CODE. **FIB model code for concrete structures**. Fédération Internationale du Béton, Lausanne, Switzerland, 2010.
- FRIGIONE, M. Durability problems of concrete structures rehabilitated with FRP. In: PACHECO-TORGAL, F.; MELCHERS, R.E.; SHI, X.; DE BELIE, N.D.; TITTELBOON, K.V.; SAÉZ, A. **Eco-efficient repair and rehabilitation of concrete infrastructure**, USA: Woodhead Publishing, 2018. Cap.7, p.147-170.
- FRIGIONE, M.; LETTIERI, M. Procedures Conditioning the Absorption/Desorption Behavior of Cold-Cured Epoxy Resins. **Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics**, v.46, p. 1320–1336, 2008.
-

GANGARAO, H. V. S.; VIJAY, P. V. Bending behavior of concrete beams wrapped with carbon fabric. **Journal of Structural Engineering**, v.124, n.1, p.3-10, 1998.

GARTNER, A.; DOUGLAS, E. P.; DOLAN, C. W.; HAMILTON, H. R. Small beam bond test method for CFRP composites applied to concrete. **Journal of Composites for Construction**, v.15, n.1, p.52-61, 2011.

GENIKOMSOU, A. S.; POLAK, M. A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS. **Engineering Structures**, v.98, p.38-48, 2015.

GHIASSI, B. **Durability analysis of bond between composite materials and masonry substrates**. Tese, Universidade do Minho, Portugal, 2013.

GHORBEL, I.; VALENTIN, D. Hydrothermal effects on the physico-chemical properties of pure and glass fiber reinforced polyester and vinylester resins. **Polymer Composites**, v.14, n.4, p.324-334, 1994.

GRACE, N. F.; SINGH, S. B. Durability evaluation of carbon fiber-reinforced polymer strengthened concrete beams: experimental study and design. **ACI Structural Journal**, v.102, n.1, p.40-53, 2005.

GRAMMATIKOS, S. A.; ZAFARI, B.; EVERNDEN, M. C.; MOTTRAM, J. T.; MITCHELS, J. M. Moisture uptake characteristics of a pultruded fibre reinforced polymer flat sheet subjected to hot/wet aging. **Polymer Degradation and Stability**, v.121, p.405-419, 2015.

GUO, X.; SHU, S.; WANG, Y.; HUANG, P.; LIN, J.; GUO, Y. Effect of Subtropical Natural Exposure on the Bond Behavior of FRP-Concrete Interface. **Polymers**, v. 12, n.967, p.1-21, 2020.

HELBLING, C.; KARBHARI, V. M. Durability of composites in aqueous environments. In: KARBHARI, V.M. **Durability of Composites for Civil Structural Applications**, USA: CRC Press, 2007. Cap.3, p.31-71.

ISIS. **Durability of FRP Composites for Construction**: Educational Module no.8:, The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, ISIS Canada Corporation, Manitoba, Canada, 2006.

ISO 527-1. **Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles**. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland, 1996.

ISO 527-2. **Plastics - Determination of Tensile Properties - Part 2: Test Conditions for Moulding and Extrusion Plastics**. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland, 2012.

ISO 527-5. **Plastics - Determination of Tensile Properties - Part 5: Test Conditions for Unidirectional Fibre-reinforced plastic composites**. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland, 2009.

JIN, F.; LI, X.; PARK, S. Synthesis and application of epoxy resins: A review. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v.29, p.1-11, 2015

KABIR, M. I.; SHRESTHA, R.; SAMALI, B. Effects of applied environmental conditions on the pull-out strengths of CFRP-concrete bond. **Construction and Building Materials**, v.114, p.817-830, 2016

KAI, M.; JI, W.; DAI, J. Atomistic insights into the debonding of Epoxy–Concrete interface with water presence. **Engineering Fracture Mechanics**, v.271, p.1-16, 2022

KARBHARI, V. M. Introduction: the use of composites in civil structural applications. In: KARBHARI, V.M. **Durability of Composites for Civil Structural Applications**, USA: CRC Press, 2007. Cap.1, p.1-10.

KARBHARI, V. M.; ABANILLA, M. A. Design factors, reliability, and durability prediction of wet layup carbon/epoxy used in external strengthening. **Composites: Part B**, v.38, p.10-23, 2007.

KARBHARI, V. M.; GHOSH, K. Comparative durability evaluation of ambient temperature cured externally bonded CFRP and GFRP composite systems for repair of bridges. **Composites: Part A**, v.40, p.1353-1363, 2009.

KARBHARI, V. M.; CHIN, J. W.; HUNSTON, D.; BENMOKRANE, B.; JUSKA, T.; MORGAN, R.; LESKO, J. J.; SORATHIA, U.; REYNAUD, D. Durability Gap Analysis for Fiber-Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure. **Journal of Composites for Construction**, v.7, n.3, p.238-247, 2003.

KHALIFA, A.; GOLD, W.; NANNI, A.; ABEL-AZIZ, M. Contribution of externally bonded FRP to the shear capacity of RC flexural members. **Journal of Composites for Construction**, v.2, n.4, p.195-203, 1998.

KUMAR, B. G.; SINGH, R. P.; NAKAMURA, T. Degradation of carbon fiber-reinforced epoxy composites by ultraviolet radiation and condensation. **Journal of Composite Materials**, v.36, n.24, p.2713-2733, 2002.

LAM, L.; TENG, J. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete. **Construction and Building Materials**, v.17, n.6-7, p.471-489, 2003.

LARSSON, F. The effect of ultraviolet light on mechanical properties of Kevlar 49 composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v.5, n.1, p.19-22, 1986.

LEITE, A. M. **Avaliação do uso da macrofibra polimérica na composição de concreto para fins estruturais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2018.

LEE, J.; FENVES, G. L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. **Journal of Engineering Mechanics**, v.124, n.8, p.892-900, 1998.

LENZI, F. **Avaliação da degradação de sistemas de reforço de pilares com CFRP sob ação da umidade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Integração Latino-americana, 2020.

LEONE, M.; MATTHYS, S.; AIELLO, M. A. Effect of elevated service temperature on bond between FRP EBR systems and concrete. **Composites: Part B**, v.40, p.85-93, 2009.

LI, G.; PANG, S.; HELMS, J. E.; MUKAI, D.; IBEKWE, S. I.; ALAYWAN, W. Stiffness degradation of FRP strengthened RC beams subjected to hygrothermal and aging attacks. **Journal of Composite Materials**, v.36, n.7, p.795-812, 2002.

LIN, Y.; CHEN, X. Moisture sorption—desorption—resorption characteristics and its effect on the mechanical behavior of the epoxy system. **Polymer**, v.46, n.25, p.11994-12003, 2005.

LUBLINER, J.; OLIVER, J.; OLLER, S.; ONATE, E. A plastic-damage model for concrete. **International Journal of Solids and Structures**, v.25, n.3, p.299-326, 1988.

MANSUR, M. A.; WEE, T. H.; CHIN, M. S. Derivation of the complete stress-strain curves for concrete in compression. **Magazine of Concrete Research**, v.47, n.137, p.285-290, 1995.

MICELLI, F.; MYERS, J. J. Durability of FRP-confined concrete. **Construction Materials**, v.161, p.173-185, 2008.

MOURITZ, A. P. Durability of Composites exposed to elevated temperature and fire. In: KARBHARI, V. M. **Durability of Composites for Civil Structural Applications**, USA: CRC Press, 2007. Cap.6, p.98-125.

MUKHTAR, F. M. Customized shear test for bond-slip characterization of EBR FRP-concrete system: Influence of substrate aggregate type. **Composites Part B**, v.163, p.606-621, 2019.

MUKHTAR, F. M.; FAYSAL, R. M. A review of test methods for studying the FRP-concrete interfacial bond behavior. **Construction and Building Materials**, v.169, p.877-887, 2018.

MUKHTAR, F. M.; PEIRIS, A. FRP-concrete bond performance under accelerated hygrothermal conditions. **Construction and Building Materials**, v.270 p.1-20, 2021.

OBAIDAT, Y.T.; HEYDEN, S.; DAHLBLOM, O. The effect of CFRP and CFRP/concrete interface models when modelling retrofitted RC beams with FEM. **Composite Structures**, v.92, n.6, p. 1391-1398, 2010.

OKBA, S. H.; NASR, E. A.; HELMY, A. I. I.; YOUSEF, I. A. Effect of thermal exposure on the mechanical properties of polymer adhesives. **Construction and Building Materials**, v.135, p.490-504, 2017.

OLIVEIRA, M. C. **Análise do comportamento estrutural e durabilidade de pilares de concreto armado reforçados com manta de GFRP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, 2019.

PAN, Y.; XIAN, G.; SILVA, M. A. G. Effects of water immersion on the bond behavior between CFRP plates and concrete substrate. **Construction of Building Materials**, v.101, p.326-337, 2015.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; McMAHON, T. A. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.11, p.1633-1644, 2007.

PRADO, L. P. **Estudo da interface do concreto pré-moldado e concreto de altíssimo desempenho reforçado com fibras**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil (Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2020.

REGE, S. K.; LAKKAD, S. C. Effect of salt water on fibre reinforced plastics. **Fibre Science Technology**, v.19, p.317-324, 1983.

SARTI JÚNIOR, L. A. **Durabilidade de vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP submetidas a degradação acelerada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

SCIOLTI, M. S.; FRIGIONE, M.; AIELLO, M. A. Wet lay-up manufactured FRPs for concrete and masonry repair: influence of water on the properties of composites and on their epoxy components. **Journal of Composites for Construction**, v.14, n.6, p.823-833, 2010.

SEONG, L. Y. **Durability of fiber reinforced polymer composites under tropical climate**. Thesis, National University of Singapore, Singapore, 2003.

SHRESTHA, J.; UEDA, T., ZHANG, D. Durability of FRP Concrete Bonds and Its Constituent Properties under the Influence of Moisture Conditions. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.27, n.2, 2015

SIAVASHI, S.; EAMON, C. D.; MAKKAWY, A. A.; WU, H. Long-Term Durability of FRP Bond in the Midwest United States for Externally Strengthened Bridge Components. **Journal of Composites for Construction**, v.13, n.2, p.1-7, 2019.

SILVA, P. M. **Time-dependent behavior and durability of RC slabs strengthened with NSM CFRP strips**. Thesis, Universidade do Minho, Portugal, 2017.

SILVA, P.; FERNANDES, P.; SENA-CRUZ, J.; XAVIER, J.; CASTRO, F.; SOARES, D.; CARNEIRO, V. Effects of different environmental conditions on the mechanical characteristics of a structural epoxy. **Composites: Part B**, v.88, p.55-63, 2016.

TATAR, J.; HAMILTON, H. R. Comparison of laboratory and field environmental conditioning on FRP-concrete bond durability. **Construction and Building Materials**, v.122, p.525-536, 2016 a.

TATAR, J.; HAMILTON, H. R. Implementation of Bond Durability in the Design of Flexural Members with Externally Bonded FRP. **Journal of Composites for Construction**, v.20, n.3, p.1-10, 2016 b.

TATAR, J.; MILEV, S. Durability of externally bonded fiber-reinforced polymer composites in concrete structures: a critical review. **Polymers**, v.13, n.765, p.1-24, 2021.

TENG, J. G.; SMITH, S. T.; YAO, J.; CHEN, J. F. Intermediate crack induced debonding in RC beams and slabs. **Construction and Building Materials**, v.17, n.6-7, p.447-462, 2003.

- TONG, L.; WHITE, J. R. Photo-oxidation of thermoplastics in bending and in uniaxial compression. **Polymer Degradation and Stability**, v.53, p.381-396, 1996.
- WANG, Y.; ZHU, W.; ZHANG, X.; CAI, G.; WAN, B. Influence of Thickness on Water Absorption and Tensile Strength of BFRP Laminates in Water or Alkaline Solution and a Thickness-Dependent Accelerated Ageing Method for BFRP Laminates. *Applied Science*, v.10, n.10, p.1-21, 2020.
- WEI, B.; CAO, H.; SHENHUA, S. Tensile behaviour contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment. **Materials and Design**, v.31, p. 4244-4250, 2010.
- WEITSMAN, Y. J.; ELAHI, M. Effects of fluids on deformation, strength and durability of polymeric composites – an overview. **Mechanics of time-dependent materials**, v.4, p.107-126, 2000.
- XIE, Z.; XIE, J.; GUO, Y.; HUANG, Y. Durability of CFRP-wrapped concrete exposed to hydrothermal environment. **International Journal of Civil Engineering**, v.16, n.5, p.527-541, 2017.
- YANG, Q.; XIAN, Q.; KARBHARI, V. Hygrothermal ageing of an epoxy adhesive used in FRP strengthening of concrete. **Journal of Applied Polymer Science**, v.107, n.4, p. 2607-2617, 2008.
- YUAN, C.; CHEN, W.; PHAM, T.M.; HAO, H. Effect of aggregate size on bond behaviour between basalt fibre reinforced polymer sheets and concrete. **Composites Part B**, v. 158, p.459-474, 2019.
- ZHANG, W.; HUANG, Y. Three-dimensional numerical investigation of mixed-mode debonding of FRP-concrete interface using a cohesive zone model. **Construction and Building Materials**, v.350, 128818, 2022.
- ZHANG, P.; ZHU, H.; WU, G.; MENG, S, WU; Z. Shear capacity comparison of four different composite interfaces between FRP plates and concrete substrate. **Journal of Composites for Construction**, v.20, n.4, p.1-12, 2016.
- ZHAO, J.; CAI, G.; CUI, L.; LARBI, A. S.; TSAVDARIDIS, K. D. Deterioration of basic properties of the materials in FRP-strengthening RC structures under ultraviolet exposure. **Polymers**, v.9, n.402, p.1-18, 2017.
- ZHOU, J.; LUCAS, J. P. Hygrothermal effects of epoxy resin. Part I: the nature of water in epoxy. **Polymer**, v.40, n.20, p.5505–5512, 1999.
-

APÊNDICES

APÊNDICE A – RESULTADOS EXPERIMENTAIS ENSAIO DE TRAÇÃO DAS RESINAS EPÓXI

A presente seção apresenta em tabelas e figuras os resultados dos ensaios de tração individualmente, indicando a média, desvio padrão e os resultados do critério de *Chauvenet* para identificação de *outliers*. Para cada tipo de resina epóxi e idade foram ensaiados seis corpos de prova, dessa forma, quando a variação dos dados em relação ao desvio padrão supera o valor de 1,73 o resultado é considerado duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet* e descartado do conjunto de dados.

As Tabelas A.1 e A.2 apresentam os resultados para tensão máxima de tração e módulo de elasticidade, respectivamente, para a Resina 1. É possível notar que alguns dados experimentais foram desprezados por estarem fora do intervalo de confiança do critério de *Chauvenet*.

Tabela A.1: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a tensão de tração da Resina 1

Tipo de Resina	Ambiente de exposição	Valor (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	Critério de Chauvenet
Resina 1 - primer	Referência	48,12	39,53	9,16	0,94
		34,12			0,59
		36,19			0,36
		27,48			1,31
		52,18			1,38
		39,08			0,05
	ACP – 1000 horas	30,94	30,86	7,99	0,01
		38,08			0,9
		39,58			1,09
		21,01			1,23
		21,67			1,15
		33,90			0,38
	ACP – 3000 horas	41,46	29,8	10,6	1,1
		23,9			0,56
		17,82			1,13
		32,47			0,25
		42,38			1,19
		20,75			0,85

(continua)

Tabela A.1: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a tensão de tração da Resina 1
(conclusão)

Tipo de Resina	Ambiente de exposição	Valor (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	Critério de Chauvenet		
Resina 1 - <i>primer</i>	Intemperismo	11,79	13,44	4,78	0,35		
		9,11			0,90		
		16,11			0,56		
		15,06			0,34		
		20,68			1,51		
		7,90			1,16		
Resina 1 - <i>laminação</i>	Referência	28,94	35,04	12,17	0,5		
		42,53			0,62		
		44,09			0,74		
		13,47*			39,35**	6,77**	1,77
		45,01			0,82		
		36,16			0,09		
	ACP – 1000 horas	31,79	32,82	1,88	0,55		
		34,71			1,01		
		34,05			0,65		
		31,31			0,8		
		30,41			1,29		
		34,67			0,98		
	ACP – 3000 horas	37,01	34,6	3,81	0,63		
		35,35			0,2		
		29,86			1,24		
34,17		0,11					
40,15		1,46					
31,04		0,93					
Intemperismo	27,91*	17,71	5,62	1,82			
	16,12			0,28			
	16,25			0,26			
	19,94			15,66**	2,88**	0,40	
	13,23			0,80			
	12,78			0,88			

Nota: D.P. = Desvio Padrão; * Valor amostral excluído pelo critério de *Chauvenet*; ** Valores recalculados excluindo o valor amostral descartado

Fonte: A Autora

Tabela A.2: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para o módulo de elasticidade da Resina 1

Tipo de Resina	Ambiente de exposição	Valor (GPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	Critério de Chauvenet
Resina 1 - <i>primer</i>	Referência	5,06	5,55	0,75	0,65
		5,56			0,02
		4,9			0,86
		6,56			1,35
		6,35			1,08
		4,84			0,94

(continua)

Tabela A.2: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para o módulo de elasticidade da Resina 1
(conclusão)

Tipo de Resina	Ambiente de exposição	Valor (GPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	Critério de Chauvenet
Resina 1 - <i>primer</i>	ACP – 1000 horas	1,97			0,77
		2,29*			1,89
		2,02	2,06	0,12	0,33
		1,98	2,02**	0,05**	0,72
		2,02			0,37
		2,1			0,3
	ACP – 3000 horas	1,9			1,1
		2,19			0,93
		2,24	2,06	0,14	1,26
		2,06			0,02
		2,07			0,09
		1,89			1,16
	Intemperismo	2,75			0,49
		3,27			1,25
		2,68	2,9	0,3	0,75
3,23				1,11	
2,55				1,19	
2,92				0,06	
Resina 1 - <i>laminação</i>	Referência	4,28			0,04
		4,58			0,33
		3,03	4,32	0,82	1,58
		4,02			0,37
		5,53			1,49
		4,46			0,17
	ACP – 1000 horas	1,85			0,64
		1,94			0,09
		2,11	1,93	0,12	1,46
		1,85			0,65
		1,79			1,13
		2,04			0,87
	ACP – 3000 horas	2,04			0,61
		1,99			0,01
		1,91	1,99	0,08	1,05
1,88				1,31	
2,1				1,27	
2,03				0,47	
Intemperismo	2,41			0,03	
	2,64			1,26	
	2,40	2,41	0,18	0,04	
	2,21			1,08	
	2,20			1,14	
	2,59			0,98	

Nota: D.P. = Desvio Padrão; * Valor amostral excluído pelo critério de *Chauvenet*; ** Valores recalculados excluindo o valor amostral descartado

Fonte: A Autora

As Tabelas A.3 e A.4 apresentam os resultados para tensão máxima de tração e módulo de elasticidade, respectivamente, para a Resina 2. Também é possível constatar que alguns dados experimentais foram desprezados por estarem fora do intervalo de confiança do critério de *Chauvenet*.

Tabela A.3: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a tensão de tração da Resina 2

Tipo de Resina	Ambiente de exposição	Valor (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	Critério de Chauvenet		
Resina 2 - <i>primer</i>	Referência	23,44	21,91	2,02	0,75		
		20,26			0,82		
		19,92			0,98		
		24,38			1,22		
		20,11			0,89		
		23,36			0,72		
	ACP – 1000 horas	12,23*	16,15	2,00	1,96		
		16,48			0,17		
		16,37			0,11		
		16,73			16,93**	0,62**	0,29
		17,87			0,86		
		17,22			0,54		
	ACP – 3000 horas	6,06*	20,55	7,5	1,93		
		24,53			0,53		
		24,96			23,45**	2,69**	0,59
		18,45			0,25		
		24,66			0,55		
		24,44			0,52		
	Intemperismo	11,63	13,74	1,92	1,10		
		11,95			0,94		
		12,52			0,64		
		15,97			1,16		
		15,10			0,71		
		15,29			0,81		
Resina 2 - <i>laminação</i>	Referência	28,47	28,21	2,18	0,12		
		28,62			0,19		
		32*			1,74		
		27,84			27,45**	1,27**	0,17
		25,62			1,19		
		26,72			0,68		
	ACP – 1000 horas	17,35	15,98	2,4	0,57		
		18,64			1,11		
		14,41			0,65		
		17,45			0,61		
		12,09			1,62		
		15,92			0,02		

(continua)

Tabela A.3: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a tensão de tração da Resina 2
(conclusão)

Tipo de Resina	Ambiente de exposição	Valor (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	Critério de Chauvenet
Resina 2 - <i>laminação</i>	ACP – 3000 horas	17,98*			1,9
		24,41			0,23
		27,99	25,29	3,86	0,7
		28,39	26,76**	1,59**	0,8
		26,11			0,22
		26,88			0,41
	Intemperismo	12,46			1,66
		16,83			1,48
		14,57	14,77	1,4	0,14
		14,77			0,00
		15,08			0,22
		14,90			0,10

Nota: D.P. = Desvio Padrão; * Valor amostral excluído pelo critério de *Chauvenet*; ** Valores recalculados excluindo o valor amostral descartado

Fonte: A Autora

Tabela A.4: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para o módulo de elasticidade da Resina 2

Tipo de Resina	Ambiente de exposição	Valor (GPa)	Média (GPa)	D.P. (MPa)	Critério de Chauvenet
Resina 2 - <i>primer</i>	Referência	2,31			1
		2,1			0,28
		2,21	2,15	0,17	0,41
		2,24	2,21**	0,08**	0,55
		1,84*			1,85
		2,17			0,17
	ACP – 1000 horas	0,72			1,67
		0,9			0,52
		1,17	0,98	0,15	1,29
		1,04			0,43
		1,02			0,3
		1			0,16
	ACP – 3000 horas	0,41*			2,03
		1,4			0,5
		1,36	1,21	0,39	0,39
		1,3	1,36**	0,04**	0,25
		1,36			0,4
		1,4			0,49
	Intemperismo	1,72			0,48
		1,82			0,04
		1,66	1,82	0,23	0,73
1,56				1,16	
2,10				1,20	
2,10				1,21	

(continua)

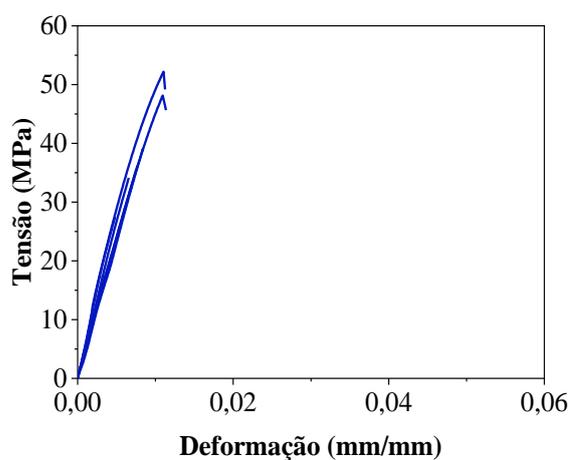
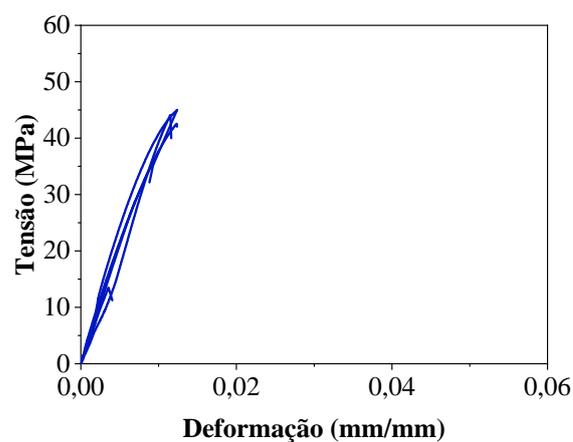
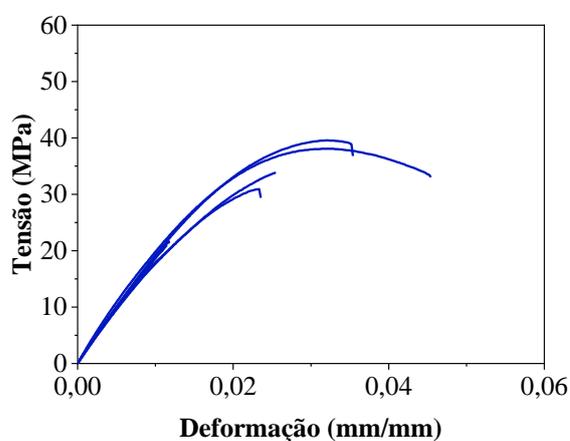
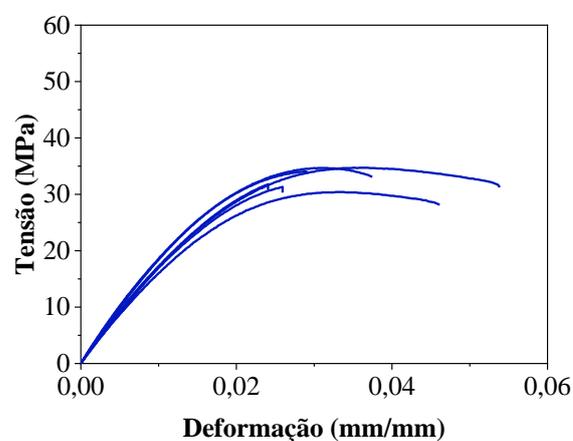
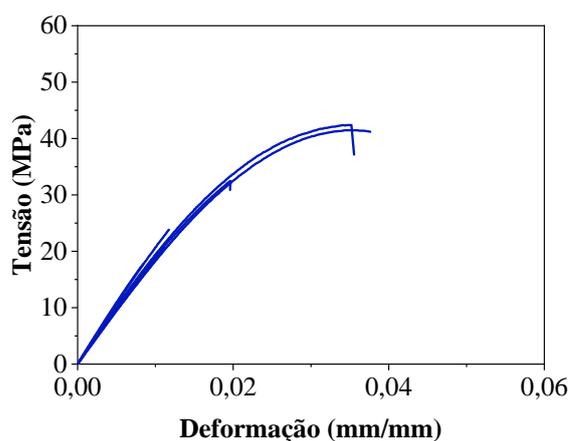
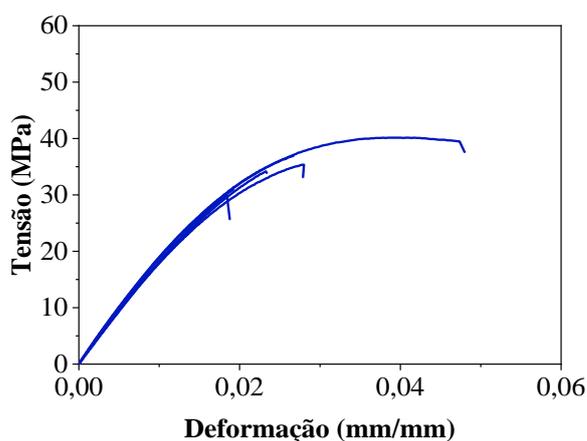
Tabela A.4: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para o módulo de elasticidade da Resina 2
(conclusão)

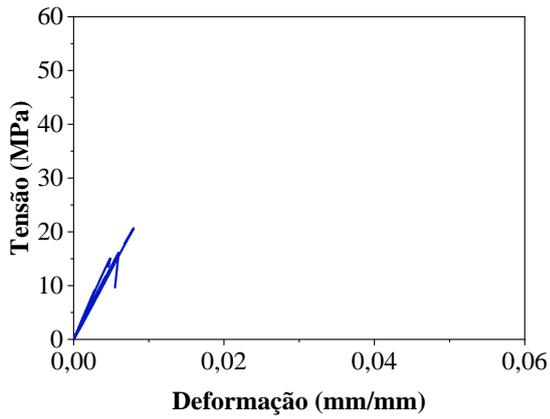
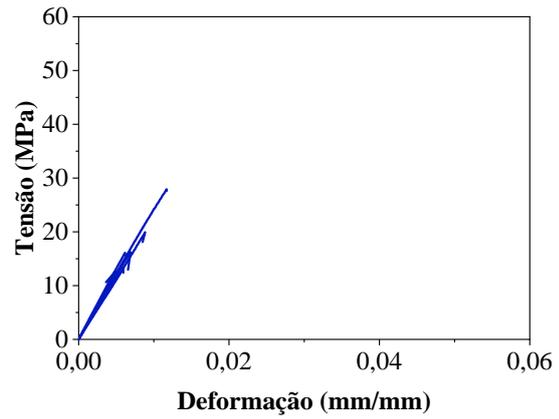
Tipo de Resina	Ambiente de exposição	Valor (GPa)	Média (GPa)	D.P. (MPa)	Critério de Chauvenet		
Resina 2 - laminação	Referência	3,04	3,16	0,33	0,39		
		2,8			1,13		
		3,39			0,69		
		3,56			1,23		
		3,38			0,67		
		2,82			1,07		
	ACP – 1000 horas	1,13	1,1	0,05	0,5		
		1,12			0,23		
		1,17			1,17		
		1,13			0,43		
		1,02			1,63		
		1,07			0,7		
	ACP – 3000 horas	1,53	1,49	0,12	0,31		
		1,39			0,78		
		1,63			1,16		
		1,46			0,27		
		1,61			0,98		
		1,32			1,39		
	Intemperismo	1,91	2,02	0,12	0,85		
		1,93			0,68		
		2,24*			1,90		
		2,03			1,97**	0,05**	0,13
		1,96			0,43		
		2,01			0,07		

Nota: D.P. = Desvio Padrão; * Valor amostral excluído pelo critério de *Chauvenet*; ** Valores recalculados excluindo o valor amostral descartado

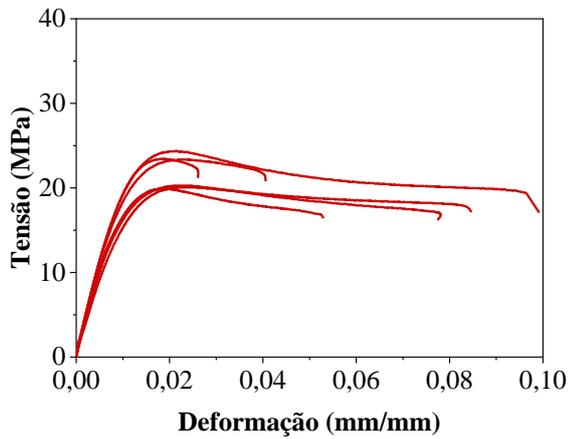
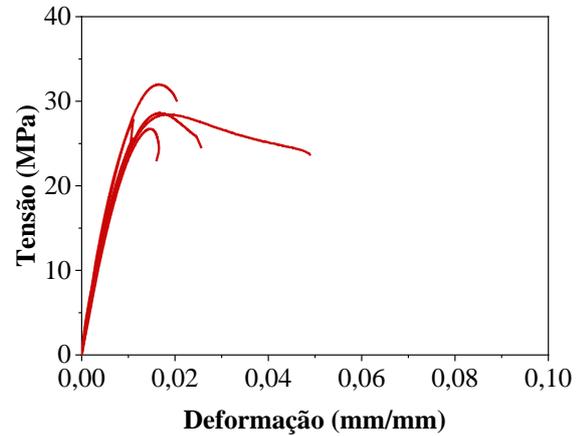
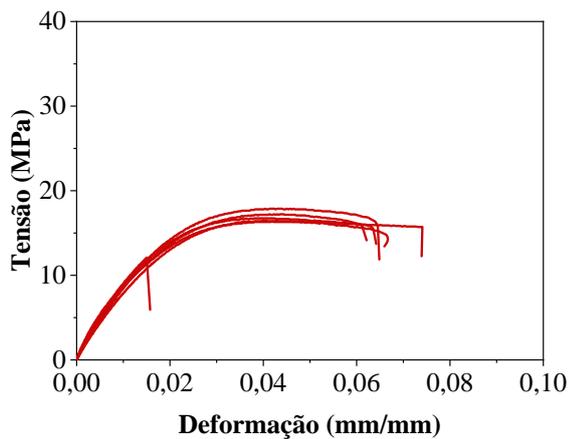
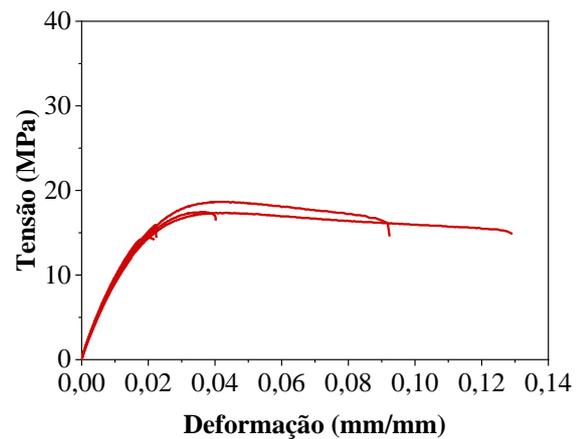
Fonte: A Autora

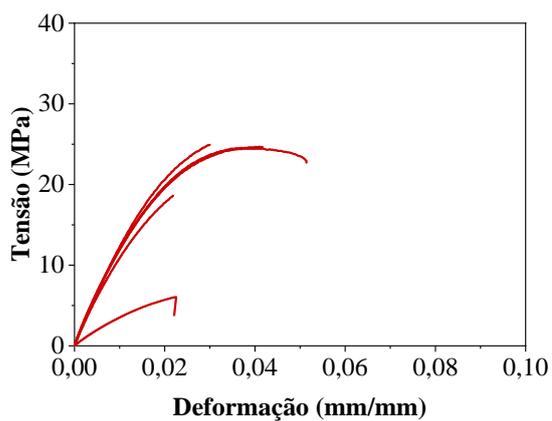
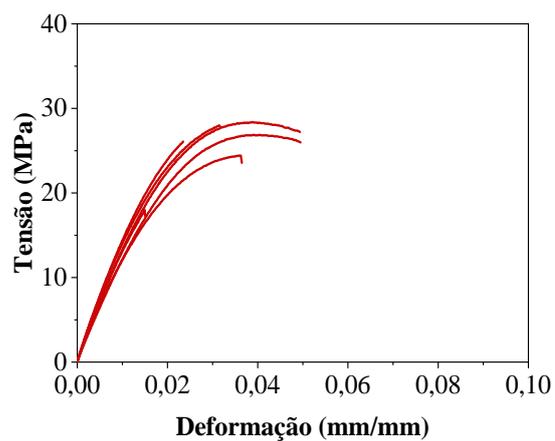
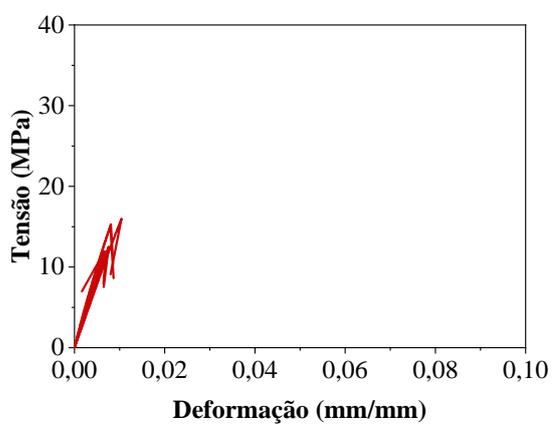
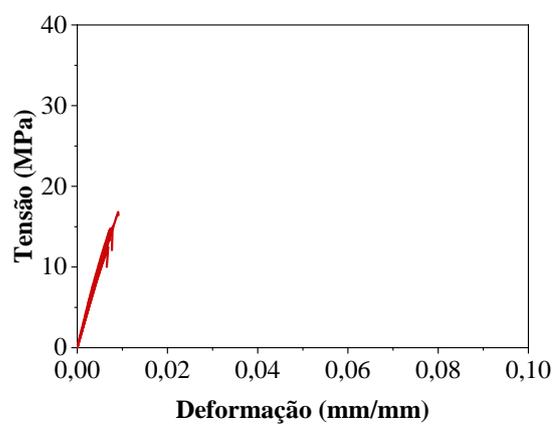
As Figuras A.1 e A.2 ilustram os gráficos de tensão de tração *versus* deformação para as resinas do tipo 1 e 2, respectivamente, para cada condição de exposição analisada.

Figura A.1: Curvas tensão de tração *versus* deformação para a Resina 1(a) Referência - *primer*(b) Referência - *laminação*(c) ACP - 1000 horas - *primer*(d) ACP - 1000 horas - *laminação*(e) ACP - 3000 horas - *primer*(f) ACP - 3000 horas - *laminação*

(g) Intemperismo - *primer*(h) Intemperismo - *laminação*

Fonte: A Autora

Figura A.2: Curvas tensão de tração *versus* deformação para a Resina 2(a) Referência - *primer*(b) Referência - *laminação*(c) ACP – 1000 horas - *primer*(d) ACP – 1000 horas - *laminação*

(e) ACP – 3000 horas - *primer*(f) ACP – 3000 horas - *laminação*(g) Intemperismo - *primer*(h) Intemperismo - *laminação*

Fonte: A Autora

APÊNDICE B – RESULTADOS EXPERIMENTAIS ENSAIO DE ABSORÇÃO DE UMIDADE DAS RESINAS EPÓXI

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios de absorção de umidade para as resina epoxídicas expostas ao protocolo de acondicionamento acelerado. Os resultados são apresentados em tabelas indicando os valores de absorção individual, os valores médios, desvio padrão e os resultados do critério de *Chauvenet* para identificação de *outliers*. Para cada tipo de resina epóxi e idade foram ensaiados seis corpos de prova, dessa forma, quando a variação dos dados em relação ao desvio padrão supera o valor de 1,73 o resultado é considerado duvidoso de acordo com o critério de *Chauvenet* e descartado do conjunto de dados.

A Tabela B.1 apresenta os resultados de absorção de umidade para a Resina 1. É possível notar que alguns dados experimentais foram desprezados por superarem o valor limite do critério de *Chauvenet*.

Tabela B.1: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a absorção de umidade da Resina 1

Tipo de Resina	Tempo (horas)	Valor (g)	Ganho de massa (%)	Média (%)	D.P. (%)	Critério de Chauvenet
Resina 1 - primer	0	12,66				
		12,65				
		13,33	-	-	-	-
		14,22				
		12,44				
		13,25				
	168	12,76	0,79			0,14
		12,72	0,55			1,71
		13,45	0,90	0,81	0,15	0,59
		14,36	0,98			1,15
		12,55	0,88			0,49
		13,35	0,75			0,37
	336	12,84	1,42			0,82
		12,74	0,71*			1,89
		13,5	1,28	1,21	0,26	0,26
		14,41	1,34	1,31**	0,11**	0,49
		12,61	1,37			0,61
		13,4	1,13			0,29

(continua)

Tabela B.1: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a absorção de umidade da Resina 1

Tipo de Resina	Tempo (horas)	Valor (g)	Ganho de massa (%)	Média (%)	D.P. (%)	Critério de Chauvenet
Resina 1 - <i>primer</i>	504	12,86	1,58	1,59 1,54**	0,13 0,05**	0,10
		12,84	1,50			0,68
		13,53	1,50			0,69
		14,45	1,62			0,18
		12,67	1,85*			1,91
		13,45	1,51			0,62
	840	12,89	1,82	1,82	0,1	0,02
		12,88	1,82			0,01
		13,59	1,95			1,30
		14,49	1,90			0,79
		12,66	1,77			0,50
		13,47	1,66			1,56
	1224	12,94	2,21	2,21	0,07	0,04
		12,93	2,21			0,01
		13,62	2,18			0,55
		14,55	2,32			1,52
		12,72	2,25			0,52
		13,53	2,11			1,45
	1536	12,93	2,13	2,23	0,14	0,70
		12,92	2,13			0,68
		13,65	2,40			1,23
		14,52	2,11			0,86
		12,74	2,41			1,31
		13,54	2,19			0,29
	1848	12,92	2,05	2,25	0,12	1,59
		12,92	2,13			0,94
		13,64	2,33			0,60
		14,55	2,32			0,56
12,73		2,33	0,65			
13,56		2,34	0,71			
2184	12,95	2,29	2,20	0,11	0,80	
	12,92	2,13			0,56	
	13,63	2,25			0,45	
	14,55	2,32			1,06	
	12,69	2,01			1,65	
	13,54	2,19			0,09	
2520	12,89	1,82	2,21	0,24	1,66	
	12,92	2,13			0,31	
	13,63	2,25			0,18	
	14,58	2,53			1,36	
	12,73	2,33			0,52	
	13,54	2,19			0,09	
2980	12,91	1,97	2,19	0,15	1,45	
	12,92	2,13			0,36	
	13,65	2,40			1,46	
	14,54	2,25			0,43	
	12,72	2,25			0,43	
	13,53	2,11			0,51	

(continua)

Tabela B.1: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a absorção de umidade da Resina 1

Tipo de Resina	Tempo (horas)	Valor (g)	Ganho de massa (%)	Média (%)	D.P. (%)	Critério de Chauvenet	
Resina 1 - laminação	0	12,05					
		12,87					
		12,23					
		12,93	-	-	-	-	
		14,1					
		12,46					
	168	12,14	0,75				0,67
		12,97	0,78				0,25
		12,33	0,82	0,8	0,07		0,31
		13,05	0,93*	0,77**	0,04**		1,83
		14,21	0,78				0,21
		12,55	0,72				1,01
	336	12,24	1,58				1,72
		13,02	1,17				0,50
		12,39	1,31	1,26	0,19		0,27
		13,1	1,31				0,30
		14,25	1,06				1,05
		12,6	1,12				0,73
	504	12,24	1,58				0,62
		13,06	1,48				0,21
		12,41	1,47	1,5	0,12		0,25
		13,15	1,70				1,66
		14,3	1,42				0,69
		12,63	1,36				1,14
	840	12,27	1,83				0,53
		13,09	1,71				0,13
		12,43	1,64	1,73	0,18		0,55
		13,18	1,93				1,15
14,36		1,84				0,64	
12,64		1,44				1,64	
1224	12,3	2,07				0,80	
	13,13	2,02				0,60	
	12,47	1,96	1,86	0,27		0,39	
	13,19	2,01	1,95**	0,15**		0,57	
	14,34	1,70				0,56	
	12,63	1,36*				1,79	
1536	12,3	2,07				0,55	
	13,12	1,94				0,28	
	12,47	1,96	1,99	0,16		0,16	
	13,22	2,24				1,62	
	14,35	1,77				1,35	
	12,7	1,93				0,38	
1848	12,3	2,07				0,21	
	13,12	1,94				0,48	
	12,47	1,96	2,03	0,19		0,38	
	13,24	2,40*	1,96**	0,08**		1,89	
	14,38	1,99				0,25	
	12,69	1,85				0,98	

(continua)

Tabela B.1: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a absorção de umidade da Resina 1 (conclusão)

Tipo de Resina	Tempo (horas)	Valor (g)	Ganho de massa (%)	Média (%)	D.P. (%)	Critério de Chauvenet
Resina 1-laminação	2184	12,3	2,07	2,01	0,18	0,38
		13,09	1,71			1,71
		12,47	1,96			0,26
		13,22	2,24			1,34
		14,39	2,06			0,27
		12,71	2,01			0,01
	2520	12,3	2,07	2,08	0,21	0,01
		13,16	2,25			0,84
		12,47	1,96			0,54
		13,24	2,40			1,52
		14,36	1,84			1,10
		12,7	1,93			0,71
	2980	12,29	1,99	1,93	0,1	0,61
		13,11	1,86			0,66
		12,45	1,80			1,31
		13,2	2,09			1,57
		14,37	1,91			0,16
		12,7	1,93			0,05

Nota: D.P. = Desvio Padrão; * Valor amostral excluído pelo critério de *Chauvenet*; ** Valores recalculados excluindo o valor amostral descartado

Fonte: A Autora

A Tabela B.2 apresenta os resultados de absorção de umidade para a Resina 2. Também é possível notar que alguns dados experimentais foram desprezados por superarem o valor limite do critério de *Chauvenet*.

Tabela B.2: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a absorção de umidade da Resina 2

Tipo de Resina	Tempo (horas)	Valor (g)	Ganho de massa (%)	Média (%)	D.P. (%)	Critério de Chauvenet
Resina 2 - primer	0	15,3	-	-	-	-
		16,77				-
		11,62				-
		14,04				-
		13,78				-
		13,98				-
	168	15,45	0,98	0,69	0,19	1,59
		16,84	0,42			1,44
		11,71	0,77			0,48
		14,13	0,64			0,24
		13,87	0,65			0,17
		14,07	0,64			0,22

(continua)

Tabela B.2: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a absorção de umidade da Resina 2

Tipo de Resina	Tempo (horas)	Valor (g)	Ganho de massa (%)	Média (%)	D.P. (%)	Critério de Chauvenet
Resina 2 - <i>primer</i>	336	15,46	1,05	0,9	0,15	0,95
		16,89	0,72			1,19
		11,75	1,12			1,42
		14,15	0,78			0,75
		13,9	0,87			0,18
		14,1	0,86			0,26
	504	15,51	1,37	0,92	0,3	1,48
		16,94	1,01			0,30
		11,67	0,43			1,63
		14,16	0,85			0,23
		13,91	0,94			0,06
		14,11	0,93			0,02
	840	15,49	1,24*	0,9	0,19	1,76
		16,9	0,78			0,63
		11,72	0,86			0,19
		14,14	0,71			0,95
		13,89	0,80			0,51
		14,12	1,00			0,53
	1224	15,5	1,31*	0,88	0,23	1,91
		16,92	0,89			0,08
		11,7	0,69			0,83
		14,16	0,85			0,10
		13,89	0,80			0,35
		14,08	0,72			0,72
	1536	15,48	1,18	0,7	0,28	1,71
		16,9	0,78			0,27
		11,68	0,52			0,66
		14,09	0,36			1,23
		13,88	0,73			0,10
		14,07	0,64			0,20
1848	15,46	1,05*	0,53	0,27	1,94	
	16,84	0,42			0,42	
	11,66	0,34			0,69	
	14,09	0,36			0,65	
	13,84	0,44			0,35	
	14,06	0,57			0,16	
2184	15,45	0,98*	0,43	0,28	1,94	
	16,84	0,42			0,05	
	11,65	0,26			0,61	
	14,07	0,21			0,77	
	13,82	0,29			0,50	
	14,04	0,43			0,01	
2520	15,39	0,59	-0,04	0,49	1,28	
	16,62	-0,89			1,72	
	11,6	-0,17			0,26	
	14,03	-0,07			0,06	
	13,79	0,07			0,24	
	14,01	0,21			0,52	

(continua)

Tabela B.2: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a absorção de umidade da Resina 2

Tipo de Resina	Tempo (horas)	Valor (g)	Ganho de massa (%)	Média (%)	D.P. (%)	Critério de Chauvenet
Resina 2 - <i>primer</i>	2980	15,37	0,46	-0,04	0,29	1,70
		16,79	0,12			0,55
		11,59	-0,26			0,73
		13,99	-0,36			1,07
		13,76	-0,15			0,35
		13,97	-0,07			0,10
Resina 2 - <i>laminação</i>	0	12,58		-	-	-
		15,06				
		13,25				
		12,98				
		12,61				
		13,77				
	168	12,69	0,87	0,64	0,14	1,68
		15,15	0,60			0,29
		13,31	0,45			1,33
		13,07	0,69			0,39
		12,69	0,63			0,03
		13,85	0,58			0,41
	336	12,69	0,87	0,84	0,13	0,31
		15,19	0,86			0,22
		13,33	0,60*			1,85
		13,1	0,92			0,70
		12,73	0,95			0,92
		13,88	0,80			0,30
	504	12,7	0,95	0,9	0,05	1,07
		15,19	0,86			0,70
		13,36	0,83			1,34
		13,1	0,92			0,49
		12,73	0,95			1,02
		13,89	0,87			0,54
840	12,68	0,79	0,64	0,18	0,84	
	15,18	0,80			0,85	
	13,34	0,68			0,20	
	13,07	0,69			0,28	
	12,65	0,32*			1,82	
	13,85	0,58			0,35	
1224	12,68	0,79	0,78	0,13	0,08	
	15,18	0,80			0,09	
	13,33	0,60			1,39	
	13,11	1,00			1,66	
	12,7	0,71			0,55	
	13,88	0,80			0,11	
1536	12,65	0,56	0,51	0,12	0,39	
	15,14	0,53			0,18	
	13,31	0,45			0,50	
	13,02	0,31*			1,75	
	12,69	0,63			1,07	
	13,85	0,58			0,61	

(continua)

Tabela B.2: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a absorção de umidade da Resina 2
(conclusão)

Tipo de Resina	Tempo (horas)	Valor (g)	Ganho de massa (%)	Média (%)	D.P. (%)	Critério de Chauvenet
Resina 2-laminação	1848	12,6	0,16	0,32	0,2	0,82
		15,12	0,40			0,39
		13,25	0,00			1,62
		13,04	0,46			0,71
		12,66	0,40			0,38
		13,84	0,51			0,95
	2184	12,61	0,24	0,23	0,08	0,15
		15,09	0,20			0,31
		13,26	0,08*			1,77
		13,01	0,23			0,07
		12,65	0,32			1,08
		13,81	0,29			0,77
	2520	12,58	0,00	-0,01	0,12	0,11
		15,06	0,00			0,11
		13,23	-0,15			1,14
		12,96	-0,15			1,17
		12,62	0,08			0,77
		13,79	0,15			1,31
	2980	12,55	-0,24	-0,16	0,11	0,67
		15,05	-0,07			0,86
		13,21	-0,30			1,23
		12,96	-0,15			0,08
		12,61	0,00			1,44
		13,74	-0,22			0,48

Nota: D.P. = Desvio Padrão; * Valor amostral excluído pelo critério de *Chauvenet*; ** Valores recalculados excluindo o valor amostral descartado

Fonte: A Autora

APÊNDICE C – RESULTADOS EXPERIMENTAIS ENSAIO DE TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS DE CFRP

Nesta seção são apresentados em tabelas e gráficos os resultados dos ensaios de tração dos compósitos de CFRP individualmente, indicando a média, desvio padrão e os resultados do critério de *Chauvenet* para identificação de *outliers*. Para cada tipo de compósito e idade foram ensaiados seis corpos de prova, assim, quando a variação dos dados em relação ao desvio padrão supera o valor de 1,73 o resultado é descartado do conjunto de dados.

As Tabelas C.1, C.2 e C.3 apresentam os resultados para tensão de tração, módulo de elasticidade e deformação, respectivamente. Alguns dados experimentais foram desprezados por estarem fora do intervalo de confiança do critério de *Chauvenet* conforme indicado.

Tabela C.1: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a tensão de tração do CFRP

Tipo de CFRP	Ambiente de exposição	Valor (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	Critério de Chauvenet
CFRP 1	Referência	2790,32			0,72
		2789,63			0,73
		2890,19	2916,84	175,37	0,15
		2882,27	2847,90**	52,95**	0,20
		2887,09			0,17
		3261,52*			1,97
	ACP – 1000 horas	2943,04			0,56
		2428,93			0,76
		2703,75	2724,48	388,69	0,05
		2162,76			1,45
		3262,62			1,38
		2845,76			0,31
	ACP – 3000 horas	3057,23			0,42
		2830,81			0,47
		3310,28	2950,20	255,26	1,41
		2556,67			1,54
		3058,24			0,42
		2887,95			0,24
	Intemperismo	2437,09			0,83
		2667,50			0,31
		2432,17	2604,31	202,33	0,85
		2968,59*	2531,45**	106,58**	1,80
		2503,20			0,50
		2617,28			0,06

(continua)

Tabela C.1: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a tensão de tração do CFRP
(conclusão)

Tipo de CFRP	Ambiente de exposição	Valor (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	Critério de Chauvenet
CFRP 2	Referência	2449,09	2611,49	133,08	1,22
		2618,84			0,06
		2474,79			1,03
		2794,65			1,38
		2621,09			0,07
		2710,44			0,74
	ACP – 1000 horas	2353,67	2607,16	184,22	1,38
		2520,25			0,47
		2702,84			0,52
		2490,58			0,63
		2858,04			1,36
		2717,58			0,60
	ACP – 3000 horas	2770,94	2476,26	293,94	1,00
		2538,79			0,21
		2582,45			0,36
		2304,98			0,58
		2689,35			0,72
		1971,05			1,72
	Intemperismo	2582,00	2798,10	152,18	1,42
		2985,85			1,23
		2858,14			0,39
		2770,97			0,18
		2917,26			0,78
		2674,41			0,81

Nota: D.P. = Desvio Padrão; * Valor amostral excluído pelo critério de *Chauvenet*; ** Valores recalculados excluindo o valor amostral descartado

Fonte: A Autora

Tabela C.2: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para o módulo de elasticidade do CFRP

Tipo de CFRP	Ambiente de exposição	Valor (GPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	Critério de Chauvenet	
CFRP 1	Referência	266,32	232,03	23,16	1,48	
		228,07			0,17	
		233,44			0,06	
		197,07			1,51	
		245,05			0,56	
		222,22			0,42	
	ACP – 1000 horas	231,39	233,39	18,38	0,11	
		268,72*			1,92	
		223,86			0,52	
		235,56			226,33**	6,91**
		218,97			0,78	
		221,86			0,63	

(continua)

Tabela C.2: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para o módulo de elasticidade do CFRP
(conclusão)

Tipo de CFRP	Ambiente de exposição	Valor (GPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	Critério de Chauvenet		
CFRP 1	ACP – 3000 horas	270,00	233,10	21,74	1,70		
		232,59			0,02		
		243,45			0,48		
		210,11			1,06		
		214,77			0,84		
		227,69			0,25		
	Intemperismo	211,55	221,60	25,82	0,39		
		241,21			0,76		
		181,22			1,56		
		256,00			1,33		
		223,43			0,07		
		216,18			0,21		
	CFRP 2	Referência	234,15	226,81	13,82	0,53	
			241,68			1,08	
201,02*			231,96**			6,26**	1,87
230,08			0,24				
228,35			0,11				
225,56			0,09				
ACP – 1000 horas		238,55	249,14	21,28	0,50		
		251,58			0,11		
		288,49*			241,28**	10,09**	1,85
		252,17			0,14		
		233,49			0,74		
		230,58			0,87		
ACP – 3000 horas		233,86	263,85	41,80	0,72		
		346,55*			1,98		
	256,53	247,31**			11,50**	0,18	
	239,46	0,58					
	261,35	0,06					
	245,32	0,44					
Intemperismo	236,40	219,38	40,33	0,42			
	274,07			1,36			
	227,59			0,20			
	231,26			0,29			
	188,16			0,77			
	158,21			1,50			

Nota: D.P. = Desvio Padrão; * Valor amostral excluído pelo critério de *Chauvenet*; ** Valores recalculados excluindo o valor amostral descartado

Fonte: A Autora

Tabela C.3: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a deformação máxima do CFRP

Tipo de CFRP	Ambiente de exposição	Valor (mm/mm)	Média (mm/mm)	D.P. (mm/mm)	Critério de Chauvenet
CFRP 1	Referência	0,0097	0,0114	0,0012	1,41
		0,0108			0,50
		0,0113			0,12
		0,0130			1,24
		0,0111			0,28
		0,0127			1,07
	ACP – 1000 horas	0,0117	0,0111	0,0017	0,39
		0,0095			0,92
		0,0109			0,08
		0,0087			1,37
		0,0133			1,27
		0,0123			0,70
	ACP – 3000 horas	0,0116	0,0117	0,0008	0,08
		0,0109			0,88
		0,0129			1,39
		0,0107			1,20
		0,0125			0,90
		0,0116			0,13
	Intemperismo	0,0110	0,0109	0,0009	0,06
		0,0102			0,78
		0,0114			0,54
0,0115		0,63			
0,0096		1,56			
0,0119		1,12			
CFRP 2	Referência	0,0101	0,0108 0,0105**	0,0008 0,0004**	0,86
		0,0109			0,17
		0,0101			0,88
		0,0110			0,33
		0,0104			0,52
		0,0122*			1,75
	ACP – 1000 horas	0,0101	0,0102	0,0007	0,09
		0,0098			0,51
		0,0095			0,97
		0,0097			0,72
		0,0113			1,72
		0,0105			0,56
	ACP – 3000 horas	0,0108	0,0090	0,0011	1,57
		0,0079			1,00
		0,0094			0,30
0,0091		0,07			
0,0093		0,25			
0,0078		1,18			

(continua)

Tabela C.3: Análises estatísticas e resultados do critério de *Chauvenet* para a deformação máxima do CFRP (conclusão)

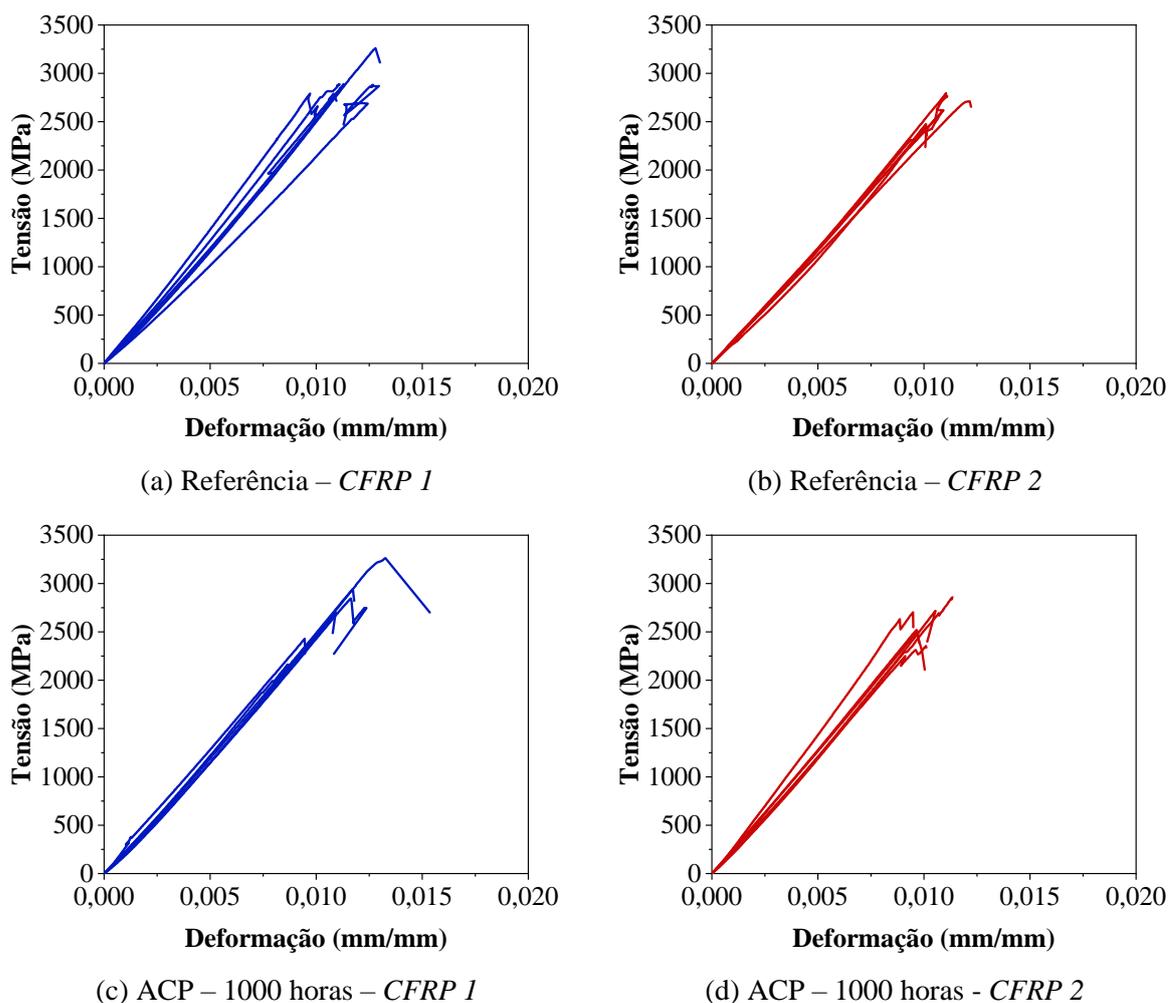
Tipo de CFRP	Ambiente de exposição	Valor (mm/mm)	Média (mm/mm)	D.P. (mm/mm)	Critério de Chauvenet
CFRP 2	Intemperismo	0,0102	0,0115	0,0009	1,47
		0,0117			0,12
		0,0116			0,09
		0,0109			0,71
		0,0121			0,56
		0,0128			1,41

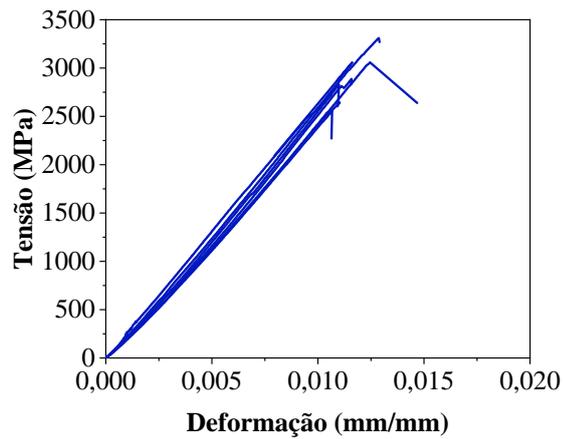
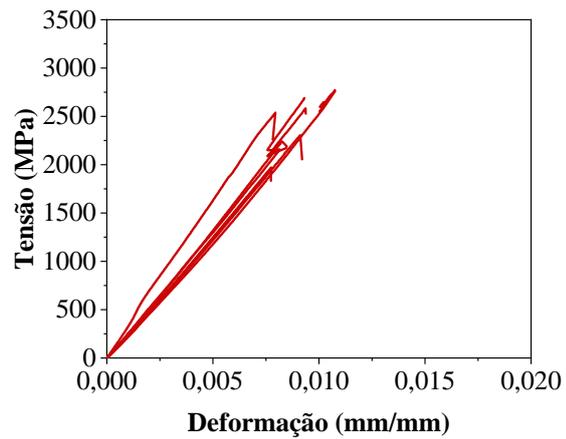
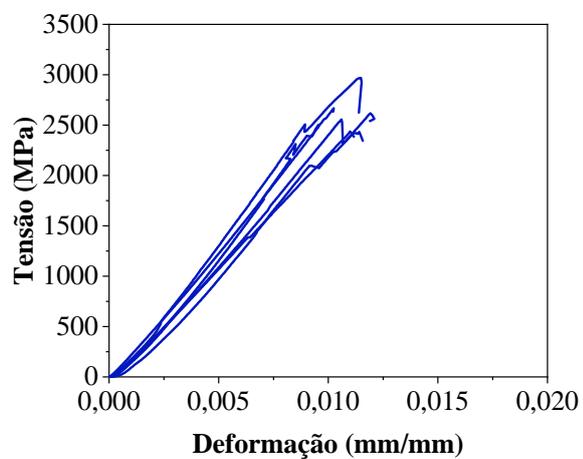
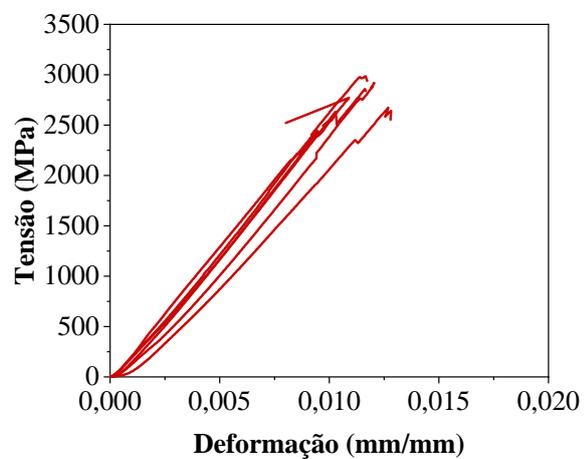
Nota: D.P. = Desvio Padrão; * Valor amostral excluído pelo critério de *Chauvenet*; ** Valores recalculados excluindo o valor amostral descartado

Fonte: A Autora

A Figura C.1 ilustra os gráficos de tensão de tração *versus* deformação para os compósitos de CFRP 1 e 2 para cada condição de exposição analisada.

Figura C.1: Curvas tensão de tração *versus* deformação para os compósitos de CFRP



(e) ACP – 3000 horas - *CFRP 1*(f) ACP – 3000 horas - *CFRP 2*(g) Intemperismo – *CFRP 1*(h) Intemperismo – *CFRP 2*

Fonte: A Autora

APÊNDICE D – RESULTADOS EXPERIMENTAIS ENSAIO DE COMPRESSÃO CONCRETO

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios de compressão uniaxial dos corpos de prova de concreto. Os resultados são apresentados na Tabela D.1, indicando tensão de compressão e módulo de elasticidade médios e desvio padrão.

Tabela D.1: Resultados experimentais para a tensão máxima de compressão

Concretagem	Ambiente de exposição	Tensão máxima (MPa)			Módulo de elasticidade (GPa)		
		Valor	Média	D.P.	Valor	Média	D.P.
Concretagem 1	Referência	43,19			39,58		
		47,07	43,14	3,96	42,44	41,35	1,55
		39,16			42,02		
	ACP – 1000 h	48,38			44,36		
		51,41	51,17	2,68	43,26	43,21	1,18
		53,73			42,01		
	ACP – 3000 h	55,12			41,02		
		53,42	51,67	4,58	47,38	42,62	4,19
		46,47			39,47		
Intemperismo	57,38			35,77			
	58,90	57,86	0,9	41,40	38,67	2,82	
	57,31			38,84			
Concretagem 2	Referência	51,26			41,58		
		47,39	52,35	5,59	41,02	40,43	1,52
		58,40			38,70		
	ACP – 1000 h	49,58			38,61		
		49,80	50,16	0,82	42,46	39,00	3,29
		51,10			35,93		
	ACP – 3000 h	59,72			43,09		
		53,31	53,98	5,43	41,27	42,46	1,03
		48,91			43,02		
Intemperismo	47,78			29,83			
	48,52	48,54	0,77	28,88	30,66	2,31	
	49,33			33,27			
Concretagem 3	Referência	46,66			38,07		
		46,25	48,57	3,67	38,84	37,70	1,37
		52,79			36,17		
	ACP – 1000 h	53,74			38,34		
		48,32	51,94	3,13	41,43	40,48	1,86
		53,76			41,67		

(continua)

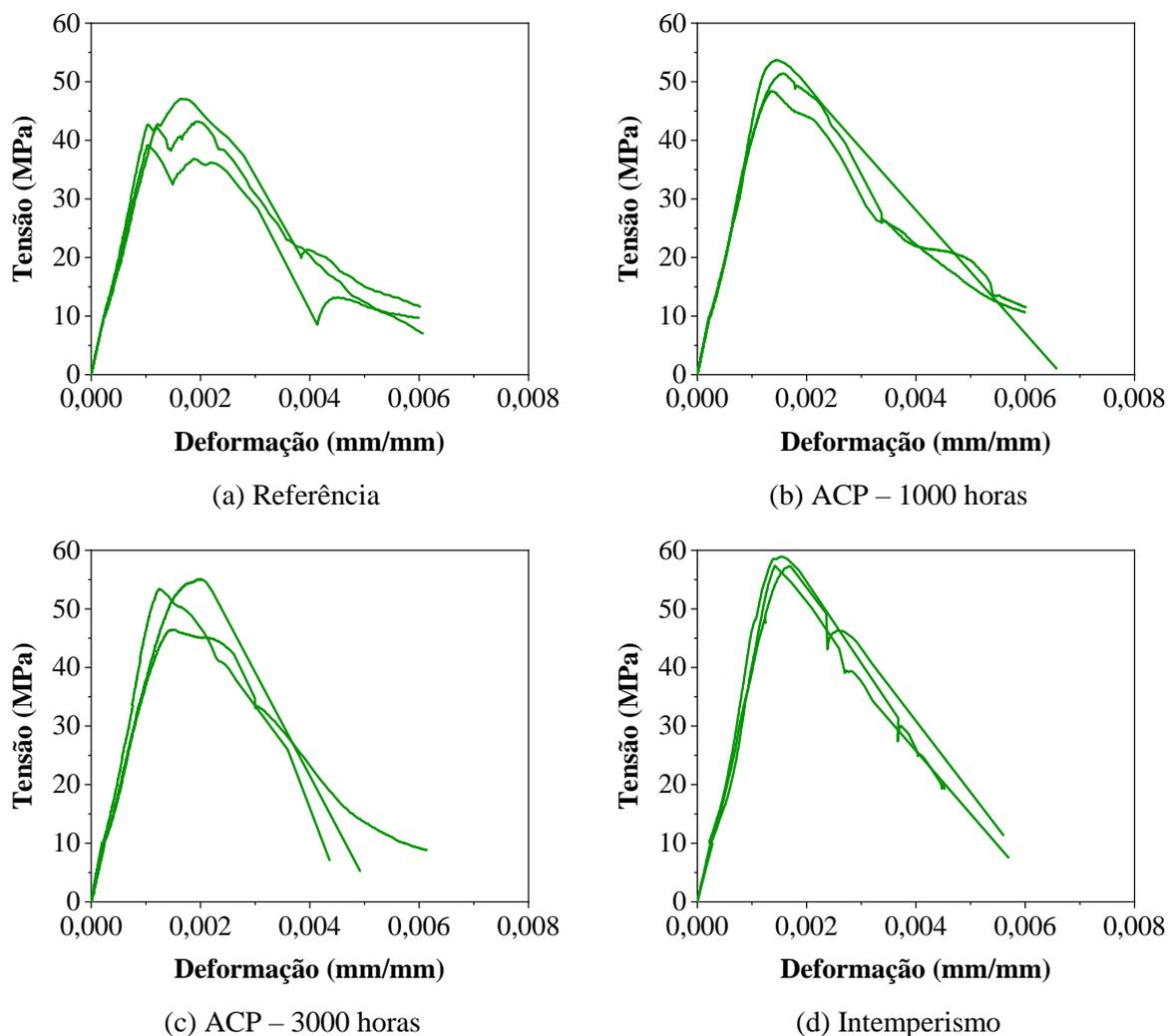
Tabela D.1: Resultados experimentais para a tensão máxima de compressão (conclusão)

Concretagem	Ambiente de exposição	Tensão máxima (MPa)			Módulo de elasticidade (GPa)		
		Valor	Média	D.P.	Valor	Média	D.P.
Concretagem 3	ACP – 3000 h	50,32			33,09		
		53,94	51,17	2,46	36,38	34,00	2,08
		49,24			32,54		
	Intemperismo	57,81			31,94		
		50,20	50,87	6,63	31,27	30,87	1,31
		44,61			29,41		
Concretagem 4	Referência	60,07			41,29		
		49,89	53,26	5,9	40,00	41,35	1,38
		49,81			42,76		
	ACP – 1000 h	58,29			39,34		
		55,98	56,5	1,59	36,50	38,39	1,64
		55,23			39,33		
	ACP – 3000 h	48,04			34,08		
		57,97	52,08	5,22	34,42	34,48	0,43
		50,22			34,93		
	Intemperismo	47,80			28,02		
		56,02	47,85	8,15	34,01	30,35	3,21
		39,72			29,04		
Concretagem 5	Referência	51,03			41,26		
		54,79	51,82	2,66	36,91	38,75	2,25
		49,65			38,07		
	ACP – 1000 h	54,03			40,83		
		49,24	53,96	4,68	34,66	37,03	3,33
		58,60			35,59		
	ACP – 3000 h	48,59			33,41		
		50,59	50,97	2,59	32,66	33,82	1,41
		53,73			35,40		
	Intemperismo	50,12			33,17		
		54,32	53,83	3,49	32,79	33,77	1,38
		57,04			35,36		
Média	Referência		49,83	5,41		39,91	2,06
	ACP – 1000 h		52,75	3,38		39,62	2,99
	ACP – 3000 h		51,97	3,77		37,48	4,69
	Intemperismo		51,79	5,68		32,87	3,81

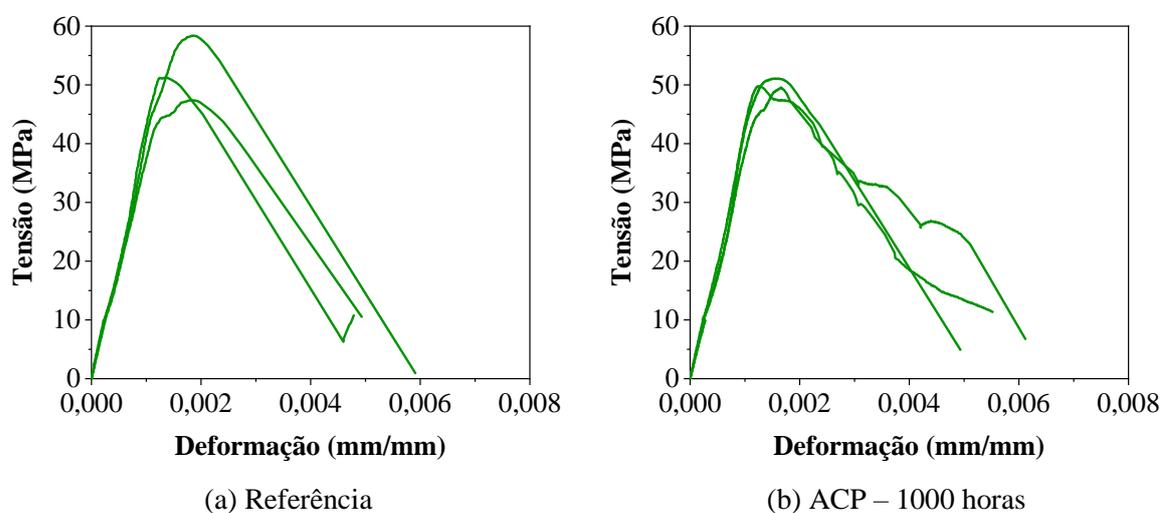
Nota: D.P. = Desvio Padrão

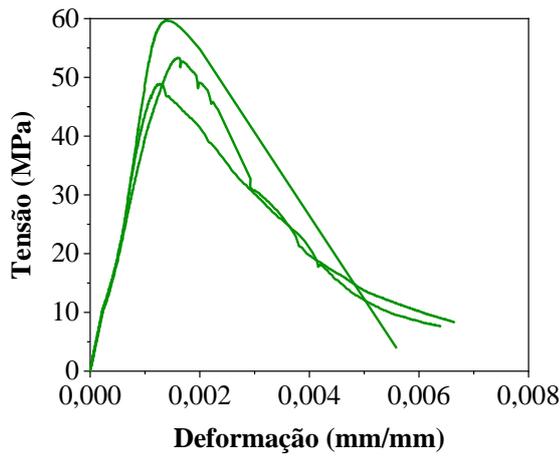
Fonte: A Autora

As Figuras D.1, D.2, D.3, D.4 e D.5 ilustram os gráficos de tensão de compressão *versus* deformação para cada uma das concretagens.

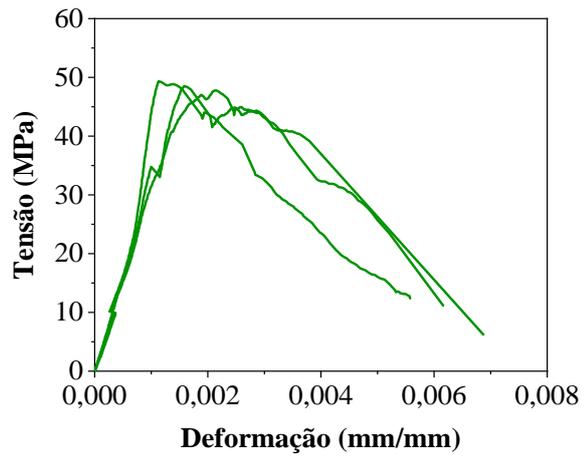
Figura D.1: Curvas tensão de compressão *versus* deformação - Concretagem 1

Fonte: A Autora

Figura D.2: Curvas tensão de compressão *versus* deformação - Concretagem 2



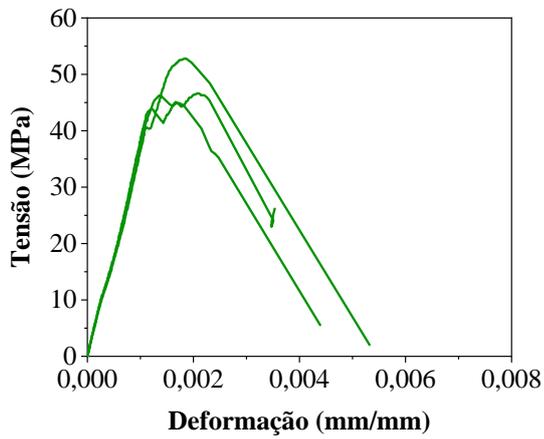
(c) ACP – 3000 horas



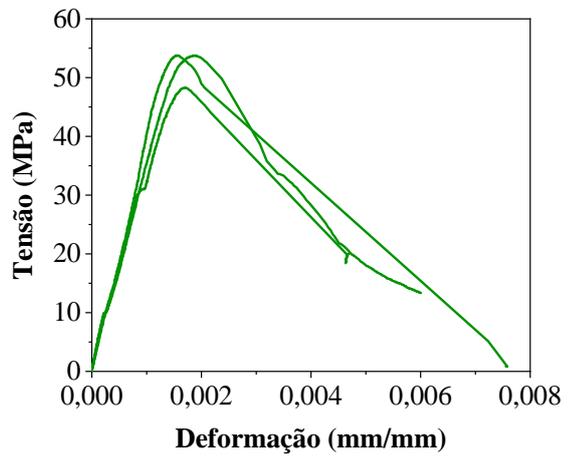
(d) Intemperismo

Fonte: A Autora

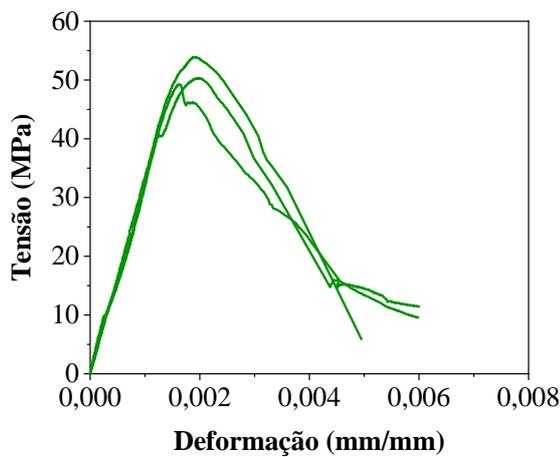
Figura D.3: Curvas tensão de compressão *versus* deformação - Concretagem 3



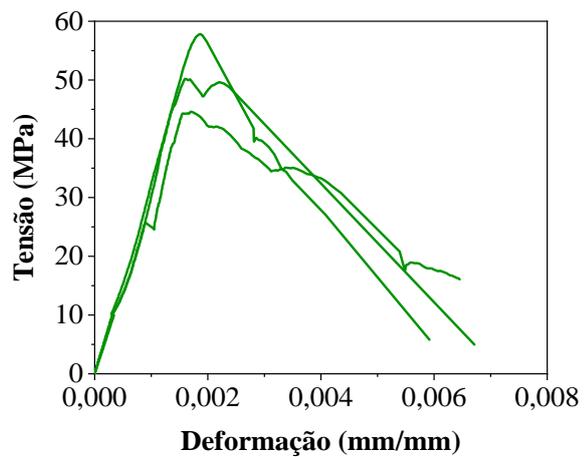
(a) Referência



(b) ACP – 1000 horas

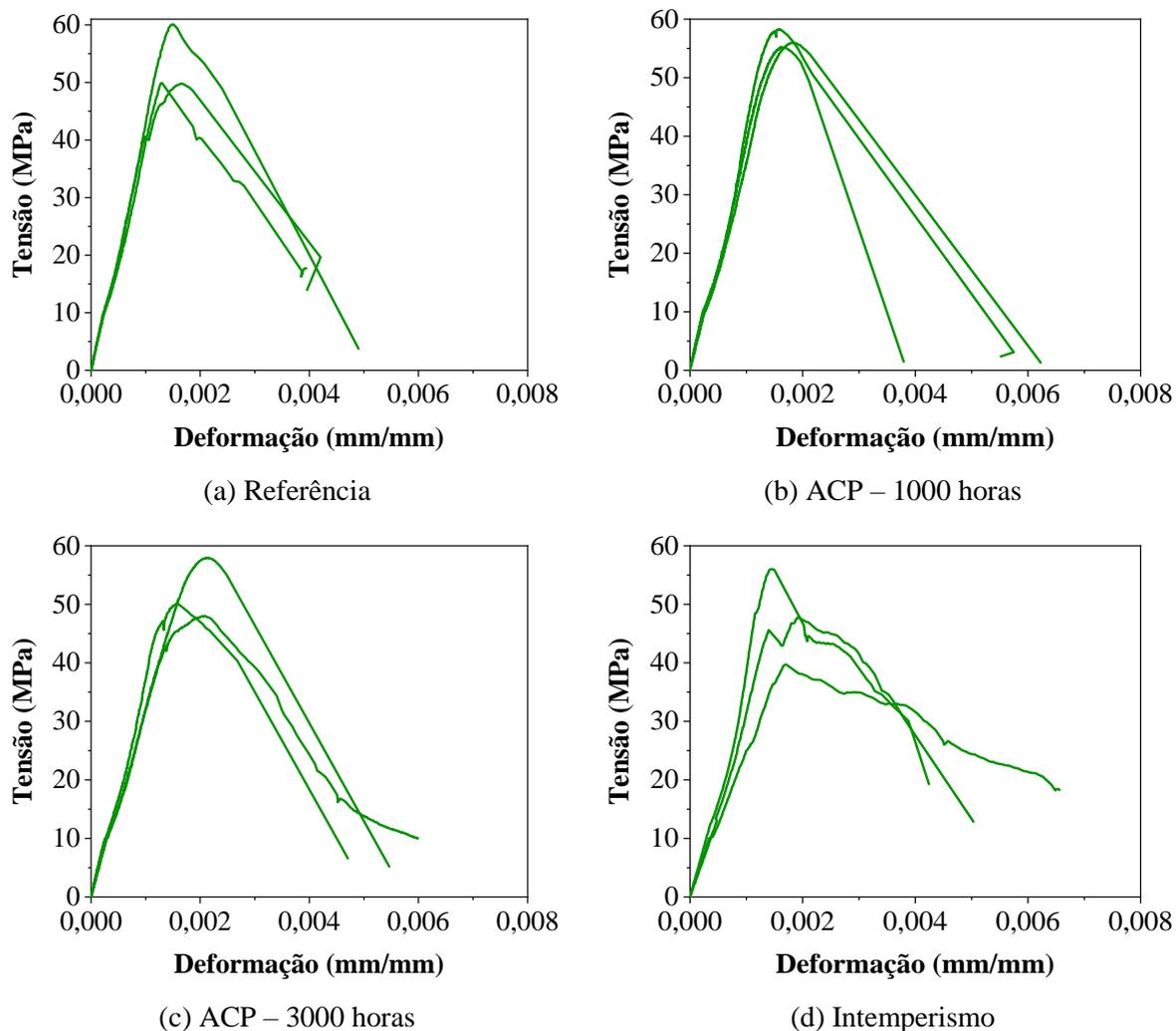


(c) ACP – 3000 horas

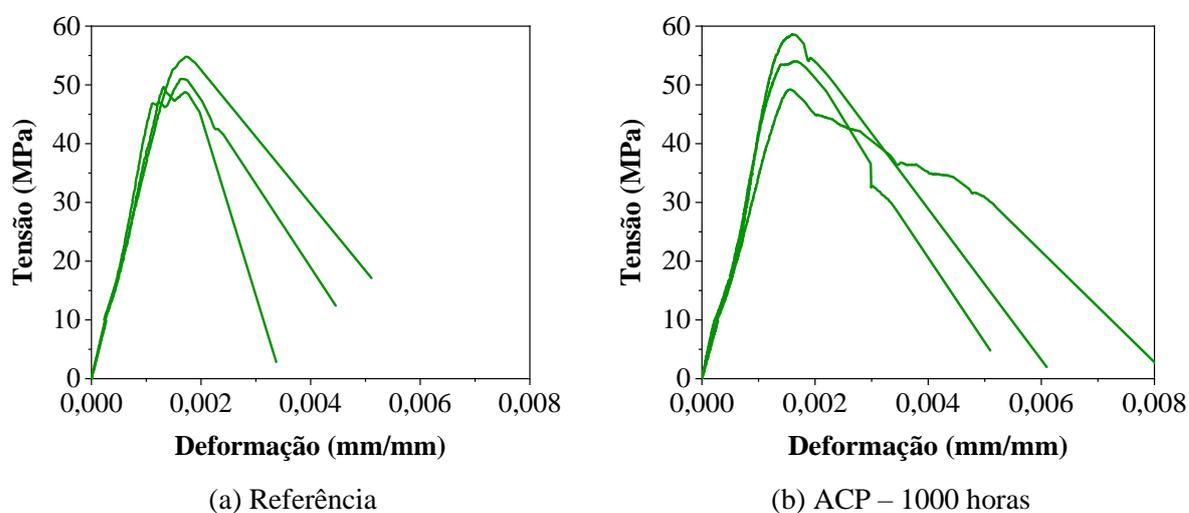


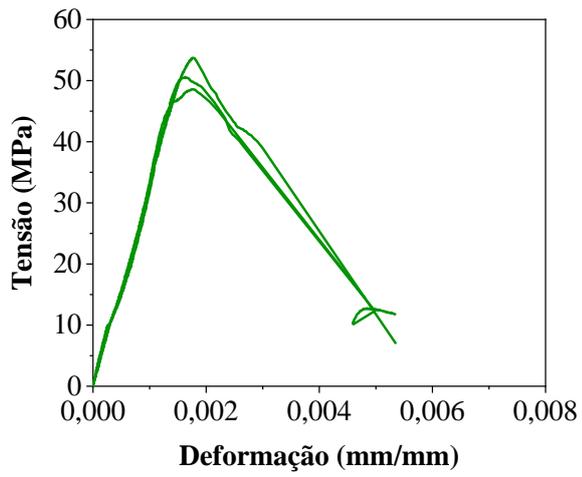
(d) Intemperismo

Fonte: A Autora

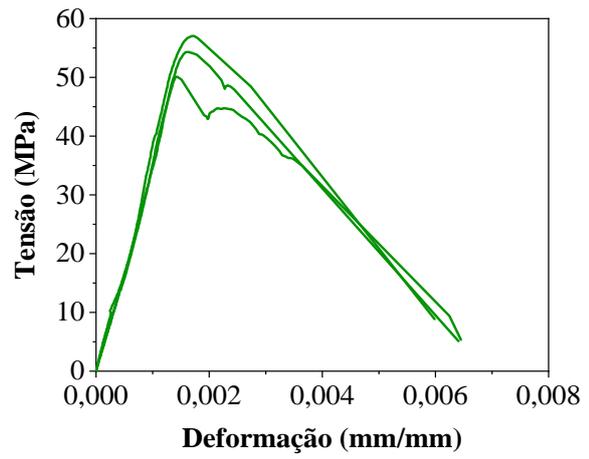
Figura D.4: Curvas tensão de compressão *versus* deformação - Concretagem 4

Fonte: A Autora

Figura D.5: Curvas tensão de compressão *versus* deformação - Concretagem 5



(c) ACP – 1000 horas



(d) Intemperismo

Fonte: A Autora

APÊNDICE E – RESULTADOS EXPERIMENTAIS ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DO CONCRETO

Os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral dos corpos de prova de concreto são apresentados nessa seção. Os resultados são apresentados na Tabela E.1 indicando tensão de tração individual para cada amostra, média e desvio padrão.

Tabela E.1: Resultados experimentais da tensão de tração do concreto

Concretagem	Ambiente de exposição	Valor (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)
Concretagem 1	Referência	3,78	3,87	0,72
		4,63		
		3,20		
	ACP – 1000 horas	4,01	3,69	0,31
		3,40		
		3,66		
	ACP – 3000 horas	3,64	4,17	0,46
		4,44		
		4,43		
	Intemperismo	2,97	3,67	0,71
4,08				
3,96				
Concretagem 2	Referência	3,60	3,74	0,22
		3,99		
		3,63		
	ACP – 1000 horas	3,74	4,00	0,27
		4,29		
		3,97		
	ACP – 3000 horas	5,09	4,04	1,06
		2,97		
		4,06		
	Intemperismo	3,14	3,39	0,37
3,21				
3,81				
Concretagem 3	Referência	4,78	4,06	0,76
		4,13		
		3,27		
	ACP – 1000 horas	3,16	3,56	0,48
		3,42		
		4,09		
	ACP – 3000 horas	3,02	3,39	0,38
		3,78		
3,38				

(continua)

Tabela E.1: Resultados experimentais da tensão de tração do concreto (conclusão)

Concretagem	Ambiente de exposição	Valor (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)
Concretagem 3	Intemperismo	3,70	3,53	0,26
		3,66		
		3,23		
Concretagem 4	Referência	3,72	3,58	0,31
		3,79		
		3,22		
	ACP – 1000 horas	3,09	3,89	0,73
		4,05		
		4,52		
ACP – 3000 horas	4,33	3,97	0,40	
	4,05			
	3,54			
Intemperismo	3,48	3,77	0,60	
	4,47			
	3,37			
Concretagem 5	Referência	3,51	3,5	0,57
		4,06		
		2,92		
	ACP – 1000 horas	3,84	3,97	0,11
		4,04		
		4,04		
ACP – 3000 horas	4,15	3,76	0,47	
	3,25			
	3,89			
Intemperismo	3,16	3,12	0,30	
	3,39			
	2,80			
Média	Referência		3,75	0,52
	ACP – 1000 horas		3,82	0,41
	ACP – 3000 horas		3,87	0,59
	Intemperismo		3,5	0,45

Nota: D.P. = Desvio Padrão

Fonte: A Autora

APÊNDICE F – RESULTADOS EXPERIMENTAIS CORPOS DE PROVA CONFINADOS COM CFRP

Nesta seção são apresentados em tabelas e gráficos os resultados dos ensaios de compressão uniaxial dos corpos de prova de concreto confinados com CFRP. Os resultados são apresentados individualmente, indicando também a média e desvio padrão.

As Tabelas F.1 e F.2 apresentam os resultados para tensão e deformação máximas, respectivamente. Os valores apresentados para a deformação radial no CFRP correspondem à média das deformações aferidas em dois extensômetros posicionados à metade da altura dos corpos de prova.

Tabela F.1: Resultados experimentais para a tensão máxima de compressão

Identificação	Ambiente de exposição	Tensão máxima (MPa)			Tensão máxima concreto (MPa)		
		Valor	Média	D.P.	Valor	Média	D.P.
C1	Referência	102,39	105,25	2,48	48,02	54,1	8,54
		106,56			63,86		
		106,81			50,43		
	ACP – 1000 h	89,22	90,45	2,02	66,89	55,23	11,14
		89,34			54,09		
		92,78			44,7		
	ACP – 3000 h	94,02	95,00	4,94	51,74	51,38	0,33
		90,63			51,31		
		100,36			51,09		
	Intemperismo	88,90	95,90	7,23	_*	62,28	5,84
103,34		66,41					
C2	Referência	95,45	97,29	3,87	60,84	56,91	3,5
		93,71			54,11		
		96,77			55,78		
	ACP – 1000 h	96,09	87,11	9,67	59,35	45,12	13,85
		88,36			44,32		
		76,87			31,69		
	ACP – 3000 h	91,45	94,82	5,18	37,75	43,78	5,23
		100,79			46,95		
		92,22			46,65		
	Intemperismo	92,25	92,73	4,39	61,97	55,47	10,28
88,6		43,62					
		97,35		60,83			

Nota: D.P. = Desvio Padrão; * Um dos extensômetros apresentou problema nas leituras iniciais

Fonte: A Autora

Tabela F.2: Resultados experimentais para as deformações máximas

Identificação	Ambiente de exposição	Deformação axial (mm/mm)			Deformação radial (mm/mm)		
		Valor	Média	D.P.	Valor	Média	D.P.
C1	Referência	0,0078			0,0123		
		0,0089	0,0090	0,0013	0,0114	0,0124	0,0011
		0,0104			0,0135		
	ACP – 1000 h	0,0091			0,0089		
		0,0094	0,0094	0,0004	0,0105	0,0100	0,0010
		0,0098			0,0106		
	ACP – 3000 h	0,0089			0,0106		
		0,0082	0,0087	0,0005	0,0095	0,0105	0,0009
		0,0091			0,0113		
	Intemperismo	0,0063			0,0075		
		0,0082	0,0070	0,0010	0,0112	0,0089	0,0020
		0,0065			0,0081		
C2	Referência	0,0067			0,011		
		0,0084	0,0079	0,0010	0,012	0,0117	0,0006
		0,0085			0,0122		
	ACP – 1000 h	0,0082			0,0104		
		0,0073	0,0073	0,0010	0,0154	0,0106	0,0047
		0,0063			0,0060		
	ACP – 3000 h	0,0071			0,0101		
		0,0091	0,0079	0,0011	0,0128	0,0109	0,0017
		0,0075			0,0098		
	Intemperismo	0,0059			0,0085		
		0,0057	0,0063	0,0008	0,0086	0,0103	0,0030
		0,0072			0,0138		

Nota: D.P. = Desvio Padrão

Fonte: A Autora

APÊNDICE G – RESULTADOS EXPERIMENTAIS CISALHAMENTO FRP-CONCRETO

Os resultados dos ensaios de cisalhamento FRP-concreto são apresentados nesta seção. Os valores de carga, tensão de cisalhamento, energia de fratura e deformação efetiva no FRP são indicados para cada amostra individualmente, sendo apresentado também a média e desvio padrão de cada conjunto de amostras.

A Tabela G.1 a seguir apresenta os valores para força máxima e força última obtida no ensaio enquanto a Tabela G.2 apresenta os valores para a deformação máxima na manta de CFRP obtida no extensômetro central da faixa que descolou ao final do ensaio.

Tabela G.1: Resultados experimentais para a força de aderência FRP-concreto

Identificação	Ambiente de exposição	Força máxima (kN)			Força última (kN)		
		Valor	Média	D.P.	Valor	Média	D.P.
S1	Referência	29,48			29,07		
		28,02	28,67	0,74	25,41	27,42	1,86
		28,52			27,79		
	ACP – 1000 h	22,53			22,43		
		21,24	21,89	0,91	21,15	21,79	0,91
		_*			_*		
	ACP – 3000 h	21,20			21,01		
		19,87	21,03	1,09	19,05	20,66	1,47
		22,02			21,93		
	Intemperismo	27,74			27,33		
		26,51	27,13	0,87	24,86	26,10	1,75
		_*			_*		
S2	Referência	22,43			22,07		
		23,40	22,62	0,71	23,26	21,63	1,89
		22,02			19,55		
	ACP – 1000 h	16,57			16,39		
		16,62	16,80	0,36	16,44	16,65	0,41
		17,21			17,12		
	ACP – 3000 h	13,87			13,87		
		16,02	14,89	1,08	14,42	14,28	0,36
		14,79			14,56		
	Intemperismo	19,23			17,99		
		20,10	19,67	0,62	20,10	19,05	1,49
		_*			_*		

Nota: D.P. = Desvio Padrão; * Amostra danificada antes da execução do ensaio

Fonte: A Autora

Tabela G.2: Resultados experimentais para as deformações máximas no CFRP

Identificação	Ambiente de exposição	Deformação máxima (mm/mm)		
		Valor	Média	D.P.
S1	Referência	0,0010	0,0076	0,0024
		0,0052		
		0,0077		
	ACP – 1000 h	0,0073	0,0050	0,0033
		0,0026		
		-*		
	ACP – 3000 h	0,0066	0,0054	0,0014
		0,0038		
		0,0056		
	Intemperismo	0,0077	0,0067	0,0014
0,0057				
-*				
S2	Referência	0,0043	0,0063	0,0019
		0,0065		
		0,0080		
	ACP – 1000 h	0,0045	0,0047	0,0011
		0,0038		
		0,0060		
	ACP – 3000 h	0,0026	0,0037	0,0010
		0,0041		
		0,0044		
	Intemperismo	0,0030	0,0037	0,0009
0,0043				
-*				

Nota: D.P. = Desvio Padrão; * Amostra danificada antes da execução do ensaio

Fonte: A Autora

A Tabelas G.3 apresenta a tensão de cisalhamento e o deslizamento inicial entre CFRP e o substrato de concreto enquanto a Tabela G4 apresenta a energia de fratura da interface.

Para o cálculo da tensão de cisalhamento e o seu respectivo deslizamento foram empregadas as equações 3.5 e 3.6, com os valores de módulo de elasticidade obtidos no ensaio de tração dos corpos de prova de CFRP para cada condição e idade de exposição.

Tabela G.3: Resultados experimentais para a tensão de cisalhamento máxima e o respectivo deslizamento inicial

Identificação	Ambiente de exposição	Tensão de cisalhamento máxima (MPa)			Deslizamento inicial (mm)		
		Valor	Média	D.P.	Valor	Média	D.P.
S1	Referência	6,44	4,91	1,33	0,22	0,17	0,05
		4,11					
		4,17					

(continua)

Tabela G.3: Resultados experimentais para a tensão de cisalhamento máxima e o respectivo deslizamento inicial
(conclusão)

Identificação	Ambiente de exposição	Tensão de cisalhamento máxima (MPa)			Deslizamento inicial (mm)		
		Valor	Média	D.P.	Valor	Média	D.P.
S1	ACP – 1000 h	4,73	3,88	1,21	0,19	0,16	0,05
		3,02			0,12		
		_*			_*		
	ACP – 3000 h	1,92	2,58	0,83	0,08	0,12	0,03
		3,52			0,13		
		2,31			0,14		
Intemperismo	3,97	3,96	0,01	0,16	0,19	0,04	
	3,95			0,22			
	_*			_*			
S2	Referência	4,00	4,40	0,36	0,15	0,16	0,01
		4,49			0,16		
		4,70			0,17		
	ACP – 1000 h	2,72	2,83	0,21	0,09	0,10	0,01
		2,70			0,09		
		3,08			0,11		
	ACP – 3000 h	2,44	1,90	0,52	0,09	0,07	0,02
		1,40			0,05		
		1,87			0,07		
	Intemperismo	2,89	2,87	0,04	0,11	0,11	0,0
2,84		0,11					
_*		_*					

Nota: D.P. = Desvio Padrão; * Amostra danificada antes da execução do ensaio

Fonte: A Autora

Tabela G.4: Resultados experimentais para energia de fratura na interface FRP-concreto

Identificação	Ambiente de exposição	Valor (MPa.mm)	Média (MPa.mm)	D.P. (MPa.mm)
S1	Referência	1,93	1,16	0,67
		0,82		
		0,73		
	ACP – 1000 h	1,31	0,85	0,65
		0,39		
		_*		
ACP – 3000 h	0,22	0,41	0,18	
	0,57			
	0,44			
Intemperismo	0,94	0,99	0,06	
	1,03			
	_*			
S2	Referência	0,87	0,95	0,21
		0,79		
		1,19		

(continua)

Tabela G.4: Resultados experimentais para energia de fratura na interface FRP-concreto (conclusão)

Identificação	Ambiente de exposição	Valor (MPa.mm)	Média (MPa.mm)	D.P. (MPa.mm)
S2	ACP – 1000 h	0,30	0,36	0,06
		0,36		
		0,42		
	ACP – 3000 h	0,34	0,21	0,12
		0,10		
		0,19		
	Intemperismo	0,42	0,36	0,08
		0,30		
		_*		

Nota: D.P. = Desvio Padrão; * Amostra danificada antes da execução do ensaio

Fonte: A Autora

APÊNDICE H – RESULTADOS EXPERIMENTAIS FLEXÃO A TRÊS PONTOS

Os resultados dos ensaios de flexão a três pontos dos prismas reforçados com CFRP são apresentados nesta seção. Os valores de carga, tensão de cisalhamento, energia de fratura e deformação efetiva no FRP são indicados para cada amostra individualmente, sendo apresentado também a média e desvio padrão de cada conjunto de amostras.

A Tabela H.1 a seguir apresenta os valores para força máxima e força última obtida no ensaio enquanto a Tabela H.2 apresenta os valores para a deformação máxima na manta de CFRP, obtida no extensômetro central da faixa que descolou ao final do ensaio.

Tabela H.1: Resultados experimentais para a força de aderência FRP-concreto

Identificação	Ambiente de exposição	Força máxima (kN)			Força última (kN)		
		Valor	Média	D.P.	Valor	Média	D.P.
B1	Referência	20,88			17,40		
		19,73	21,84	2,72	18,86	19,17	1,94
		24,91			21,24		
	ACP – 1000 h	15,57			14,93		
		16,25	15,90	0,34	16,02	15,46	0,55
		15,89			15,43		
	ACP – 3000 h	15,75			14,93		
		17,08	15,80	1,26	14,38	13,86	1,40
		14,56			12,27		
	Intemperismo	19,96			18,68		
		20,10	20,48	0,78	19,46	19,76	1,26
		21,38			21,15		
B2	Referência	17,86			16,25		
		18,13	17,92	0,19	15,34	15,87	0,47
		17,76			16,02		
	ACP – 1000 h	13,87			11,90		
		13,74	14,10	0,52	11,49	11,86	0,35
		14,70			12,18		
	ACP – 3000 h	15,20			12,68		
		13,78	14,13	0,94	11,35	11,44	1,19
		13,41			10,30		
	Intemperismo	16,07			13,09		
		17,76	16,57	1,03	17,26	14,70	2,24
		15,89			13,74		

Nota: D.P. = Desvio Padrão

Fonte: A Autora

Tabela H.2: Resultados experimentais para as deformações máximas no CFRP

Identificação	Ambiente de exposição	Deformação máxima (mm/mm)		
		Valor	Média	D.P.
B1	Referência	0,0061	0,0065	0,0014
		0,0053		
		0,0080		
	ACP – 1000 h	0,0041	0,0050	0,0009
		0,0049		
		0,0060		
	ACP – 3000 h	0,0045	0,0046	0,0006
		0,0052		
		0,0041		
Intemperismo	0,0081	0,0080	0,0015	
	0,0063			
	0,0094			
B2	Referência	0,0085	0,0065	0,0018
		0,0056		
		0,0053		
	ACP – 1000 h	0,0044	0,0046	0,0003
		0,0043		
		0,0049		
	ACP – 3000 h	0,0052	0,0040	0,0013
		0,0041		
		0,0027		
Intemperismo	0,0040	0,0049	0,0013	
	0,0064			
	0,0042			

Nota: D.P. = Desvio Padrão

Fonte: A Autora

A Tabelas H.3 apresenta a tensão de cisalhamento e o deslizamento inicial entre CFRP e o substrato de concreto enquanto a Tabela H.4 apresenta a energia de fratura da interface.

Para o cálculo da tensão de cisalhamento e o seu respectivo deslizamento foram empregadas as equações 3.5 e 3.6, com os valores de módulo de elasticidade obtidos no ensaio de tração dos corpos de prova de CFRP para cada condição e idade de exposição.

Tabela H.3: Resultados experimentais para a tensão de cisalhamento máxima e o respectivo deslizamento inicial

Identificação	Ambiente de exposição	Tensão de cisalhamento máxima (MPa)			Deslizamento inicial (mm)		
		Valor	Média	D.P.	Valor	Média	D.P.
B1	Referência	3,01	4,22	1,87	0,11	0,15	0,07
		3,28			0,12		
		6,37			0,23		

(continua)

Tabela H.3: Resultados experimentais para a tensão de cisalhamento máxima e o respectivo deslizamento inicial
(conclusão)

Identificação	Ambiente de exposição	Tensão de cisalhamento máxima (MPa)			Deslizamento inicial (mm)		
		Valor	Média	D.P.	Valor	Média	D.P.
B1	ACP – 1000 h	2,55	3,07	0,46	0,10	0,11	0,01
		3,23			0,12		
		3,43			0,12		
	ACP – 3000 h	_*	3,16	1,10	_*	0,11	0,03
		3,93			0,13		
		2,38			0,09		
	Intemperismo	4,62	4,20	0,59	0,20	0,18	0,03
		3,78			0,16		
		_*			_*		
B2	Referência	_*	3,48	0,38	_*	0,13	0,01
		3,21			0,12		
		3,75			0,13		
	ACP – 1000 h	3,81	3,26	0,67	0,13	0,11	0,02
		2,51			0,09		
		3,46			0,12		
	ACP – 3000 h	2,91	2,29	0,54	0,09	0,08	0,01
		1,99			0,07		
		1,97			0,08		
Intemperismo	2,52	2,69	0,23	0,10	0,11	0,01	
	_*			_*			
	2,85			0,11			

Nota: D.P. = Desvio Padrão; * Amostra descolou na extremidade sem instrumentação

Fonte: A Autora

Tabela H.4: Resultados experimentais para energia de fratura na interface FRP-concreto

Identificação	Ambiente de exposição	Valor (MPa.mm)	Média (MPa.mm)	D.P. (MPa.mm)
B1	Referência	0,45	0,96	0,92
		0,41		
		2,02		
	ACP – 1000 h	0,36	0,55	0,19
		0,56		
		0,73		
	ACP – 3000 h	_*	0,54	0,28
		0,73		
		0,34		
Intemperismo	0,96	0,88	0,12	
	0,79			
	_*			
B2	Referência	_*	0,66	0,18
		0,53		
		0,78		

(continua)

Tabela H.4: Resultados experimentais para energia de fratura na interface FRP-concreto (conclusão)

Identificação	Ambiente de exposição	Valor (MPa.mm)	Média (MPa.mm)	D.P. (MPa.mm)
B2	ACP – 1000 h	0,67	0,52	0,19
		0,30		
	ACP – 3000 h	0,58	0,25	0,19
		0,46		
		0,11		
		0,18		
Intemperismo	0,29	0,37	0,11	
	-*			
		0,44		

Nota: D.P. = Desvio Padrão; * Amostra descolou na extremidade sem instrumentação

Fonte: A Autora

APÊNDICE I – RESULTADOS EXPERIMENTAIS ARRANCAMENTO

Na presente seção são apresentados os resultados para os ensaios de arrancamento (*pull-off*). A Tabela I.1 apresenta os valores da tensão máxima para cada amostra individualmente, sendo apresentado também a média e desvio padrão para cada conjunto de amostras.

Tabela I.1: Resultados experimentais para a tensão de arrancamento

Identificação	Ambiente de exposição	Valor (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)
P1	Referência	3,60	3,69	0,12
		3,77		
		3,70		
	ACP – 1000 horas	1,77	2,97	1,05
		3,44		
		2,33		
	ACP – 3000 horas	3,60	2,73	0,76
		2,25		
		2,70		
	Intemperismo	2,76	3,08	0,61
		3,79		
		3,67		
P2	Referência	2,77	3,22	0,64
		1,30		
		3,06		
	ACP – 1000 horas	2,58	2,31	0,91
		3,01		
		2,33		
	ACP – 3000 horas	2,23	2,52	0,42
		2,65		
		3,44		
	Intemperismo	3,74	3,28	0,56

Nota: D.P. = Desvio Padrão

Fonte: A Autora

APÊNDICE J – MEMORIAL COM OS CÁLCULOS DAS DEFORMAÇÕES RECOMENDADAS PELAS NORMAS

As deformações circunferências atuando nos elementos de concreto confinados com FRP e a deformação efetiva no FRP dos elementos reforçados à flexão e ao cisalhamento deverão ser limitadas conforme as recomendações normativas expostas no item 2.2. Dessa forma, a presente seção indica o passo a passo para o cálculo das deformações no FRP conforme cada uma das recomendações normativas.

J.1 ACI 440.2R (2017)

A norma americana penaliza as deformações e tensões do FRP por um fator de redução ambiental, conforme indicam as Equações 2.1 e 2.2, dessa forma, considerando f_{fu}^* e E_f a tensão de tração e o módulo de elasticidade médios obtidos dos ensaios de tração dos corpos de prova de CFRP, f_{fu} e ε_{fu} são calculados conforme indica a Tabela J.1.

Tabela J.1: Tensão e deformação última dos compósitos de CFRP penalizados pelo coeficiente C_E

Identificação	Ambiente de exposição	C_E	f_{fu}^* (MPa)	$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$ (MPa)	E_f (GPa)	$\varepsilon_{fu} = f_{fu}/E_f$
CFRP 1	REF	0,95	2847,9	2705,51	232,03	0,0117
	ACP e WEA	0,85	2847,9	2420,72	232,03	0,0104
CFRP 2	REF	0,95	2611,49	2480,92	231,96	0,0107
	ACP e WEA	0,85	2611,49	2219,77	231,96	0,0096

Fonte: A Autora

J.1.1 Reforço à flexão

No reforço à flexão, além da penalização das tensões e deformações do FRP pelo fator de redução ambiental, a fim de evitar o descolamento prematuro do FRP sua deformação efetiva ε_{fd} deve ser limitada conforme proposto pela Equação 2.4.

A Tabela J.2 a seguir detalha o cálculo da deformação limite no FRP para os corpos de prova reforçados à flexão. f'_c é a resistência à compressão média dos corpos de prova de concreto de referência e t_f é espessura de uma camada de FRP fornecida pelo fabricante.

Tabela J.2: Parâmetros para cálculo da deformação limite no FRP

Identificação	Ambiente de exposição	t_f (mm)	f'_c (MPa)	E_f (GPa)	ε_{fu}	$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9\varepsilon_{fu}$
B1	REF	0,168	49,83	232,03	0,0117	0,0105
	ACP e WEA	0,168	49,83	232,03	0,0104	0,0094
B2	REF	0,168	49,83	231,96	0,0107	0,0096
	ACP e WEA	0,168	49,83	231,96	0,0096	0,0086

Fonte: A Autora

A partir da discrepância entre os resultados obtidos experimentalmente e os recomendados pela ACI 440.2R (2017), a Tabela J.3 detalha o cálculo da deformação limite no FRP proposto por Teng *et al.* (2003), trabalho este no qual a norma se inspirou para a proposição de sua equação.

Tabela J3: Parâmetros para cálculo da deformação limite no FRP

Identificação	Ambiente de exposição	t_p (mm)	E_p (GPa)	$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{f'_c}}$ (mm)	β_p	$\varepsilon_{fd} = 0,48\beta_p \sqrt{\frac{\sqrt{f'_c}}{nE_p t_p}}$
B1	REF	0,168	232,03	74,31	1,118	0,0072
	ACP e WEA	0,168	232,03	74,31	1,118	0,0072
B2	REF	0,168	231,96	74,30	1,118	0,0072
	ACP e WEA	0,168	231,96	74,30	1,118	0,0072

Fonte: A Autora

J.1.2 Reforço ao cisalhamento

No caso das aplicações que não envolvem toda a seção transversal de concreto observa-se modo de falha governado pelo descolamento do FRP da superfície de concreto. A deformação efetiva atuando no FRP (ε_{fe}) deverá ser penalizada conforme apresenta a Equação 2.7.

As Tabelas J.4 a J.6 a seguir detalham as etapas para cálculo da deformação limite atuando no FRP para os corpos de prova reforçados ao cisalhamento em dois lados.

Tabela J.4: Parâmetros para cálculo da deformação efetiva no FRP (2 e 3 lados reforçados)

Identificação	Ambiente de exposição	t_f (mm)	f'_c (MPa)	E_f (GPa)	d_{fv} (mm)	$L_e = \frac{23300}{(nt_f E_f)^{0,58}}$
						(mm)
S1	REF	0,168	49,83	232,03	150	50,66
	ACP e WEA	0,168	49,83	232,03	150	50,66
S2	REF	0,168	49,83	231,96	150	50,67
	ACP e WEA	0,168	49,83	231,96	150	50,67

Fonte: A Autora

Tabela J.5: Parâmetros para cálculo da deformação efetiva no FRP (2 lados reforçados)

Identificação	Ambiente de exposição	$\kappa_1 = \left(\frac{f'_c}{27}\right)^{2/3}$	$\kappa_2 = \frac{d_{fv} - 2L_e}{d_{fv}}$	ε_{fu}
		S1	REF	1,505
ACP e WEA	1,505		0,325	0,0104
S2	REF	1,505	0,324	0,0107
	ACP e WEA	1,505	0,324	0,0096

Fonte: A Autora

Tabela J.6: Parâmetros para cálculo da deformação efetiva no FRP (2 lados reforçados)

Identificação	Ambiente de exposição	$\kappa_v = \frac{\kappa_1 \kappa_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75$	$\varepsilon_{fe} = \kappa_v \varepsilon_{fu} \leq 0,004$
		S1	REF
ACP e WEA	0,200		0,0021
S2	REF	0,194	0,0021
	ACP e WEA	0,216	0,0021

Fonte: A Autora

As Tabelas J.7 e J.8 detalham as etapas para cálculo da deformação efetiva no caso de reforço aplicado em três lados.

Tabela J.7: Parâmetros para cálculo da deformação efetiva no FRP (3 lados reforçados)

Identificação	Ambiente de exposição	$\kappa_1 = \left(\frac{f_c'}{27}\right)^{2/3}$	$\kappa_2 = \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}}$	ε_{fu}
S1	REF	1,505	0,662	0,0117
	ACP e WEA	1,505	0,662	0,0104
S2	REF	1,505	0,662	0,0107
	ACP e WEA	1,505	0,662	0,0096

Fonte: A Autora

Tabela J.8: Parâmetros para cálculo da deformação efetiva no FRP (3 lados reforçados)

Identificação	Ambiente de exposição	$\kappa_v = \frac{\kappa_1 \kappa_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75$	$\varepsilon_{fe} = \kappa_v \varepsilon_{fu} \leq 0,004$
S1	REF	0,363	0,004
	ACP e WEA	0,408	0,004
S2	REF	0,396	0,004
	ACP e WEA	0,442	0,004

Fonte: A Autora

J.1.3 Confinamento

A norma penaliza a deformação efetiva atuando no FRP no momento de ruptura, ε_{fe} por meio do fator κ_ε , conforme indica a Tabela J.9 a seguir.

Tabela J.9: Parâmetros para cálculo da deformação efetiva no FRP

Identificação	Ambientes de exposição	κ_ε	ε_{fu}	$\varepsilon_{fe} = \kappa_\varepsilon \varepsilon_{fu}$
C1	REF	0,586	0,0117	0,0069
	ACP e WEA	0,586	0,0104	0,0061
C2	REF	0,586	0,0107	0,0063
	ACP e WEA	0,586	0,0096	0,0056

Fonte: A Autora

J.2 FIB Bulletin nº 90 (2019)

A norma europeia não especifica nenhum coeficiente para penalização das deformações e tensões do FRP, dessa forma, será considerado para a tensão de tração e o módulo de elasticidade (f_{fk} e E_f) os valores médios obtidos dos ensaios de tração dos corpos de prova de CFRP, conforme indica a Tabela J.10.

Tabela J.10: Tensão e deformação última dos compósitos de CFRP

Identificação	Ambiente de exposição	f_{fk} (MPa)	E_f (GPa)	$\varepsilon_{fk} = f_f / E_f$
CFRP 1	REF, ACP e WEA	2847,9	232,03	0,0123
CFRP 2	REF, ACP e WEA	2611,49	231,96	0,0113

Fonte: A Autora

J.2.1 Reforço à flexão

Na análise da capacidade resistente à flexão deve ser verificado o descolamento do FRP. A fim de prevenir o descolamento intermediário do FRP, a tensão de projeto do FRP σ_{fd} é calculada conforme a Equação 2.19.

As Tabelas J.11 a J.14 detalham as etapas para cálculo da tensão e respectiva deformação efetiva no FRP para os corpos de prova reforçados à flexão. f_{cm} é a resistência à compressão média dos corpos de prova de concreto de referência e t_f é espessura de uma camada de FRP fornecida pelo fabricante.

Tabela J.11: Parâmetros para cálculo da deformação efetiva no FRP

Identificação	Ambientes de exposição	t_f (mm)	f_{cm} (MPa)	E_f (GPa)	b_f (mm)	b (mm)	$k_{cr,k}$	k_k
B1	REF, ACP e WEA	0,168	49,83	232,03	50	150	1,8	0,17
B2	REF, ACP e WEA	0,168	49,83	231,96	50	150	1,8	0,17

Fonte: A Autora

Tabela J.12: Parâmetros para cálculo da deformação efetiva no FRP

Identificação	Ambientes de exposição	$k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}}$	f_{fk} (MPa)	γ_f	γ_{fb}
B1	REF, ACP e WEA	1,118	2847,9	1,25	1,5
B2	REF, ACP e WEA	1,118	2611,49	1,25	1,5

Fonte: A Autora

Tabela J.13: Parâmetros para cálculo da deformação efetiva no FRP

Identificação	Ambientes de exposição	$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f}$ (MPa)	$f_{fbd,IC} = \frac{k_{cr,k} \cdot k_k \cdot k_b \sqrt{\frac{2E_f}{t_f} f_{cm}^{2/3}}}{\gamma_{fb}}$ (MPa)
B1	REF, ACP e WEA	2278,32	1394,87
B2	REF, ACP e WEA	2089,19	1394,66

Fonte: A Autora

Tabela J.14: Parâmetros para cálculo da deformação efetiva no FRP

Identificação	Ambientes de exposição	$\sigma_{fd} = \min(f_{fbd,IC}, f_{fd})$ (MPa)	$\varepsilon_{fd} = \sigma_{fd} / E_f$
B1	REF, ACP e WEA	1394,87	0,006
B2	REF, ACP e WEA	1394,66	0,006

Fonte: A Autora

J.2.2 Reforço ao cisalhamento

A FIB *Bulletin* 90 (2019) recomenda que esquemas de reforço ao cisalhamento constituídos por dois lados paralelos reforçados com FRP devem ser evitados, enquanto sistemas de reforço que consistem em três lados da seção transversal reforçados com FRP podem ser empregados, apesar da eficiência do FRP ser reduzida devido à possibilidade de ocorrer o descolamento. Neste caso a tensão de cisalhamento atuando no FRP, f_{fvd} , depende da configuração do reforço.

As Tabelas J.15 a J.18 detalham as etapas para cálculo da tensão e deformação efetiva no FRP para os corpos de prova reforçados ao cisalhamento, em que f_{cm} é a resistência à tração

média dos corpos de prova de concreto de referência.

Tabela J.15: Parâmetros para cálculo da deformação efetiva no FRP

Identificação	t_f (mm)	E_f (GPa)	f_{cm} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	s_{0k} (mm)	$\tau_{b1k} = \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}}$ (MPa)
S1	0,168	232,03	49,83	3,38	0,23	12,98
S2	0,168	231,96	49,83	3,38	0,23	12,98

Fonte: A Autora

Tabela J.16: Parâmetros para cálculo da deformação efetiva no FRP

Identificação	$l_e = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{E_f \cdot s_{0k} \cdot t_f}{\tau_{b1k}}}$ (mm)	$f_{fbk} = \sqrt{\frac{E_f \cdot s_{0k} \cdot \tau_{b1k}}{t_f}}$ (MPa)	γ_{fb}
S1	41,28	2030,57	1,5
S2	41,28	2030,27	1,5

Fonte: A Autora

Tabela J.17: Parâmetros para cálculo da deformação efetiva no FRP

Identificação	$f_{fbwd} = \frac{f_{fbk}}{\gamma_{fb}}$ (MPa)	f_{fd} (MPa)	a_t	k_r	$f_{fwd,c} = k_r \cdot a_t \cdot f_{fd}$
S1	1353,71	2278,32	0,8	0,5	911,33
S2	1353,51	2089,19	0,8	0,5	835,68

Fonte: A Autora

Tabela J.18: Parâmetros para cálculo da deformação efetiva no FRP

Identificação	$f_{fwd} = \min(f_{fbwd}, f_{fwd,c})$ (MPa)	$\varepsilon_{fwd} = f_{fwd} / E_f$
S1	911,33	0,0039
S2	835,68	0,0036

Fonte: A Autora

J.2.3 Confinamento

A deformação última do FRP na direção circunferencial, $\varepsilon_{fu,h}$, é penalizada por meio do fator η_h , conforme indica a Tabela J.19 a seguir.

Tabela J.19: Parâmetros para cálculo da deformação efetiva no FRP

Identificação	Ambiente de exposição	f_{fd} (MPa)	E_f (GPa)	η_h	$\varepsilon_{fu,h} = \eta_h \cdot \frac{f_{fd}}{E_f}$
C1	REF, ACP e WEA	2278,32	232,03	0,5	0,0049
C2	REF, ACP e WEA	2089,19	231,96	0,5	0,0045

Fonte: A Autora

