

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

**AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE VIGAS REFORÇADAS COM
FRP QUANDO EXPOSTAS AO INTEMPERISMO**

Douglas da Costa Ferreira

São Carlos
2019

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

**AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE VIGAS REFORÇADAS COM
FRP QUANDO EXPOSTAS AO INTEMPERISMO**

Douglas da Costa Ferreira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia

Orientador: Dra. Gláucia Maria Dalfré

Coorientador: Dr. Guilherme Aris Parsekian

São Carlos
2019




UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

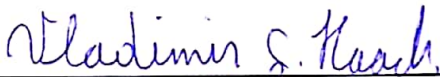
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

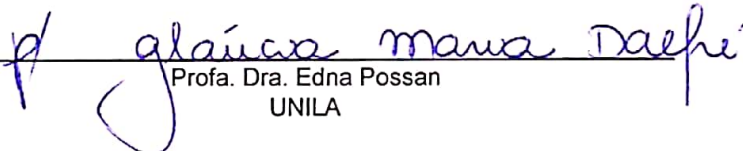
Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Douglas da Costa Ferreira, realizada em 29/04/2019:



Profa. Dra. Gláucia Maria Dalfré
UFSCar

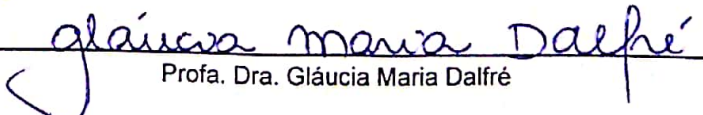


Prof. Dr. Vladimir Guilherme Haach
EESC/USP



Profa. Dra. Edna Possan
UNILA

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Edna Possan e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ão) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.



Profa. Dra. Gláucia Maria Dalfré

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS por minha vida, família e amigos.

Aos meus pais, Aloizio e Eunice, por estarem comigo em todos os momentos.

À Professora Doutora Gláucia Maria Dalfré e ao Professor Doutor Guilherme Aris Parsekian que muito me ajudaram e auxiliaram através de seu profundo conhecimento.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, em especial aos técnicos de laboratório José Roberto e Ricardo, e aos meus amigos Mariana, Gustavo Sipp e Matusalém.

O autor e a orientadora agradecem ao Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) do Departamento de Engenharia Civil (DECiv), ao Laboratório de Materiais e Componentes da Construção Civil (LMC) e ao Laboratório de Polímeros do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

RESUMO

FERREIRA, Douglas da Costa. Avaliação da degradação de vigas reforçadas com FRP quando expostas ao intemperismo. 2019. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

Face ao processo natural de envelhecimento das estruturas e, também, devido a exposição dos elementos reforçados externamente a ambientes agressivos (ciclos de gelo-degelo, temperatura, carbonatação, radiação ultravioleta, ciclos de umidade-secagem, dentre outros), pouco se sabe a respeito do comportamento e da durabilidade da ligação do sistema de reforço ao substrato de concreto e a possível perda de desempenho frente à degradação dos materiais intervenientes. Neste âmbito, o presente trabalho baseia-se na análise experimental do comportamento mecânico, em longo prazo, dos materiais constituintes do sistema de reforço e de vigas de concreto armado reforçadas a flexão com mantas de fibra de carbono (CFRP, *Carbon Fiber Reinforced Polymer*, em língua inglesa) aplicadas segundo a técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*, em língua inglesa) mantidas em ambiente laboratorial (interno e protegido) e expostas a intempéries (exposição exterior). Foram ensaiadas oito vigas de concreto armado com seção retangular, taxa de armadura longitudinal de 0,75% e concreto com resistência a compressão de 20 MPa. Dentre o conjunto de vigas, quatro foram utilizadas como referência, das quais duas não possuíam reforço e duas foram reforçadas com mantas de fibra de carbono do tipo unidirecional, e as demais foram divididas em dois grupos e expostas por seis meses em ambiente laboratorial e às intempéries. Essas vigas, com um vão livre entre os apoios de 230 cm, foram submetidas a ensaios de flexão em três pontos com aplicação de carga a meio vão. As mesmas foram dimensionadas para trabalhar no domínio dois de deformações. A análise do comportamento das vigas foi realizada com base nos resultados das cargas e modos de ruptura, deformação dos materiais intervenientes e propagação de fissuras. Os resultados experimentais também foram comparados com as estimativas prescritas pelas normas ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2014) e ACI 440.2R (2017). Para além, corpos de provas dos materiais constituintes do sistema de reforço também foram confeccionados e expostos nas mesmas condições ambientais das vigas. As propriedades mecânicas desses materiais foram avaliadas por meio de ensaios de tração uniaxial. Os resultados demonstraram que os adesivos epoxídicos de laminação, quando expostos às intempéries, apresentam reduções de até 70% em suas propriedades mecânicas enquanto o compósito de CFRP permanece com suas propriedades equivalentes após exposição. Para as vigas de concreto armado reforçadas foi verificado que o sistema de reforço proporciona incrementos de 50 e 28% na capacidade de carga e rigidez dos elementos reforçados, respectivamente. No entanto, os ensaios realizados após exposição às intempéries demonstraram ligeira redução no incremento da capacidade de carga. Em relação à comparação entre os resultados teóricos e experimentais, seguindo as premissas da ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2014) e ACI 440.2R (2017), notou-se valores de carga última e de serviço próximos ao desconsiderar as reduções das propriedades.

Palavras-chave: Vigas de concreto armado, reforço, CFRP, degradação ambiental, técnica EBR.

ABSTRACT

FERREIRA, Douglas da Costa. Evaluation of the degradation of strengthened beams with FRP when exposed to weathering. 2019. 137f. Thesis (Master Science in Civil Engineering) – Federal University of São Carlos, São Carlos, 2019.

Considering structures natural aging process and also considering externally strengthened elements exposure to aggressive environments (freeze-thaw cycles, temperature, carbonation, ultraviolet radiation, wet-dry cycles, among others), little is known about the behavior and durability of the strengthening system bonding to the concrete substrate and the possible performance loss due to degradation of the intervening materials. In this context, the present work is based on the experimental analysis of the long term mechanical behavior of the constituent materials of the reinforced concrete beams with carbon fiber sheets strengthening system (CFRP, Carbon Fiber Reinforced Polymer) applied according to the EBR (Externally Bonded Reinforcement) technique kept in laboratory environment (internal and protected) and exposed to weather (external exposure). Eight reinforced concrete beams with rectangular section, longitudinal reinforcement rate of 0.75% and concrete with compressive strength of 20 MPa, were tested. Among the set of beams, four were used as reference and two were strengthened with carbon fiber sheets, and the others were divided into two groups and exposed to six-months laboratory environment and six-months weather environment. These beams, with a distance between the supports of 230 cm, were submitted to three-points flexural testing with a midspan concentrated load. The beams were designed to behave in strain limits with tension controlled rupture. Beams behavior analysis was performed based on the results of the loads and modes of rupture, deformation of the intervening materials and cracks propagation. The experimental results were also compared with the estimates limits specific at ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2014) and ACI 440.2R (2017). In addition, specimens of the strengthening system materials constituents were also created and exposed to the same environmental conditions as the beams. The mechanical properties of these materials were investigated from uniaxial tensile testing. The results showed that lamination epoxy adhesives present reductions of up to 70% in their mechanical properties when exposed to the weather, while the CFRP composite showed similar properties before and after exposure. In the case of the strengthened reinforced concrete beams, it was verified that the strengthening system provides increases of 50% and 28% in the load capacity and stiffness, respectively, when compared to non-strengthened specimens. However, the tests performed after exposure to the elements showed a reduction in the increase of the load capacity. In relation to the comparison between the theoretical and experimental results, taking into account the specifications at ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2014) and ACI 440.2R (2017), it was observed that the values of ultimate load and service load are close when property reductions are not applied.

Key-words: Reinforced concrete beams, strengthening, CFRP, environmental degradation, EBR technique.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Relação força <i>versus</i> deformação do CFRP em vigas reforçadas	17
Figura 2: Modos de ruptura do compósito de FRP em vigas de concreto armado	19
Figura 3: Força <i>versus</i> deslocamento de vigas de concreto reforçadas à flexão.....	20
Figura 4: Equilíbrio de forças da seção reforçada.....	23
Figura 5: Mecanismos de degradação prejudiciais ao FRP.....	28
Figura 6: Diagrama tensão <i>versus</i> deformação dos corpos de prova de resina	30
Figura 7: (a) Corpo de prova de CFRP e (b) modo de ruptura dos laminados de GFRP	31
Figura 8: Diagrama tensão <i>versus</i> deformação das resinas epoxídicas.....	33
Figura 9: Diagrama força <i>versus</i> deslocamento das vigas reforçadas de referência e expostas a temperatura de 80°C.....	34
Figura 10: Descolagem prematura do sistema de reforço.....	35
Figura 11: Ambientes de exposição: (a) câmara isolada e protegida e (b) exposição a intempéries (ambiente externo).....	38
Figura 12: Armadura longitudinal e detalhes da seção transversal das vigas utilizadas no programa experimental. Dimensões em cm	40
Figura 13: Detalhes do sistema de reforço. Unidades em cm	41
Figura 14: (a) preparo das armaduras, (b) posicionamento das armaduras nas formas, (c) corpos de prova cilíndricos, (d) abatimento do tronco de cone, (e-f) lançamento do concreto, (g) regularização do concreto e (h-i) aspecto final dos corpos de prova	42
Figura 15: (a) lixamento para eliminação da nata de concreto, (b) limpeza com ar comprimido e (c) aplicação do primer.....	43
Figura 16: (a) corte da manta de fibra de carbono, (b) impregnação dos compósitos de CFRP e (c) aplicação do CFRP ao substrato de concreto.....	44
Figura 17: Ensaio de caracterização do concreto: (a) resistência à compressão e (b) determinação do módulo de elasticidade	45
Figura 18: Caracterização das barras de aço	46
Figura 19: (a) componentes, (b) pesagem dos componentes, (c) mistura manual, (d-e) molde de teflon antes e após o lançamento da resina e (f) corpos de prova de resina	47
Figura 20: Ensaio de tração uniaxial das resinas epoxídicas e aspecto dos corpos de prova antes e após o ensaio	48
Figura 21: (a) dimensões dos corpos de prova. Moldagem: (b) Limpeza da manta de fibra de carbono, (c) preparo da resina epoxídica, (d) laminação do compósito, (e) execução de reforço nas extremidades dos corpos de prova, (f) processo de cura e (g) aspecto final dos corpos de prova.....	49
Figura 22: (a) Corpo de prova de manta de CFRP – dimensões em mm e (b) ensaio de tração uniaxial e corpos de prova de CFRP com os respectivos modos de ruptura	50
Figura 23: Ambiente laboratorial: (a) vigas de referência reforçadas, (b) corpos de prova de concreto e (c) compósitos de CFRP.....	51
Figura 24: (a) área de exposição e (b) vigas de concreto reforçadas expostas à intempéries e (c) resinas e compósitos de CFRP expostos à intempéries.....	52
Figura 25: Classificação climática do estado de São Paulo pelo sistema.....	54
Figura 26: Carregamento e diagramas de momento fletor (DM) e esforço cortante (DV).....	55
Figura 27: Projeto da peça rígida de aço. Dimensões em mm	56
Figura 28: Vista lateral do dispositivo de ensaio	56
Figura 29: Detalhes da fixação da peça rígida de aço e aspecto final do dispositivo de ensaio	57
Figura 30: Instrumentação das vigas: (a) Deslocamento vertical, (b) concreto, (c) armadura longitudinal e (d) compósito de CFRP. Dimensões em cm.....	58
Figura 31: Detalhes da instrumentação do (a) concreto, (b) armadura longitudinal e (c) compósito de CFRP	59

Figura 32: Instrumentação para aferição do deslocamento do perfil metálico e rotação dos apoios	59
Figura 33: Detalhe do posicionamento dos transdutores de deslocamento.....	60
Figura 34: Local de realização dos testes de <i>pull-off</i>	60
Figura 35: (a) pacometria para demarcação da área, (b) preparação dos cortes, (c) limpeza da superfície, (d) colagem das pastilhas e (e) aparato de engate do equipamento de <i>pull-off</i>	61
Figura 36: (a) plataforma de prototipagem eletrônica, (b) sensor de temperatura e umidade do tipo DHT22 e (c) sensor em funcionamento.	63
Figura 37: Dados meteorológicos para a exposição às intempéries.....	66
Figura 38: Diagrama tensão <i>versus</i> deformação das barras de aço: (a) aço 5 mm CA-60 e (b) aço 10 mm CA-50.....	67
Figura 39: Comparação entre os diagramas de tensão média <i>versus</i> deformação da (a-b) resina A (<i>primer</i>), (c-d) resina B (laminação) e (e-f) compósitos de CFRP mantidos em ambiente laboratorial e expostos às intempéries.....	72
Figura 40: Relatório fotográfico das resinas epoxídicas e dos compósitos de CFRP: (a) 14 dias de cura, (b) 4 meses de exposição e (c) 8 meses de exposição	73
Figura 41: Teste de Tukey para tensão última e módulo de elasticidade da resina epoxídica do tipo <i>primer</i> : (a-b) ambiente laboratorial e (c-d) exposição às intempéries.....	74
Figura 42: Teste de Tukey para tensão última e módulo de elasticidade da resina epoxídica de laminação: (a-b) ambiente laboratorial e (c-d) exposição às intempéries	75
Figura 43: Teste de Tukey para tensão última e módulo de elasticidade dos compósitos de CFRP: (a-b) ambiente laboratorial e (c-d) exposição às intempéries.....	78
Figura 44: Força <i>versus</i> deslocamento vertical das vigas de referência sem reforço	80
Figura 45: Força <i>versus</i> deformação na armadura longitudinal das vigas de referência sem reforço.....	80
Figura 46: Força <i>versus</i> deformação no concreto das vigas de referência sem reforço	81
Figura 47: Força <i>versus</i> deslocamento vertical das vigas de referência reforçadas.....	81
Figura 48: Força <i>versus</i> deformação na armadura longitudinal das vigas de referência reforçadas.....	82
Figura 49: Força <i>versus</i> deformação no concreto das vigas de referência reforçadas.....	82
Figura 50: Força <i>versus</i> deformação máxima do compósito de CFRP das vigas de referência reforçadas	82
Figura 51: Força <i>versus</i> deslocamento vertical das vigas reforçadas expostas em ambiente laboratorial	83
Figura 52: Força <i>versus</i> deformação na armadura longitudinal das vigas reforçadas expostas em ambiente laboratorial.....	83
Figura 53: Força <i>versus</i> deformação no concreto das vigas reforçadas expostas em ambiente laboratorial.....	84
Figura 54: Força <i>versus</i> deformação máxima do compósito de CFRP das vigas reforçadas expostas em ambiente laboratorial.....	84
Figura 55: Força <i>versus</i> deslocamento vertical das vigas reforçadas expostas às intempéries	85
Figura 56: Força <i>versus</i> deformação na armadura longitudinal das vigas reforçadas expostas às intempéries.....	85
Figura 57: Força <i>versus</i> deformação máxima do compósito de CFRP das vigas reforçadas expostas às intempéries.....	85
Figura 58: Fissuração final das vigas ensaiadas.....	88
Figura 59: Modo de ruína típico das vigas reforçadas ensaiadas.....	89
Figura 60: Força <i>versus</i> deslocamento das vigas de referência sem reforço e reforçadas ..	90
Figura 61: Comparação entre as curvas força <i>versus</i> deslocamento das vigas de referência e expostas aos ambientes: (a) laboratorial e (b) intempéries	91
Figura 62: Detalhe da interface concreto/adeseivo/CFRP após os ensaios. (a) viga de referência reforçada e (b) viga reforçada exposta às intempéries.	93

Figura 63: Ruptura típica verificada nos ensaios de arrancamento: (a) antes e (b) após os ensaios de arrancamento, (c-f) ruptura típica do concreto.....	94
Figura 64: Fluxograma de cálculo do máximo momento resistente de uma viga reforçada a flexão	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fator de redução ambiental para os diferentes tipos de FRP e condições ambientais.....	21
Tabela 2: Carga de serviço e tensão cíclica limite para o reforço FRP.	26
Tabela 3: Resultado da degradação dos corpos de prova de resina epoxídica.....	30
Tabela 4: Resultados da degradação dos corpos de prova de CFRP e GFRP	32
Tabela 5: Propriedades mecânicas das resinas após exposição a radiação UV	36
Tabela 6: Programa de ensaios dos corpos de prova de concreto.....	39
Tabela 7: Programa de ensaios das vigas de concreto armado.....	39
Tabela 8: Programa de ensaios dos materiais constituintes do sistema de reforço.....	39
Tabela 9: Classificação climática segundo Köppen-Geiger.....	53
Tabela 10: Propriedades mecânicas do concreto	67
Tabela 11: Resumo das propriedades mecânicas do aço utilizado.....	68
Tabela 12: Resumo das propriedades mecânicas das resinas epoxídicas (Resina A e Resina B) e dos compósitos de CFRP expostos em ambiente laboratorial e às intempéries ...	71
Tabela 13: Resumo dos resultados obtidos nos ensaios das vigas.....	87
Tabela 14: Resumo dos resultados médias obtidos nos ensaios das vigas	89
Tabela 15: Resultados obtidos no ensaio de <i>pull-off</i>	94
Tabela 16: Parâmetros para determinação da capacidade portante das vigas	97
Tabela 17: Resultados do programa experimental das vigas de referência	98
Tabela 18: Resultados da análise teórica das vigas de referência	98
Tabela 19: Resultados do programa experimental das vigas expostas aos ambientes	99
Tabela 20: Resultados da análise teórica das vigas expostas aos ambientes	99

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.1.1 Geral	14
1.1.2 Específicos.....	14
1.2 JUSTIFICATIVA.....	15
1.3 METODOLOGIA	15
1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	16
2. ESTADO DA ARTE	17
2.1 REFORÇO A FLEXÃO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO	17
2.1.1 Modos de ruptura	18
2.1.2 Recomendações da ACI 440.2R (2017)	20
2.1.3 Estado limite último da seção reforçada	23
2.1.4 Tensão no aço e no FRP devido as cargas de serviço	26
2.2 DURABILIDADE E MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO	27
2.2.1 Durabilidade dos compósitos de FRP	27
2.2.2 Mecanismos de degradação.....	28
2.2.3 Umidade e soluções salinas	29
2.2.4 Temperatura elevada.....	32
2.2.5 Radiação ultravioleta (ambiente externo).....	35
3. METODOLOGIA	37
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL	37
3.1.1 Dimensionamento das vigas e do sistema de reforço	40
3.1.2 Preparação das vigas.....	41
3.1.3 Reforço das vigas segundo a técnica EBR	43
3.1.4 Caracterização do concreto	44
3.1.5 Caracterização do aço.....	46
3.1.6 Caracterização das resinas epoxídicas	46
3.1.7 Caracterização dos compósitos de CFRP	48
3.1.8 Degradação natural	50
3.1.9 Caracterização do ambiente – Classificação climática de Köpper-Geiger.....	52
3.2 METODOLOGIA DE ENSAIOS DAS VIGAS	54
3.3 INSTRUMENTAÇÃO	57
3.4 ENSAIOS DE PULL-OFF (ARRANCAMENTO).....	60
3.5 MONITORIZAÇÃO DA TEMPERATURA, UMIDADE E RADIAÇÃO	62
3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	63
4. RESULTADOS E ANÁLISES	65
4.1 DADOS METEOROLÓGICOS	65
4.2 MATERIAIS	66
4.2.1 Concreto.....	66
4.2.2 Aço	67
4.2.3 Materiais constituintes do sistema de reforço	68
4.2.4 Discussão dos resultados.....	74
4.3 COMPORTAMENTO DAS VIGAS DE CONCRETO ARMADO	79

4.3.1	Vigas de referência sem reforço (V_REF_0)	80
4.3.2	Vigas de referência reforçadas (V_REF_CFRP).....	81
4.3.3	Vigas reforçadas mantidas em ambiente laboratorial (V_LAB_CFRP).....	83
4.3.4	Vigas reforçadas expostas às intempéries (V_WEA_CFRP)	84
4.3.5	Discussão dos resultados.....	86
4.4	ANÁLISE GERAL DAS VIGAS ENSAIADAS	89
4.4.1	Análise da degradação do sistema de reforço	92
4.5	ENSAIOS DE <i>PULL-OFF</i> (ARRANCAMENTO).....	93
4.6	COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS ..	95
5.	CONCLUSÕES.....	101
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	104
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, questões voltadas para a durabilidade de estruturas, envolvendo conceitos relativos a manutenção, reforço e reparo, estão cada vez mais comuns. A ação do intemperismo, a ausência de inspeção regular, a falta de manutenções preventivas, os erros de projeto e de construção, a imposição de normas e códigos de dimensionamento com disposições mais severas são algumas das causas que contribuem constantemente para o aumento das questões voltadas para o reforço e recuperação de estruturas. Além do mais, as estruturas de concreto armado estão sujeitas a diversos tipos de danos estruturais que implicam na necessidade de algum tipo de reforço. Erros na concepção e interpretação de projetos, falhas construtivas, alterações no tipo de utilização das estruturas impondo cargas acidentais mais elevadas, maiores volumes de tráfego em pontes ou mesmo a introdução de códigos de dimensionamento com disposições mais severas são alguns dos principais motivos que levam um elemento estrutural a ser reforçado (FERRARI e HANAI, 2012).

Nesse sentido, diversos pesquisadores em vários centros de investigação (COELHO *et al.*, 2011; KHAN e FAREED, 2014; CORREIA *et al.*, 2015; REZAZADEH, BARROS e RAMEZANSEFAT, 2016; DALFRÉ, 2013) têm realizado estudos buscando inserir novos materiais, técnicas e tecnologias em meio a indústria da construção civil para obtenção de estruturas mais eficientes e seguras.

Dentre o desenvolvimento de novos materiais, um maior destaque foi dado à utilização de Polímeros Reforçados com Fibras (PRF ou FRP, *Fiber Reinforced Polymer*, em língua inglesa) que podem substituir, com vantagens técnicas e econômicas, os materiais convencionais utilizados nas técnicas tradicionais de reforço estrutural (DALFRÉ, 2013). Segundo Fernandes (2016), os compósitos de FRP estão sendo cada vez mais utilizados para reforço de estruturas, sejam elas de concreto armado, aço, alvenaria ou madeira. Tal afirmação se deve ao fato de que esses materiais possuem excelentes propriedades mecânicas, onde se destacam a alta resistência e módulo de elasticidade (OBAIDAT *et al.*, 2010).

Os compósitos de FRP são materiais contínuos formados por dois componentes: as fibras (responsável por proporcionar resistência e rigidez) e a matriz polimérica (constituída por resina, responsável por ligar as fibras entre si e protegê-las dos agentes agressores ambientais) (MACHADO e MACHADO, 2015). De acordo com Al-Jelawy (2009) as fibras mais comuns utilizadas nos FRP são as de vidro, aramida e carbono, sendo seus respectivos

compósitos denominados GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymers*, em língua inglesa), AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymers*, em língua inglesa) e CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*, em língua inglesa). Dentre os três compósitos citados, o de fibra de carbono é o mais utilizado em meio às intervenções de reforço, além disso, apresenta-se como sendo o material com as melhores propriedades quando comparado aos compósitos de fibra de vidro e aramida, possuindo como principais vantagens a resistência a ação de agentes químicos e a imunidade à corrosão (LONG *et al.*, 2012).

Entre as técnicas de aplicação dos compósitos de FRP, duas possuem um maior destaque. A primeira, conhecida como técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*, em língua inglesa), baseia-se na colagem externa do compósito de FRP ao substrato do elemento a reforçar (CORREIA *et al.*, 2015). Trata-se de uma técnica bastante fundamentada em diversos estudos científicos e capaz de proporcionar incrementos na resistência a flexão de vigas, a partir da colagem do reforço na face tracionada, e/ou ao cisalhamento, por meio da aplicação do reforço nas faces laterais das vigas (JUVANDES, 2011). A técnica EBR possibilita também o reforço de pilares, por meio do confinamento da seção. A segunda técnica é mais recente e surgiu como alternativa a algumas deficiências da técnica EBR. Conhecida como técnica NSM (*Near Surface Mounted*, em língua inglesa), ela baseia-se na inserção de laminados ou barras no concreto de cobertura do elemento a reforçar, podendo ser usada tanto no reforço a flexão quanto ao cisalhamento. Em comparação com a técnica EBR, ela apresenta algumas vantagens como menor quantidade de trabalho para preparação da superfície e a inexistência de preocupação com irregularidades e imperfeições presentes no substrato, uma vez que a preparação da camada superficial de concreto deixa de ser necessária (COELHO *et al.*, 2011; COELHO, SENA-CRUZ e NEVES, 2015; EL-HACHA E RIZKALLA, 2004).

Dentre as duas principais tecnologias de aplicação dos compósitos de FRP, a EBR é a mais recorrente em meio às obras de reforço. Nesta técnica a aplicação das mantas ou dos laminados é realizada com o auxílio de um adesivo a base de epóxi, o qual proporciona aderência entre o material de reforço e o substrato de concreto. Este adesivo apresenta-se em forma bicomponente e, quando misturado, permanece viscoso em um curto período de tempo (dependendo de seu *pot-life*). Após a cura, endurece e se solidifica, alcançando boas propriedades mecânicas (SOUZA e RIPPER, 2009).

No que diz respeito aos códigos e normas que abrangem modelos analíticos de reforço estrutural, a literatura internacional possui algumas das principais recomendações para o uso dos compósitos de FRP em projetos estruturais. Nos Estados Unidos, a aplicação de materiais compósitos para reforço estrutural é descrita na ACI 440.2R (2017) (*American Concrete Institute*), onde se destaca o “*Guide for the design and construction of*

externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures". No Japão o uso de materiais compósitos é descrito pela JSCE (2001) (*Japan Society of Civil Engineers*), mais especificadamente a "*Recommendation for Upgrading of Concrete Structures with Use of CFRP Sheet*". Já na Europa, a FIB Bulletin 14 (2001) (*International Federation for Structural Concrete*) traz um guia para reforço de estruturas de concreto por meio da colagem externa de reforço com material compósito (*Bulletin 14 – Externally Bonded FRP Reinforcement for Structures*).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 GERAL

Avaliar a durabilidade e o comportamento mecânico, em longo prazo, dos materiais constituintes do sistema de reforço e vigas de concreto armado reforçadas à flexão com mantas de fibra de carbono (CFRP), aplicadas segundo a técnica EBR mantidas em ambiente laboratorial (interno e protegido) e expostas a intempéries (exposição exterior).

1.1.2 ESPECÍFICOS

Diante do objetivo geral, o presente trabalho tem como objetivos específicos:

- Analisar por meio de ensaios de tração uniaxial a durabilidade e o comportamento dos materiais constituintes do sistema de reforço frente a exposição a intempéries;
- Avaliar por meio de ensaios *pull-off* (arrancamento) a influência da exposição a intempéries na degradação da aderência do conjunto concreto/adesivo/CFRP das vigas expostas via ensaio de arrancamento;
- Criar um banco de dados com resultados de degradação dos materiais e dos elementos reforçados frente ao tipo de exposição a partir dos resultados desta pesquisa; e
- Avaliar os parâmetros de dimensionamento existentes nas recomendações internacionais, que levam em conta os efeitos da degradação dos materiais estudados, no dimensionamento de estruturas reforçadas com mantas de CFRP aplicados segundo a técnica EBR, com os resultados experimentalmente obtidos.

1.2 JUSTIFICATIVA

A utilização das técnicas de reforço, principalmente a EBR, vem ganhando espaço entre os profissionais na área da construção civil. Por se tratar de uma prática simples, seu desempenho depende basicamente da qualidade de aderência entre o material de reforço e o substrato de concreto. Embora seja um tema em ascensão, com grande número de publicações e investigações realizadas, muitas questões ainda se encontram sem resposta, necessitando de mais investigações nesses domínios.

Segundo Karbhari (2007) e Gangarao, Taly e Vijay (2007), os materiais compósitos utilizados na construção civil podem ficar expostos a diversos agentes agressivos e a determinação dos efeitos da agressividade ambiental na aderência do conjunto concreto/adesivo/FRP, principalmente durante períodos prolongados, é de extrema importância (ACI 440.9R, 2015).

Sendo assim, devido à crescente utilização dos compósitos de CFRP aplicados em elementos estruturais de concreto armado segundo a técnica de reforço EBR e levando em consideração que os mesmos podem estar vulneráveis a agressividade ambiental, juntamente com o concreto, surge à necessidade do conhecimento detalhado de seu desempenho em longo prazo, durabilidade e vida útil de projeto frente a condições ambientais agressivas, tais como ciclos de umidade, ciclos salinos, ciclos térmicos, intempéries, dentre outros.

1.3 METODOLOGIA

No desenvolvimento do presente trabalho a metodologia empregada consistiu no levantamento da bibliografia mais recente e relevante sobre o tema e na execução do ensaio de um conjunto de 12 vigas de concreto armado. Dentre o conjunto de vigas, quatro foram utilizadas como referência, das quais duas não possuíam nenhum tipo de reforço e duas foram reforçadas com uma camada de manta de CFRP aplicada segundo a técnica EBR. As demais vigas foram divididas em dois grupos e expostas as seguintes condições ambientais: intempéries (ambiente externo) e ambiente laboratorial (interno e protegido).

Os resultados dos ensaios foram analisados com base na eficiência do sistema de reforço ao longo do tempo de exposição, aumento da capacidade de carga e rigidez das vigas, propagação das fissuras, deslocamentos verticais, deformações dos materiais intervenientes e modos de ruptura.

As vigas de concreto armado utilizadas foram de seção retangular, com uma taxa de armadura longitudinal de 0,75% e concreto com resistência a compressão (f_{ck}) de 20 MPa.

Para evitar a ruptura por cisalhamento, os estribos foram superdimensionados. As vigas biapoiadas possuíam as mesmas dimensões e foram submetidas a ensaios de flexão em três pontos com um carregamento aplicado simetricamente a meio vão das vigas.

A manta de fibra de carbono utilizada no reforço foi do tipo unidirecional, a qual foi cortada de modo que suas dimensões se adequassem a superfície tracionada das vigas. As mesmas foram coladas externamente, por meio dos procedimentos de aplicação da técnica EBR. Todas as vigas foram reforçadas com uma camada de manta de CFRP.

Para além, corpos de prova dos materiais intervenientes do sistema de reforço, especificamente resina epoxídica e compósito de CFRP também foram confeccionados e expostos nas mesmas condições ambientais das vigas, a fim de avaliar sua possível degradação. As propriedades mecânicas dos corpos de provas de resina epoxídica e compósito de CFRP foram determinadas por meio de ensaios de tração uniaxial.

1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

O trabalho está organizado em seis capítulos. Neste, são apresentados a introdução ao tema proposto, os objetivos gerais e específicos, a justificativa de escolha do tema, metodologia e a organização do trabalho.

No segundo capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre a durabilidade e os mecanismos de degradação dos materiais compósitos de FRP utilizados nos sistemas de reforço.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia utilizada para avaliação do comportamento e durabilidade das vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP e dos materiais intervenientes, baseada em programa experimental.

O quarto capítulo apresenta os resultados e as análises dos ensaios de tração uniaxial, realizados nos corpos de resina epoxídica, compósitos de CFRP e armaduras de aço, compressão e módulo, realizados nos corpos de prova de concreto, e de flexão em três pontos, realizados nas vigas de concreto armado, sem e com reforço, além de uma comparação entre os resultados teóricos e experimentais das vigas ensaiadas, o qual seguiu as premissas da ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2014) e ACI 440.2R (2017).

No quinto capítulo são apresentadas as principais conclusões alcançadas por meio do presente programa experimental.

Por fim, o sexto capítulo é dedicado às referências bibliográficas.

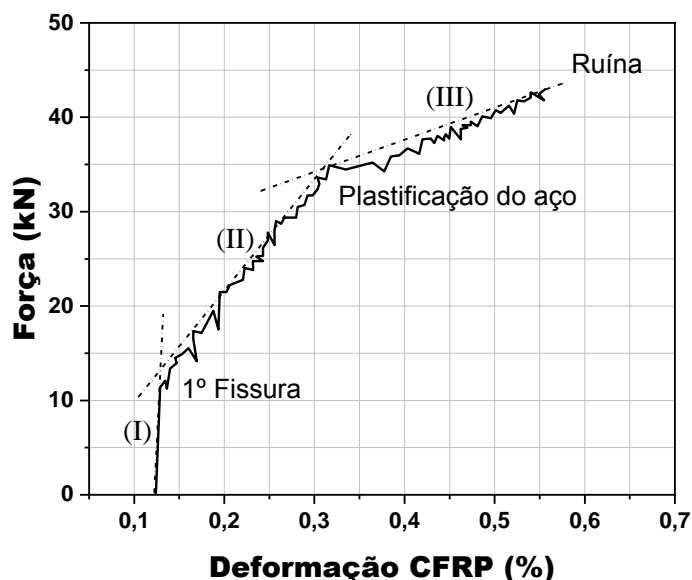
2. ESTADO DA ARTE

No desenvolvimento deste capítulo serão apresentados alguns conceitos e aspectos sobre reforço a flexão em vigas de concreto armado e a durabilidade e mecanismos de degradação do sistema de reforço com materiais compósitos de FRP.

2.1 REFORÇO A FLEXÃO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Estudos a respeito do comportamento de vigas reforçadas a flexão foram inicialmente conduzidos por Meier e Kaiser (1991)¹. Os autores validaram um método da compatibilização das deformações da seção reforçada e ainda desenvolveram um modelo analítico para análise da zona de ancoragem do compósito. Já a partir das primeiras contribuições experimentais foi possível caracterizar o comportamento geral das vigas de concreto armado reforçadas à flexão. Segundo Meier e Kaiser¹ (1991 *apud* Juvandes, 1999), as vigas de concreto armado reforçadas apresentam três estádios diferentes de comportamento (Figura 1).

Figura 1: Relação força versus deformação do CFRP em vigas reforçadas



Fonte: Adaptado de Meier e Kaiser¹ (1991 *apud* Juvandes 1999)

¹ MEIER, U.; KAISER, H. P. Strengthening of structures with CFRP laminates. In: Proceedings of the speciality conf. on advanced composites materials in civil engineering structures, 1991, Las Vegas. *Anais...* Las Vegas: Janeiro-Fevereiro, p. 224-232.

O primeiro (*Estádio I*) corresponde ao comportamento elástico da estrutura, com o concreto ainda não fissurado. O segundo (*Estádio II*) é caracterizado pela fissuração do concreto e pelo comportamento elástico das armaduras de aço. O último estágio (*Estádio III*) corresponde ao início do regime plástico das armaduras até a ruína por tração do FRP, esmagamento do concreto ou destacamento do FRP aderido ao substrato de concreto.

Outro fator atuante no comportamento das vigas de concreto armado reforçadas à flexão está associado à ductilidade dos elementos. À medida que se aumenta a porcentagem de reforço as deformações no elemento diminuem e a capacidade de carga aumenta, elevando ligeiramente a rigidez do elemento reforçado. Além disso, a carga de início de abertura de fissuras também é afetada. Verifica-se que as principais contribuições do sistema de reforço às vigas de concreto armado ocorrem após a plastificação do aço, ou seja, o sistema de reforço passa a ser mais efetivo quando a armadura longitudinal inicia seu patamar de escoamento (DIAS, BARROS e AZEVEDO, 2012).

Segundo Azevedo (2008), para um melhor entendimento do comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão é necessário abordar os mecanismos de ruptura dos elementos reforçados, tanto para estabelecer critérios de dimensionamento quanto para realizar verificações de segurança em procedimentos analíticos.

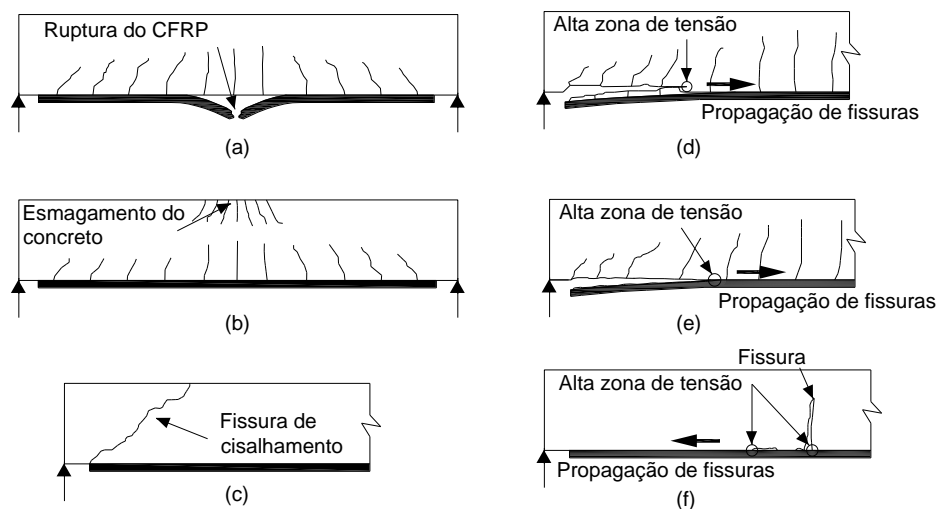
2.1.1 MODOS DE RUPTURA

Com o aumento da porcentagem de reforço a resistência do elemento estrutural também aumenta. Porém, essa relação é linear desde que não ocorram modos de ruptura prematuros. A aplicação dos sistemas de reforço só é efetiva e viável desde que os critérios de falha/ruptura das peças reforçadas sejam estabelecidos. A ruptura dos elementos reforçados, geralmente, ocorre de maneira frágil, por destacamento do concreto de cobertura, descolagem ou ruptura do CFRP, esmagamento do concreto comprimido ou mesmo por cisalhamento, podendo acontecer em diferentes níveis de aplicação de carga (BUYUKOZTURK e HEARING, 1998)

No caso de vigas de concreto armado reforçadas externamente à flexão, quanto menor forem as taxas de armadura e reforço, maior a probabilidade da ruptura ocorrer por escoamento da armadura de aço juntamente com a ruptura do FRP. Por outro lado, se essas taxas forem elevadas, o modo de ruína será governado pelo esmagamento do concreto, com o aço escoando ou não. Existem também os casos em que há a descolagem do sistema de reforço devido à propagação de fissuras no adesivo ou mesmo por meio do arrancamento da camada de concreto de cobertura (TRIANAFILLOU e PLEVRIS, 1992).

Os modos de ruptura observados nas vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de FRP (Figura 2) podem ocorrer de diferentes maneiras: ruptura do compósito de FRP (Figura 2a), esmagamento do concreto à compressão, (Figura 2b), cisalhamento (Figura 2c), destacamento do concreto de cobertura (Figura 2d), descolagem do FRP do substrato de concreto (Figura 2e) e destacamento do FRP devido à propagação das fissuras de tração e, portanto, perda de aderência entre o sistema de reforço e o substrato de concreto (Figura 2f).

Figura 2: Modos de ruptura do compósito de FRP em vigas de concreto armado

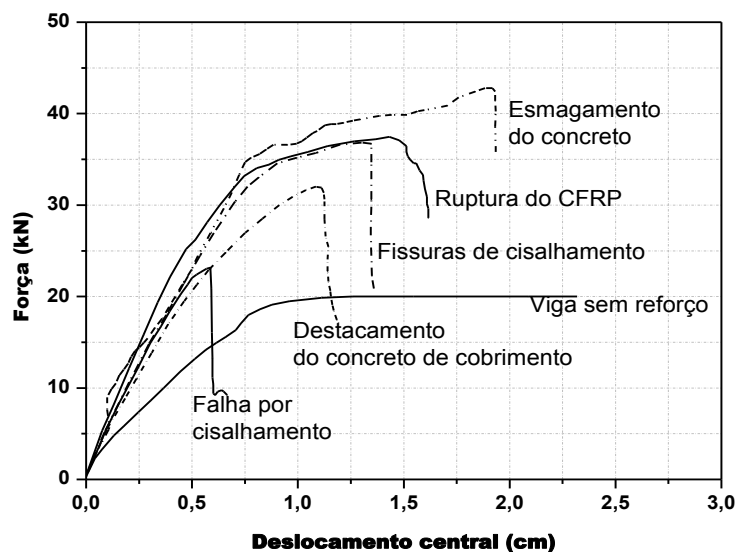


Fonte: Adaptado de Teng *et al.* (2003)

De acordo com Buyukozturk e Hearing (1998), os diferentes modos de ruptura afetam diretamente a eficiência do sistema de reforço externo à flexão. Na Figura 3 é possível observar que a ruptura devido ao cisalhamento (ver também Figura 2c) é a mais crítica e ocorre prematuramente, sem a necessidade de um grande incremento de carga do elemento. Segundo Azevedo (2008), este modo prematuro de ruína ocorre porque o sistema de reforço à flexão pode ocasionar um aumento nos esforços transversais da viga, a qual nem sempre está dimensionada para suportar este aumento de forças cortantes.

Devido aos vários modos de ruína presentes, alguns autores (WU e HUANG, 2008; COELHO *et al.*, 2011) têm pesquisado técnicas para evitar falhas prematuras por descolagem e/ou destacamento do sistema de reforço. Diferentes tipos de mecanismos de ancoragem já foram analisados, tais como fixadores de aço chumbados ao concreto ou mesmo a própria manta de FRP em formato de “U” colada nas extremidades do reforço à flexão. Esses mecanismos têm-se mostrado eficientes no aumento da capacidade de carga de vigas reforçadas, além disso, evitando a ocorrência de falhas prematura do sistema de reforço.

Figura 3: Força versus deslocamento de vigas de concreto reforçadas à flexão



Fonte: Adaptado de Buyukozturk e Hearing (1998)

A aplicação desses mecanismos de ancoragem causa uma mudança nos modos de ruptura das vigas reforçadas. A falha do sistema de reforço, que antes era governada pelo desprendimento do compósito de FRP, passa a ocorrer pela ruptura do mesmo. Os estudos realizados por Wu e Huang (2008) e Coelho *et al.* (2011) concluíram que a adição desses mecanismos de ancoragem oferece um maior nível de aproveitamento do sistema de reforço e um aumento na capacidade de carga dos elementos reforçados em função da resistência à tração última do compósito de FRP ser integralmente aproveitada.

2.1.2 RECOMENDAÇÕES DA ACI 440.2R (2017)

As recomendações da norma americana ACI 440.2R (2017) para reforço à flexão com o uso da técnica EBR são baseadas no princípio dos estados limites, devendo atender aos estados limites de serviço (ELS) e os estados limites últimos (ELU). Segundo o código, deve-se levar em conta no dimensionamento do sistema de reforço os modos de ruptura dos elementos no ELU. Os cinco modos de ruptura definidos pela norma são apresentados a seguir:

- Esmagamento do concreto à compressão previamente ao escoamento da armadura de aço;
- Escoamento do aço tracionado e posterior ruptura do FRP;
- Escoamento do aço tracionado, seguido do esmagamento do concreto;
- Destacamento do concreto de cobertura; e
- Descolagem do FRP do substrato de concreto.

O dimensionamento do reforço à flexão segundo a norma ACI 440.2R (2017) é baseado em premissas de cálculo: (a) os cálculos são baseados nas dimensões, arranjo interno das armaduras de aço e propriedades dos materiais do elemento a reforçar; (b) as deformações presentes no aço e no concreto são diretamente proporcionais à distância da linha neutra, seções planas antes do carregamento permanecem planas após o carregamento; (c) não há escorregamento entre o reforço externo e o substrato de concreto, caracterizando uma aderência perfeita; (d) a deformação de cisalhamento da camada de adesivo é desconsiderada devido a mesma ser muito fina com pouca variação de espessura; (e) a deformação máxima permitida no concreto comprimido é de 0,003; (vi) a resistência à tração do concreto é desconsiderada; e (vi) o material de reforço FRP possui um comportamento elástico-linear até sua ruptura.

Em relação aos materiais intervenientes, a norma ACI 440.2R (2017) estabelece que a ação ambiental deve ser considerada nas propriedades iniciais dos FRP devido à possibilidade da exposição aos diversos tipos de ambientes levar a degradação e redução das propriedades de tração, deformação última e resistência à fadiga dos materiais compósitos. Assim, para o dimensionamento, os materiais sofrem uma redução em suas propriedades (tensão de tração máxima de projeto e deformação última fornecida pelo fabricante) de acordo com o tipo de exposição por meio dos fatores de redução ambiental (C_E), os quais são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Fator de redução ambiental para os diferentes tipos de FRP e condições ambientais

Condição de Exposição	Tipo de Fibra	C_E
Exposição a ambientes internos	Carbono	0,95
	Vidro	0,75
	Aramida	0,85
Exposição a ambientes externos	Carbono	0,85
	Vidro	0,65
	Aramida	0,75
Exposição a ambientes agressivos	Carbono	0,85
	Vidro	0,50
	Aramida	0,70

Fonte: ACI 440.2R (2017)

Quanto maior a agressividade do ambiente o qual o compósito de FRP está inserido, maior é o coeficiente de redução (C_E) (ver Tabela 1). A utilização do C_E torna-se necessário uma vez que alguns compósitos de FRP são suscetíveis a ambientes úmidos,

ambientes alcalinos, raios ultravioleta (UV) e altas temperaturas. O valor do C_E ainda pode variar de acordo com o tipo de fibra utilizada no sistema compósito.

A Equação 1 apresenta a determinação da tensão de tração máxima de projeto do compósito de FRP (f_{fu}), a qual depende do coeficiente de redução ambiental (C_E), apresentado na Tabela 1, e da tensão de tração fornecida pelo fabricante do FRP ou obtida por meio de ensaios experimentais (f_{fu}^*).

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^* \quad (1)$$

Similarmente à Equação 1, a deformação máxima de projeto (ε_{fu}) é determinada por meio da Equação 2, em que C_E é o coeficiente de redução ambiental e ε_{fu}^* é a deformação fornecida pelo fabricante ou obtida por meio de ensaios.

$$\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon_{fu}^* \quad (2)$$

Devido os compósitos de FRP apresentarem comportamento linear até sua falha, o módulo de elasticidade de projeto (E_f) pode ser determinado pela Lei de Hooke, como mostra a Equação 3.

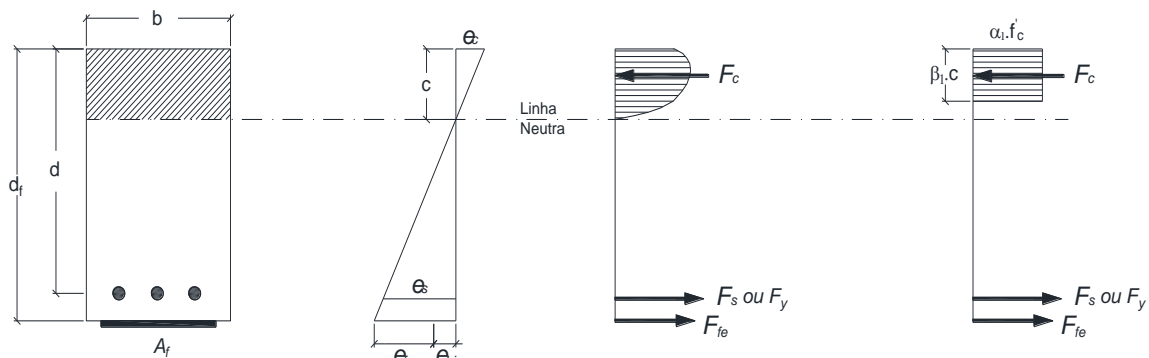
$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}} \quad (3)$$

É importante observar que o coeficiente de redução (C_E) faz a redução apenas da tensão de tração máxima e da deformação última do compósito de FRP e não do módulo de elasticidade, uma vez que a Lei de Hooke utilizada para determinação do módulo de elasticidade trata-se de uma divisão, em que o C_E utilizado para minoração das propriedades mecânicas é anulado. No entanto, de acordo os ensaios de caracterização encontrados na literatura, o módulo de elasticidade do FRP possui alteração quando comparado aos valores fornecidos pelos fabricantes.

2.1.3 ESTADO LIMITE ÚLTIMO DA SEÇÃO REFORÇADA

O equilíbrio de forças de uma seção retangular reforçada externamente com mantas de FRP é apresentado na Figura 4, onde d_f é a profundidade efetiva do reforço a flexão, d é a altura útil da seção, b é a largura da seção, A_f é a área da seção transversal da fibra de carbono, c a posição inicial da linha neutra, ε_c é o nível de deformação no concreto, ε_s é o nível de deformação na armadura de aço, ε_{fe} é a deformação efetiva de ruptura do FRP, ε_{bi} é a deformação pré-existente no concreto no momento da instalação do reforço, F_s é a força resultante na armadura tracionada, F_{fe} é a força resultante na fibra de carbono tracionada, F_c é a força resultante do concreto à compressão, β_1 é razão de profundidade do bloco retangular das tensões de compressão, a_1 é um parâmetro definido para seção retangular de blocos de concreto à compressão e f'_c é a resistência característica do concreto.

Figura 4: Equilíbrio de forças da seção reforçada.



Fonte: ACI 440.2R (2017)

A recomendação ACI 440.2R (2017) apresenta as formulações indicadas para o cálculo do máximo momento resistente de uma viga reforçada com a técnica EBR (Equações 4 à 16). Para se evitar que o modo de ruptura ocorra pela propagação de fissuras, tanto na flexão quanto no cisalhamento (ver Figura 2f), a norma estabelece uma deformação máxima permitida para o FRP tal como apresenta a Equação 4, em que ε_{fd} é a deformação máxima permitida, f'_c é a resistência característica do concreto, n é o número de camadas de CFRP e t_f é a espessura. Neste caso, considera-se que a ruptura ocorra pelo destacamento do material de reforço.

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{f_c'}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0,9 \cdot \varepsilon_{fu} \quad (4)$$

Na sequência de cálculo, o código ACI 440.2R (2017) determina que seja arbitrada uma posição inicial da linha neutra (c) a fim de se determinar a deformação efetiva (ε_{fe}) e a tensão de ruptura do FRP (f_{fe}). Esta deformação efetiva e tensão de ruptura são encontradas por intermédio das Equações 5 e 6, onde ε_{cu} é a deformação última do concreto.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (5)$$

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \quad (6)$$

Assim, a deformação e a tensão na armadura longitudinal, além da deformação no concreto, são determinadas por meio das Equações 7 a 9, onde f_s tensão na armadura longitudinal, E_s é o módulo de elasticidade do aço, ε_s é o nível de deformação na armadura de aço e f_{yd} é a tensão de dimensionamento do aço.

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right) \quad (7)$$

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \leq f_{yd} \quad (8)$$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{c}{d_f - c} \right) \quad (9)$$

Com os níveis de tensão e deformação no FRP e na armadura longitudinal definidos, a norma ACI 440.2R (2017) estabelece que o equilíbrio interno da seção deve ser encontrado por intermédio das Equações 10 a 13, em que ε_c' é a deformação máxima do concreto, E_c é o módulo de elasticidade do concreto e A_s é a área de aço da seção.

$$\varepsilon'_c = \frac{1,71 \cdot f'_c}{E_c} \quad (10)$$

$$\beta_1 = \frac{4 \cdot \varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6 \cdot \varepsilon'_c - 2 \cdot \varepsilon_c} \quad (11)$$

$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot \varepsilon'_c \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 \cdot \beta_1 \cdot \varepsilon_c'^2} \quad (12)$$

$$c = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot b} \quad (13)$$

Por fim, após a posição da linha neutra (c) atender simultaneamente as Equações 5 a 13, o momento resistente (M_n) do elemento reforçado é encontrado com o uso da Equação 14, onde ψ_f é o fator de redução (0,85) baseado em análises de confiabilidade de elementos reforçado a flexão e F_f é a força resultante na fibra de FRP tracionada. Posteriormente, a ACI 440.2R (2017) estabelece que o momento resistente deve ser multiplicado pelo fator de redução (ϕ) da Equação 15 devido aos limites de ductilidade de elementos reforçados com a técnica EBR. Finalmente, por intermédio da Equação 16, encontra-se o momento resistente de cálculo (M_u).

$$M_n = F_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \Psi_f \cdot F_f \cdot \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \quad (14)$$

$$\phi = \begin{cases} 0,90 & \text{para } \varepsilon_s \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25 \cdot (\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0,005 - \varepsilon_{sy}} & \text{para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0,005 \\ 0,65 & \text{para } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (15)$$

$$M_u = \phi \cdot M_n \quad (16)$$

2.1.4 TENSÃO NO AÇO E NO FRP DEVIDO AS CARGAS DE SERVIÇO

Segundo as recomendações da ACI 440.2R (2017) deve-se, também, verificar os níveis de tensão no aço e no reforço com FRPs. Tal verificação é realizada de modo a evitar deformações inelásticas no aço e possíveis rupturas por fadiga e carregamento cíclico no material de reforço.

A tensão no aço sob as cargas de serviço ($f_{s,s}$) é determinada de acordo com a Equação 17 segundo a análise da seção fissurada de concreto armado reforçada. Recomenda-se que a tensão de serviço encontrada para o aço deve ser limitada em 80% de sua tensão característica de escoamento (f_{yk}), ou seja, $f_{s,s} \leq 0,80.f_{yk}$. Além disso, a tensão de compressão no concreto sob as cargas de serviço deve ser limitada em 45% da resistência característica do concreto (f_c'), ou seja, $f_{c,s} \leq 0,45.f_c'$.

$$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} \cdot A_f \cdot E_f \cdot \left(d_f - \frac{k \cdot d}{3} \right) \right] \cdot (d - k \cdot d) \cdot E_s}{A_s \cdot E_s \cdot \left(d - \frac{k \cdot d}{3} \right) \cdot (d - k \cdot d) + A_f \cdot E_f \cdot \left(d_f - \frac{k \cdot d}{3} \right) \cdot (d_f - k \cdot d)} \quad (17)$$

Já a tensão no reforço de FRP sob as cargas de serviço ($f_{f,s}$) é dada pela Equação 18, onde deve-se considerar a tensão no aço ($f_{s,s}$) encontrada na Equação 17. O valor da tensão no reforço de FRP, dado pela Equação 18, deve obedecer aos limites impostos para cada tipo de material, de acordo com a Tabela 2 (ACI 440.2R, 2017).

$$f_{f,s} = f_{s,s} \cdot \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \cdot \frac{d_f - k \cdot d}{d - k \cdot d} - \varepsilon_{bi} \cdot E_f \quad (18)$$

Tabela 2: Carga de serviço e tensão cíclica limite para o reforço FRP.

Tipo de Tensão	Tipo de Fibra		
	GFRP	AFRP	CFRP
Carga de serviço e tensão cíclica limite	0.20 f_{fu}	0.30 f_{fu}	0.55 f_{fu}

Fonte: ACI 440.2R (2017)

2.2 DURABILIDADE E MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO

Uma vez conhecida as propriedades mecânicas em curto prazo dos materiais compósitos utilizados nos sistemas de reforço FRP, torna-se fundamental um estudo da evolução dessas propriedades ao longo de sua vida útil. Neste capítulo serão abordadas questões a respeito da durabilidade dos compósitos de FRP e os mecanismos de degradação que afetam esses materiais.

2.2.1 DURABILIDADE DOS COMPÓSITOS DE FRP

A durabilidade é umas das principais preocupações quando se utiliza um material alternativo, um tanto quanto novo no mercado, em aplicações estruturais. Desde o momento em que os materiais compósitos de FRP começaram a ser utilizados pela indústria da construção civil, pouco se sabe a respeito de seu comportamento e durabilidade em longo prazo (KARBHARI, 2007).

Dentre o pouco conhecimento sobre este assunto sabe-se que as fibras utilizadas nos sistemas de reforço são relativamente duráveis, sendo sua principal vantagem a resistência à corrosão. Porém cada tipo de fibra pode apresentar um comportamento diferente quando exposta a determinados ambientes. As fibras de vidro, por exemplo, são suscetíveis à degradação quando expostas a umidade e alcalinidade sem o devido sistema de proteção. Similarmente, as fibras de aramida são afetadas pela radiação ultravioleta (UV) e possuem alto índice de absorção de umidade. Já as fibras de carbono são relativamente inertes a diferentes tipos de ambientes (ACI 440.9R, 2015).

Por outro lado, o grande problema da durabilidade está relacionado ao tipo de matriz utilizada nos materiais compósitos de FRP. As resinas a base de epóxi, por exemplo, são fortemente afetadas pelos raios UV, além de serem altamente sensíveis a altas temperaturas (CAROLIN, 2003)

De acordo com a ACI 440.2R (2017), os diferentes tipos de ambientes agressivos afetam diretamente a resina e as fibras dos vários sistemas de reforço com materiais compósitos de FRP. Suas propriedades mecânicas tal como resistência à tração, deformação última e módulo de elasticidade, são significativamente afetadas quando expostas a situações ambientais agressivas (ciclos de gelo-degelo, altas temperaturas, umidade, água salgada, UV, dentre outros). Porém, a taxa e o tipo de degradação dependem de vários fatores como o tipo de material, condições ambientais e período de exposição (KARBHARI, 2007).

Além disso, a degradação do sistema de reforço FRP não depende exclusivamente do tipo de ambiente ao qual o elemento reforçado está inserido, mas também, do tipo de

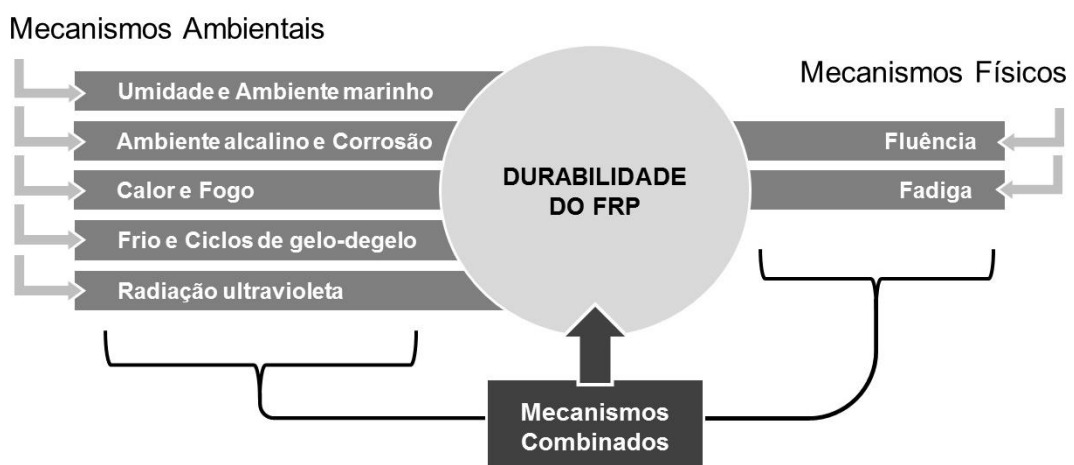
aplicação do mesmo. Sistemas de reforço externos, no caso da colagem externa EBR, são mais vulneráveis à degradação do que o sistema de reforço aplicado segundo a técnica NSM uma vez que nessa situação o material compósito se encontra protegido internamente à estrutura de concreto (DE LORENZIS e TENG, 2007).

2.2.2 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO

De acordo com Fonseca¹ (2008, apud Silva, 2017), os principais mecanismos de degradação podem ser classificados de acordo com duas categorias: ambiental e mecânico. Com relação ao mecanismo de degradação ambiental cita-se a ação da umidade e/ou presença de água, temperatura, soluções químicas e radiação UV. Com relação ao mecanismo de degradação mecânico citam-se as cargas estáticas, cargas dinâmicas, cargas combinadas, impactos, ações sísmicas e outras catástrofes naturais.

Em geral, todos os materiais utilizados na indústria da construção civil estão sujeitos aos ataques desses mecanismos de degradação, os quais são caracterizados por uma sequência de mudanças químicas, físicas e mecânicas. Sendo assim, quando se aplica um sistema de reforço FRP a uma determinada estrutura de concreto, esses mecanismos de degradação devem ser considerados de forma a se obter um melhor comportamento e durabilidade em longo prazo (ISIS, 2006). Vale ressaltar que os mecanismos de degradação podem agir de maneira individual ou em conjunto na degradação do material compósito de FRP conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5: Mecanismos de degradação prejudiciais ao FRP



Fonte: Adaptado de Isis (2006)

¹ FONSECA, S. C. Durabilidade de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras usados na reabilitação de estruturas de betão. 2008. 360 f. Tese de Doutorado – Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Verifica-se, em geral, que os mecanismos de degradação afetam diretamente a parte mais sensível do reforço estrutural, a ligação entre o substrato de concreto e o compósito de FRP, ligação esta que é realizada com o auxílio de resinas a base de epóxi (as quais são suscetíveis à degradação quando submetido a ambientes agressivos). Soma-se ainda o fato de que a degradação da ligação concreto/adetivo/FRP pode causar problemas de aderência, reduzindo o aproveitamento máximo do sistema de reforço.

2.2.3 UMIDADE E SOLUÇÕES SALINAS

A absorção de umidade pelos compósitos de FRP depende de vários aspectos tais como o tipo de matriz polimérica, a espessura do compósito, as condições de cura e seu processo de fabricação. O excesso de absorção pelos materiais compósitos pode ocasionar um significativo enfraquecimento entre as cadeias poliméricas (NORDIN, 2003).

Esta absorção de umidade causa mudanças reversíveis e irreversíveis na estrutura dos polímeros que, na pior das hipóteses, pode levar a uma perda de resistência à tração e diminuição da rigidez do compósito de FRP levando a um amolecimento, plastificação e inchaço da matriz, causado pela alteração de suas propriedades químicas e mecânicas (ISIS, 2006).

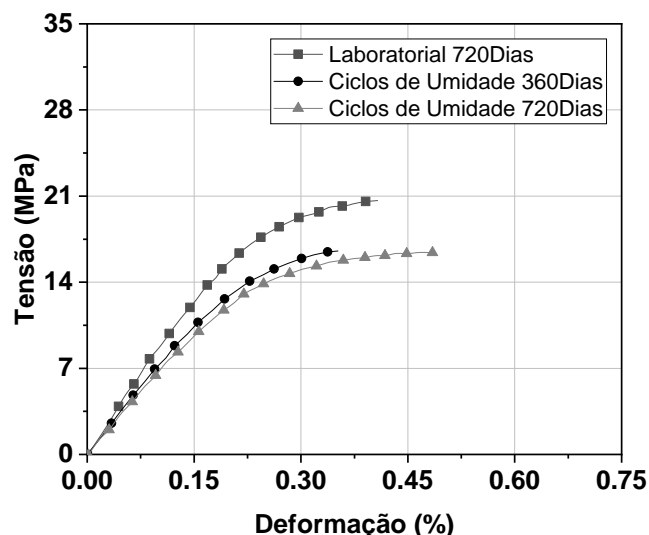
Isis (2006) comenta que a taxa de absorção de umidade pela matriz polimérica diminui enquanto sua perda de resistência e rigidez aumenta ao longo do tempo. Outro fato relevante está na redução da temperatura de transição vítrea (T_g), a qual é responsável pela mudança na propriedade do polímero de rígido e sólido frágil para um plástico viscoso e fluido. Neste caso, a presença de umidade pode levar a uma redução de até 75% na T_g e de 50% na resistência a flexão do polímero (EUROCOMP, 1996). Vale ressaltar que os polímeros que sofrem alteração em sua T_g podem ser considerados estruturalmente ineficazes.

Pesquisa realizada por Fernandes (2016) avaliou a degradação de corpos de prova de resina epoxídica, com 170 mm de comprimento por 10 mm de largura e 4 mm de espessura, quando expostos a ciclos de umidade (3 dias expostos a umidade constante e 4 dias a um ambiente seco) a uma temperatura constante de 22°C em um período total de 720 dias. A resina utilizada foi do tipo bi componente denominada *S&P Resin 220 epoxy adhesive*, a qual foi fornecida pela *S&P Clever Reinforcement*.

A Figura 6 apresenta o diagrama tensão *versus* deformação dos corpos de prova de resina epoxídica expostos aos ciclos de umidade e mantidos em ambiente laboratorial.

Os resultados demonstraram uma redução nas propriedades mecânicas de 25% e 28% na resistência a tração e no módulo de elasticidade, respectivamente (ver Tabela 3).

Figura 6: Diagrama tensão versus deformação dos corpos de prova de resina



Fonte: Adaptado de Fernandes (2016)

Tabela 3: Resultado da degradação dos corpos de prova de resina epoxídica

Idade do ensaio	Ambiente de exposição					
	Ambiente laboratorial			Ciclos de umidade		
	Tensão máxima (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	T_g (°C)	Tensão máxima (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	T_g (°C)
Referência	22,0 (4,5)	7,2 (3,7)	-	22,0 (4,5)	7,2 (3,7)	-
360 dias	-	-	-	16,6 (2,9)	5,4 (2,8)	50,2
720 dias	20,8 (2,2)	6,7 (3,4)	53,6	16,5 (2,5)	5,2 (3,2)	50,4

Nota: Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Fonte: Fernandes (2016)

Dalfré (2016) também avaliou a degradação de corpos de prova de resina epoxídica com 170 mm de comprimento por 10 mm de largura e 4 mm de espessura, do tipo *primer* e de laminação, expostos a umidade constante por um período de 720 dias em água obtida da rede pública de abastecimento. Os resultados demonstraram uma redução na resistência à tração de 34% para a resina do tipo *primer* e 37% para a resina de laminação. Em relação ao módulo de elasticidade, a resina do tipo *primer* obteve uma redução de 28% enquanto a resina de laminação uma redução de 22%.

Além das matrizes, alguns tipos de fibras utilizadas nos compósitos de FRP também estão susceptíveis à degradação causada pela ação da umidade. No caso das fibras de vidro, segundo Isis (2006), a umidade penetra pelo compósito e remove os íons presentes na fibra,

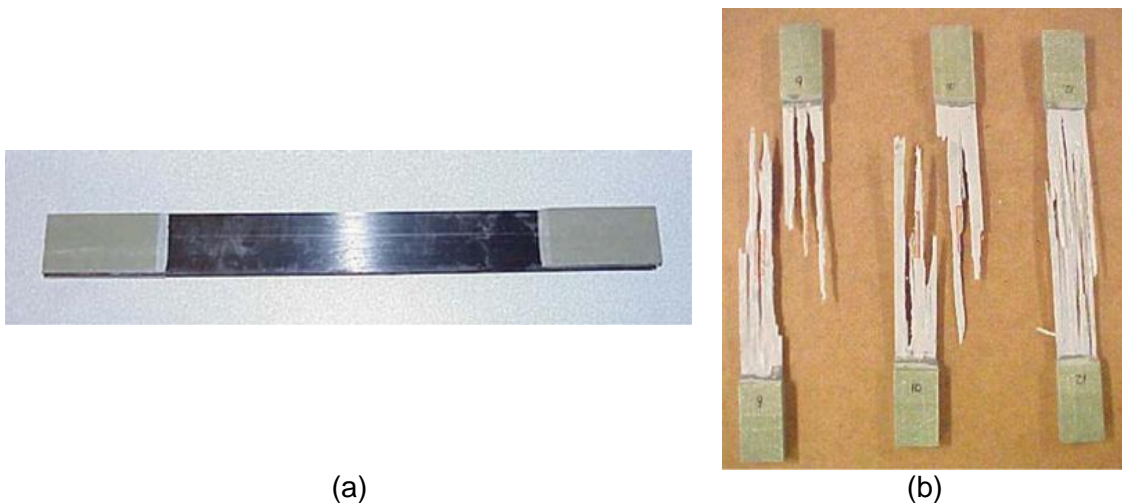
levando à redução de sua resistência à tração e módulo de elasticidade. No caso de fibras de aramida, essas podem absorver cerca de 13% em massa de umidade, o que causa uma expansão, resultando em redução de suas propriedades mecânicas tais como, resistência à compressão, cisalhamento e perda da ligação com a matriz polimérica (FIB Bulletin 14, 2001).

Pesquisa realizada por Cromwell, Harries e Shahrooz (2010) verificou a degradação de laminados de CFRP e GFRP. Os corpos de prova com 254 mm de comprimento e 25,5 mm de largura (Figura 7a) foram expostos a umidade constante (a uma temperatura de 38°C) e a solução salina (a uma temperatura de 22°C). Em ambas as exposições o período máximo de degradação foi de 10000 horas. A Figura 7b apresenta o modo de ruptura verificado nos corpos de prova de GFRP e a Tabela 4 o resumo dos resultados de degradação dos laminados de CFRP e GFRP após a exposição a umidade constante e solução salina.

Neste caso o autor apresentou os resultados em termos de tensão vezes unidade de espessura do FRP (MPa.mm). Os resultados de degradação foram mais notáveis no GFRP após 3000 horas de exposição, o qual apresentou uma redução na resistência a tração de 18% e 12% após exposição a umidade constante e solução salina, respectivamente.

A presença de umidade também é responsável pelo enfraquecimento da ligação entre o compósito de FRP e o substrato de concreto ao longo do tempo. Segundo Pan, Xian e Silva 2015, a umidade pode afetar a ligação concreto/adesivo/FRP, causando uma descolagem ou destacamento prematuro do sistema de reforço.

Figura 7: (a) Corpo de prova de CFRP e (b) modo de ruptura dos laminados de GFRP



Fonte: Cromwell, Harries e Shahrooz (2010)

Tabela 4: Resultados da degradação dos corpos de prova de CFRP e GFRP

Período do ensaio	Ambiente de exposição							
	Umidade Constante				Solução Salina			
	Tensão máxima (MPa.mm)		Módulo de elasticidade (GPa.mm)		Tensão máxima (MPa.mm)		Módulo de elasticidade (GPa.mm)	
	CFRP	GFRP	CFRP	GFRP	CFRP	GFRP	CFRP	GFRP
Referência	650	330	58	18	650	330	58	18
1000 h	820	300	65	18	790	350	64	19
3000 h	600	270	57	18	630	290	57	17
10000 h	700	320	61	18	630	310	66	17

Fonte: Adaptado de Cromwell, Harries e Shahrooz (2010)

Pesquisa realizada por Kabir, Shrestha e Samali (2013) avaliou a descolagem do FRP do substrato de blocos de concreto com dimensões de 300x200x150 mm³ e resistência a compressão igual a 32 MPa. Os blocos foram confeccionados e reforçados com mantas de CFRP do tipo unidirecional com resistência a tração e módulo de elasticidade de 2758,4 MPa e 221,9 GPa, respectivamente. Após o reforço, os blocos foram expostos a ciclos de umidade (1 semana exposto a umidade constante e 1 semana a um ambiente seco) em um período total de 18 meses. Posteriormente, ensaios de arrancamento foram realizados. Os resultados demonstraram que, com 12 meses de exposição, houve uma pequena redução de 5% na tensão de aderência entre o FRP e o substrato de concreto.

2.2.4 TEMPERATURA ELEVADA

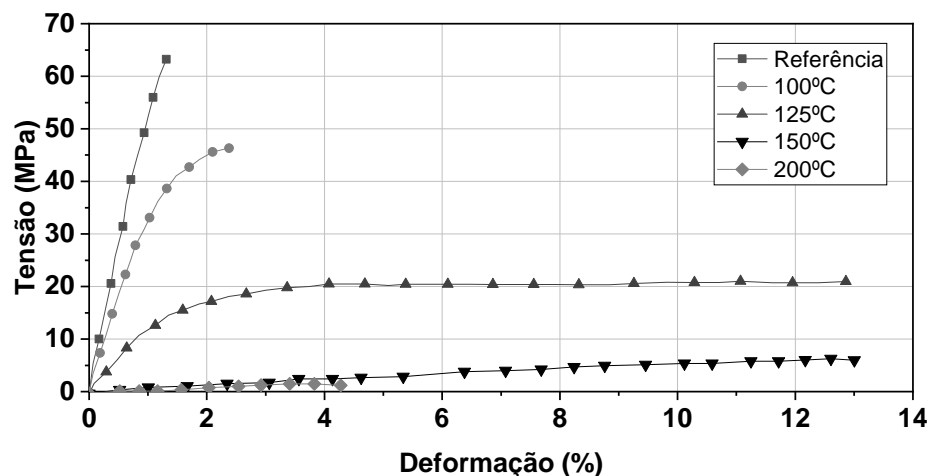
Vários materiais compósitos de FRP utilizados na indústria da construção civil sofrem degradação em suas propriedades mecânicas perante a incidência de temperaturas maiores que a sua temperatura limite (T_g). Essa degradação ocorre devido ao amolecimento, plastificação e redução do módulo de elasticidade da matriz polimérica, a qual pode ocorrer com uma temperatura média de 65°C a 120°C (ISIS, 2006).

Estudo realizado por Banea, Silva e Campilho (2011) avaliou a influência de altas temperaturas nas propriedades mecânicas de adesivos epoxídicos. O adesivo epoxídico analisado possuía uma T_g de 155°C e foi confeccionado nas dimensões de 150 mm de comprimento por 45 mm de largura e espessura de 2 mm. Os corpos de prova foram expostos a temperaturas de 100°C, 125°C, 150°C e 200°C e ensaiados 5 minutos após atingir as temperaturas definidas. Os resultados demonstraram uma redução de 34%, 68%, 90% e 98% na resistência a tração após a exposição a temperatura de 100°C, 125°C, 150°C

e 200°C, respectivamente. Em relação ao módulo de elasticidade, reduções em torno de 24%, 74%, 98% e 99% foram verificadas para as mesmas temperaturas já apresentadas. Segundo o autor, as curvas de tensão *versus* deformação dos adesivos epoxídicos apresentaram um aumento na ductilidade após a exposição a altas temperaturas, tal como apresentado na Figura 8.

Alguns tipos de fibras utilizadas nos sistemas de reforço FRP também estão suscetíveis à degradação perante a incidência de elevadas temperaturas. As fibras de carbono são significativamente resistentes à temperatura. Temperaturas superiores a 1000°C não indicam nenhuma perda de resistência ou rigidez. Por outro lado, as fibras de vidro apresentam redução em sua resistência à tração em torno de 20% a 60% para temperaturas superiores a 600°C. As fibras de aramida apresentam as mesmas reduções a temperaturas superiores a 300°C (ISIS, 2006).

Figura 8: Diagrama tensão *versus* deformação das resinas epoxídicas



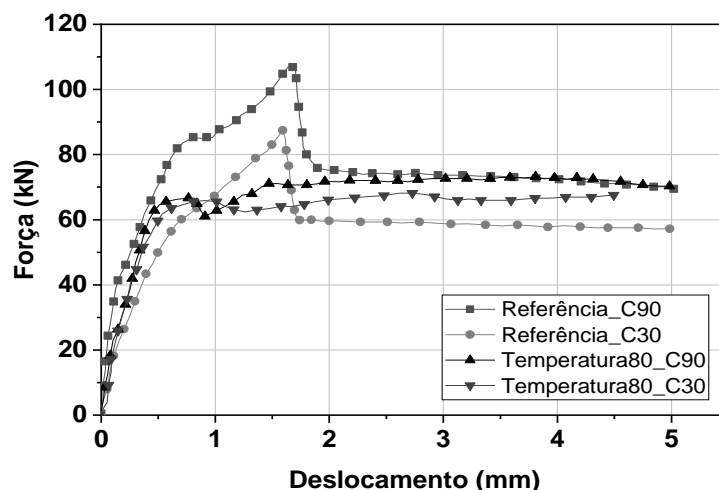
Fonte: Adaptado de Banea, Silva e Campilho (2011)

Pesquisa realizada por Silva (2017) avaliou a influência de ciclos de temperatura na degradação das propriedades mecânicas dos CFRP. Corpos de prova de laminados de CFRP com 25 mm de comprimento por 10 mm de largura e 1,4 mm de espessura foram expostos a ciclos de temperatura que variaram de 20°C (mínima) a 80°C (máxima) com picos máximos de 7 a 9 horas de exposição para os dois valores extremos de temperatura. A transição de uma temperatura a outra levava em torno de 4 horas e o período total de exposição foi de 6 meses (180 ciclos). O laminado de CFRP utilizado foi do tipo unidirecional com resistência a tração de 2648,3 MPa e módulo de elasticidade de 169,5 GPa. Os resultados demonstraram pouca variação das propriedades mecânicas, sendo verificada uma redução de 0,46% e 3% na resistência a tração e no módulo de elasticidade, respectivamente.

A ligação entre o compósito de FRP e o substrato de concreto também pode ser afetada pela da exposição a elevadas temperaturas. A degradação da ligação ocorre devido a mudanças no comportamento do adesivo o que leva a descolagens prematuras do FRP (ZHENG *et al.*, 2016; KARBHARI *et al.*, 2003).

Pesquisa realizada por Vaz, Aguiar e Camões (2005) avaliou a degradação da ligação entre o sistema de reforço e o substrato de concreto em vigas de concreto armado reforçadas externamente com laminados de CFRP expostas a elevadas temperaturas. As vigas de concreto armado possuíam dimensões de 650x150x100 mm³ e armadura longitudinal superior e inferior de 6 mm de diâmetro com resistência a tração de 400 MPa e estribos de 3 mm de diâmetro com resistência a tração de 500 MPa e espaçados a cada 5 mm. As vigas foram concretadas com concreto com duas classes de resistência à compressão, 30 MPa e 90 MPa, e posteriormente reforçadas a flexão com laminados de CFRP, os quais, após aplicação do sistema de reforço, as vigas foram expostas a três distintos ciclos de temperatura (20°C – 40°C, 20°C – 60°C e 20°C – 80°). Os ciclos possuíam 12 horas de duração (6 horas a temperatura mínima e 6 horas a temperatura máxima). As vigas foram expostas a 50 ciclos e posteriormente ensaios de flexão em 3 pontos foram realizados. Vale ressaltar que a T_g do adesivo era de 63°C. A Figura 9 apresenta o diagrama força *versus* deslocamento das vigas reforçadas de referência, as quais foram mantidas em ambiente laboratorial, e das vigas reforçadas expostas a temperatura máxima de 80°C. Os resultados demonstraram uma descolagem prematura do sistema de reforço quando exposto a temperatura de 80°C (Figura 10). Nesse caso, ocorreu uma redução máxima na resistência a flexão de 9% e 21% paras as vigas com concreto de 30 MPa e 90 MPa, respectivamente.

Figura 9: Diagrama força *versus* deslocamento das vigas reforçadas de referência e expostas a temperatura de 80°C



Fonte: Adaptado de Vaz, Aguiar e Camões (2005)

Figura 10: Descolagem prematura do sistema de reforço



Fonte: Vaz, Aguiar e Camões (2005)

2.2.5 RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA (AMBIENTE EXTERNO)

Os materiais compósitos de FRP, quando expostos a ambientes externos, sujeitos à radiação ultravioleta (UV), também estão vulneráveis à degradação. A ação conjunta dos mecanismos de degradação do meio externo (temperatura, umidade e chuva ácida) juntamente com a radiação UV torna-se mais agravante os efeitos da degradação sobre os compósitos de FRP (SHOKRIEH e BAYAT, 2007).

A exposição direta à radiação UV dos polímeros pode causar degradação por meio de um mecanismo conhecido como fotodegradação, o qual causa a decomposição ou dissociação das ligações químicas entre as cadeias poliméricas conduzida pela radiação UV presente nas ondas solares. Esta radiação presente nas ondas solares é capaz de causar a degradação dos polímeros, levando a uma descoloração, oxidação da superfície, fragilização e microfissuração de sua matriz polimérica (ISIS, 2006).

Pesquisa realizada por Zhao *et al.* (2017) avaliou a degradação de três tipos de resina polimérica (éster-vinílica, epóxi e éster-epoxi) quando expostas à radiação UV. Corpos de prova 200 mm de comprimento por 20 mm de largura e espessura de 4 mm foram confeccionados e curados por sete dias em temperatura ambiente. Posteriormente, os corpos de prova foram expostos à radiação UV (280 nm a 315 nm) a uma temperatura entre 57°C a 63°C e umidade entre 90% a 95%. Os ciclos de radiação UV possuíam 12 horas de duração (8 horas de radiação UV e 4 horas de condensação) com um período total de 90 dias. A Tabela 5 apresenta as propriedades mecânicas das resinas de referência e após a exposição aos ciclos de radiação UV. Os resultados demonstraram uma elevada degradação da resina éster-vinílica, a qual apresentou uma redução de 65% e 69% na resistência a tração e no módulo de elasticidade, respectivamente. Segundo o autor, após a exposição, os corpos de prova das resinas apresentaram grade alteração em sua coloração.

Tabela 5: Propriedades mecânicas das resinas após exposição a radiação UV

Período de exposição	Tensão máxima (MPa)			Módulo de elasticidade (MPa)		
	Éster-vinílica	Epóxi	Éster- epóxi	Éster-vinílica	Epóxi	Éster- epóxi
Referência	39,7	41,0	34,5	2544,7	1944,0	2024,7
30 dias	17,1	39,8	30,7	1223,0	2438,9	2385,3
90 dias	13,8	42,0	31,4	777,6	1547,9	1740,1

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

Além das resinas, alguns tipos de fibras também sofrem com a degradação causada pela radiação UV. De acordo com Isis (2006), as fibras de carbono e vidro, em geral, não são afetadas pela radiação UV, enquanto as fibras de aramida apresentam uma leve degradação perante a exposição aos raios UV.

Por fim, a ligação entre o compósito de FRP e o substrato de concreto também demonstra ser suscetível a degradação perante a exposição à radiação UV. A pesquisa realizada por Kabir, Shrestha e Samali (2013) também compreendeu os efeitos da exposição ao ambiente externo na ligação concreto/adesivo/FRP. Os resultados demonstraram uma redução máxima na tensão de aderência de até 15% quando comparados com os corpos de prova de referência. Foi verificada, também, uma alteração nos modos de ruptura, os quais passaram a ser governados pela ruptura da ligação e não do substrato de concreto verificado no início da pesquisa. O autor classificou a exposição ao ambiente externo como a situação mais nociva à ligação concreto/adesivo/FRP.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo é descrita a metodologia utilizada para avaliar a durabilidade e o comportamento mecânico das vigas de concreto armado reforçadas a flexão com mantas de CFRP aplicadas segundo a técnica EBR, assim como dos materiais utilizados no sistema de reforço. São apresentadas as características das vigas de concreto armado e de todos os materiais constituintes do sistema de reforço, bem como a metodologia utilizada para o preparo dos corpos de prova, as condições e métodos de ensaios.

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente trabalho compreende a análise do comportamento e da durabilidade de vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP aplicadas segundo a técnica EBR. Os principais aspectos analisados são o incremento, ou decréscimo, da capacidade de carga das vigas reforçadas, ductilidade, rigidez, modos de ruptura e deformações do concreto, armadura longitudinal de aço e sistema de reforço frente a aplicação de carregamento. Para tal, foi realizada uma análise em vigas de referência (com e sem reforço compósito) e em vigas reforçadas mantidas em ambiente laboratorial (interno, protegido) e expostas às intempéries (ambiente externo).

Doze vigas de concreto armado foram confeccionadas, as quais possuem dimensões de 12x20x250 cm³, vão livre entre os apoios de 230 cm e concreto com resistência a compressão nominal (f_{ck}) de 20 MPa. Das 12 vigas confeccionadas, duas não possuíam nenhum tipo de reforço, sendo utilizadas com referência, e as demais foram reforçadas a flexão com uma camada de manta de CFRP aplicadas segundo a técnica EBR. Para além disso, corpos de prova de concreto, resina epoxídica e compósitos de CFRP também foram confeccionados.

A designação utilizada para identificação de cada viga foi V_x_y_z, onde “x” é o número de elementos ensaiados, “y” corresponde aos elementos utilizados como referência (REF, de *Referência*), mantidos em ambiente laboratorial (LAB, de *Laboratory*, em língua inglesa) ou expostos ao intemperismo (WEA, de *Weathering*, em língua inglesa), e “z” devido a utilização ou não de material de reforço (0 ou CFRP).

Paralelamente à campanha experimental das vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP foram analisados, também, os materiais constituintes do sistema de reforço, especificamente resinas epoxídicas e compósito de CFRP.

A notação adotada na identificação dos ambientes de exposição para os materiais intervenientes foi X_y onde “X” corresponde aos ambientes de exposição (REF de *Referência*, em língua inglesa; LAB de *Laboratory*, em língua inglesa e WEA de *Weathering*, em língua inglesa) e “y” o período de exposição.

Para avaliar o comportamento e durabilidade em longo prazo das vigas de concreto armado reforçadas com uma camada de manta de CFRP e dos materiais constituintes do sistema de reforço foram definidos dois ambientes de exposição (Figura 11), os quais são apresentados a seguir:

- Ambiente laboratorial (LAB) (interno, protegido e com monitorização da temperatura ambiente), o qual serviu como referência aos demais ensaios (Figura 11a); e
- Exposição às intempéries (WEA) (ambiente externo, livre de obstáculos que possam promover sombreamento nas vigas e corpos de prova, com umidade, temperatura e radiação monitorizados) (Figura 11b).

Figura 11: Ambientes de exposição: (a) câmara isolada e protegida e (b) exposição a intempéries (ambiente externo)



(a)

(b)

Fonte: O Autor e INMET (2019)

As Tabelas 6 a 8 apresentam o resumo dos ensaios e da quantidade de corpos de prova de concreto, vigas de concreto armado e materiais constituintes do sistema de reforço analisados na campanha experimental, respectivamente.

Note-se que neste trabalho serão apresentados os resultados de referência e após 6 meses de exposição ao ambiente laboratorial e às intempéries dos corpos de prova de concreto e das vigas de concreto armado. O ensaio dos demais elementos de concreto será realizado em outro mestrado já em andamento.

Tabela 6: Programa de ensaios dos corpos de prova de concreto

Cps	Ensaio dos corpos de prova de concreto	Quantidade de corpos de prova
Referência	28 dias após a concretagem	5
	200 dias após a concretagem	5
Ambiente laboratorial	6 meses (após aplicação do reforço)	5
	12 meses (após aplicação do reforço)	5
Exposição às intempéries	6 meses (após aplicação do reforço)	5
	12 meses (após aplicação do reforço)	5

Fonte: O Autor

Tabela 7: Programa de ensaios das vigas de concreto armado

Vigas	Ensaio das vigas	Quantidade de corpos de prova
V_REF_0	200 dias após a concretagem	2
V_REF_CFRP	14 dias após aplicação do reforço (cura completa da resina epoxídica)	2
V_LAB_CFRP (Ambiente laboratorial)	6 meses (após aplicação do reforço)	2
	12 meses (após aplicação do reforço)*	2
V_WEA_CFRP (Ambiente externo)	6 meses (após aplicação do reforço)	2
	12 meses (após aplicação do reforço)*	2

* os ensaios serão realizados em outro mestrado já em andamento

Fonte: O Autor

Tabela 8: Programa de ensaios dos materiais constituintes do sistema de reforço

Tipo de ensaio	Ensaio dos materiais	Quantidade de corpos de prova		
		Compósito de CFRP	Resinas epoxídicas	
			Resina A (primer)	Resina B (laminação)
Referência (REF)	7 dias	5	5	5
	14 dias	5	5	5
Ambiente Laboratorial (LAB)	4 meses	5	5	5
	8 meses	5	5	5
Exposição às intempéries (ambiente externo) (WEA)	4 meses	5	5	5
	8 meses	5	5	5

Fonte: O Autor

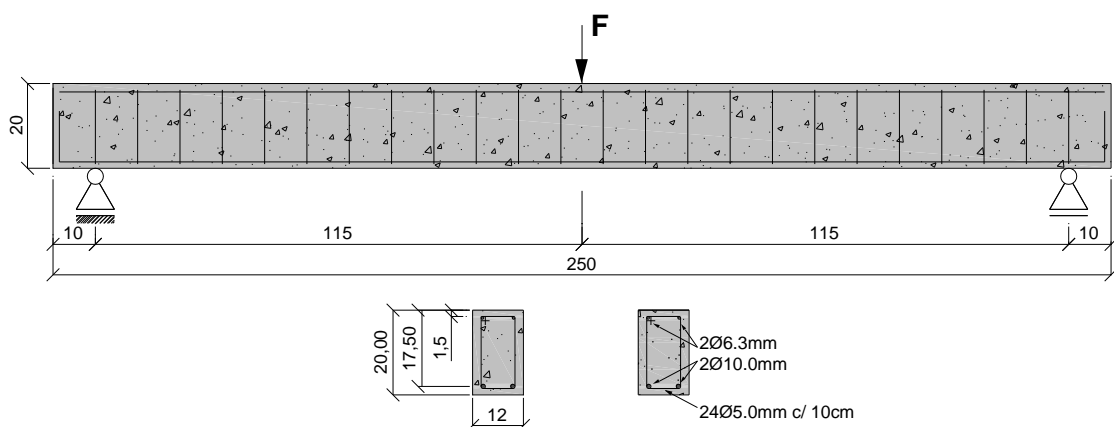
A exposição das vigas de concreto armado reforçadas, as quais foram mantidas juntamente com os corpos de prova de concreto, e dos materiais constituintes do sistema de reforço, aos ambientes (laboratorial e intempéries) apresentados anteriormente foi realizada em períodos distintos e ao longo do desenvolvimento do programa experimental. Desse modo, no Apêndice A, é apresentado um cronograma com os períodos de realização dos ensaios das vigas e dos materiais constituintes do sistema de reforço.

3.1.1 DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS E DO SISTEMA DE REFORÇO

O dimensionamento da armadura de flexão foi realizado de modo que fosse possível avaliar o desempenho do sistema de reforço aplicado na face tracionada do elemento. Para tal, as vigas foram dimensionadas no domínio 2 de deformações tendo como base as recomendações da ABNT NBR 6118 (2014). Assim, o dimensionamento foi realizado por meio do diagrama simplificado de distribuição de tensões e deformações de uma viga com seção retangular e armadura simples.

As vigas foram confeccionadas com uma armadura longitudinal de flexão positiva, alojada junto a face inferior, composta por duas barras de aço CA-50 com diâmetro (ϕ) de 10 mm (taxa de armadura longitudinal de 0,75%). O cobrimento da armadura utilizado foi de 1,5 cm a partir da face dos estribos. Além do mais, para evitar a ruptura por cisalhamento, a armadura transversal foi superestimada, sendo utilizado estribos de aço CA-60 com diâmetro (ϕ) de 5 mm e espaçados a cada 10 cm. A Figura 12 apresenta as características das vigas e os detalhes das armaduras longitudinais e transversais.

Figura 12: Armadura longitudinal e detalhes da seção transversal das vigas utilizadas no programa experimental. Dimensões em cm

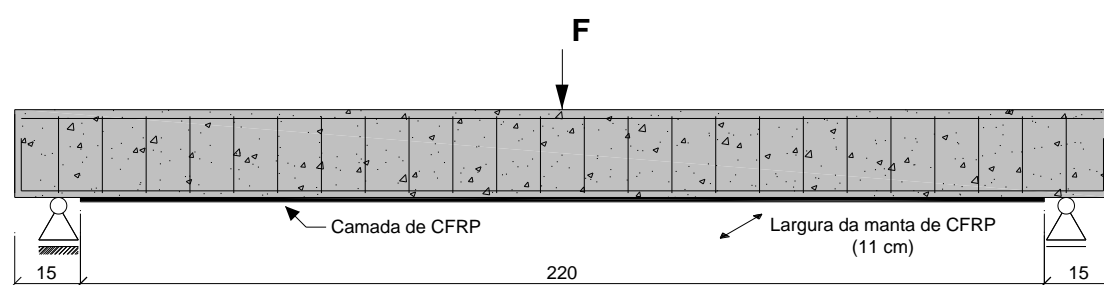


Fonte: O Autor

A manta de fibra de carbono utilizada no sistema de reforço é tipo *C-Sheet 240*. Trata-se de uma manta unidirecional com gramatura de 300 g/m² e espessura de 0,176 mm. De acordo com a fabricante, ela possui uma resistência à tração última de 3800 MPa, módulo de elasticidade de 240 GPa e uma deformação na ruptura de 15,5 %.

Com base do dimensionamento para o ELU, a manta de fibra de carbono foi cortada em tiras com largura de 11 cm e comprimento de 220 cm de modo que suas dimensões se adequassem à superfície tracionada da viga de concreto armado. A Figura 13 apresenta os detalhes do posicionamento do sistema de reforço com uma camada de manta de CFRP.

Figura 13: Detalhes do sistema de reforço. Unidades em cm



Fonte: O Autor

Para além disso, tendo em vista que o dimensionamento do sistema de reforço foi realizado segundo os princípios da norma americana ACI 440.2R (2017), fez-se a avaliação da capacidade portante da viga, à flexão, também se considerando as recomendações da norma ACI 318 (2014).

3.1.2 PREPARAÇÃO DAS VIGAS

No processo de fabricação das vigas de concreto armado foram utilizadas formas de madeira compensada plastificada com 10 mm de espessura. Antes do lançamento do concreto as formas de madeira foram untadas com desmoldante para facilitar a desforma.

As vigas foram concretadas em uma única etapa procurando garantir uma menor variação das características mecânicas do concreto. O concreto utilizado foi usinado, o qual fornecido pela empresa SUPERCON com uma resistência a compressão nominal (f_{ck}) de 20 MPa. Foi utilizado a brita nº 1 como agregado graúdo. A relação água cimento foi de 0,680 com um consumo de cimento de 297 kg/m³. Além do mais, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone, o qual apresentou um valor de 50 mm.

O adensamento do mesmo foi realizado mecanicamente por meio da utilização de um vibrador de imersão de agulha com 405 mm de comprimento, diâmetro de 35 mm e com

uma frequência de 4000 rpm. Corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 100 x 200 mm, também foram moldados para controle tecnológico do concreto nas distintas idades apresentadas na Tabela 6.

Após a concretagem das vigas e dos corpos de prova, os mesmos foram cobertos com uma lona plástica, até a desforma, visando diminuir os efeitos da retração do concreto pela evaporação da água. Para as vigas e os corpos de prova de concreto foi realizada a cura úmida por um período de 7 dias. Os detalhes do processo de concretagem são apresentados na Figura 14.

Figura 14: (a) preparo das armaduras, (b) posicionamento das armaduras nas formas, (c) corpos de prova cilíndricos, (d) abatimento do tronco de cone, (e-f) lançamento do concreto, (g) regularização do concreto e (h-i) aspecto final dos corpos de prova



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)

Fonte: O Autor

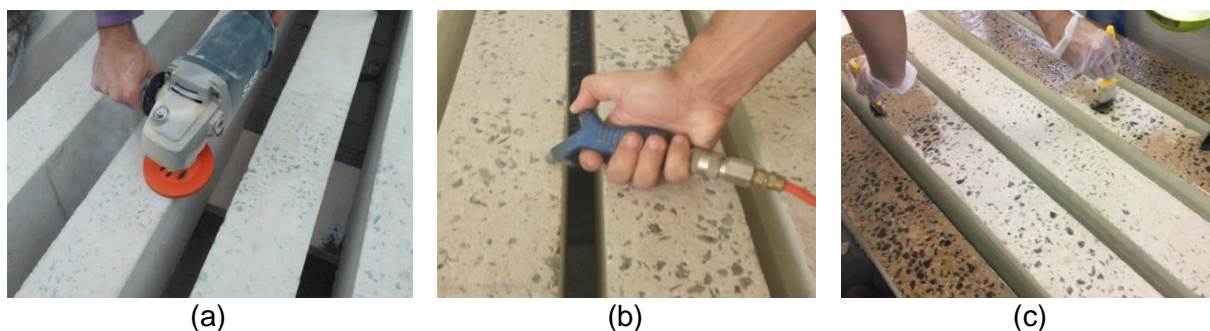
3.1.3 REFORÇO DAS VIGAS SEGUNDO A TÉCNICA EBR

Neste programa experimental foi utilizada a técnica EBR para aplicação do reforço nas vigas de concreto armado. Os procedimentos de colagem das mantas de CFRP seguiu a metodologia típica e foram executados após a cura do concreto.

Para execução do sistema de reforço CFRP EBR, a superfície de concreto foi primeiramente preparada de modo a garantir a perfeita aderência entre a manta de CFRP e o substrato de concreto. Nesta etapa é importante que a superfície de concreto esteja sem contaminações de óleos, graxas ou agentes desmoldantes. Para isto, o substrato foi esmerilhado com um disco de desbaste diamantado acoplado a uma esmerilhadeira. Procurou-se remover toda a camada de nata de cimento até a exposição dos agregados.

Em seguida, aplicou-se ar comprimido sobre a superfície para limpeza e eliminação das partículas sólidas. Após a preparação da superfície (Figura 15), aplicou-se uma camada da resina *primer* de forma a melhorar as condições de aderência entre o CFRP e o substrato de concreto.

Figura 15: (a) lixamento para eliminação da nata de concreto, (b) limpeza com ar comprimido e (c) aplicação do primer

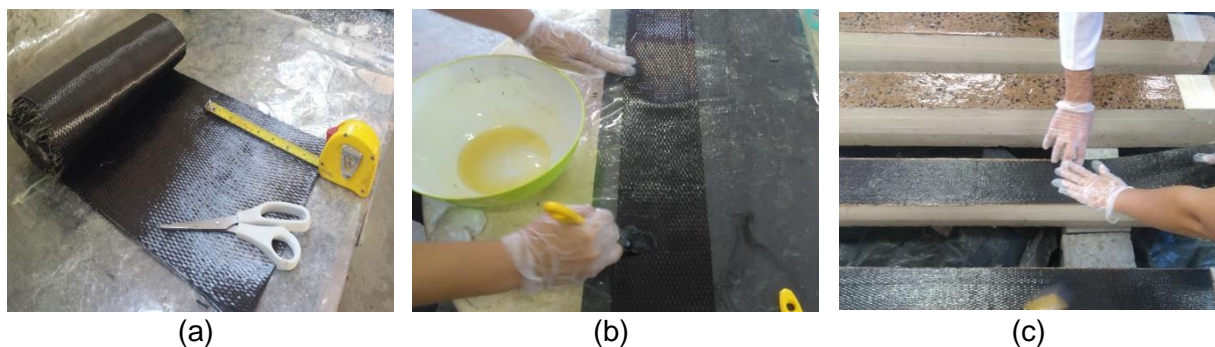


Fonte: O Autor

Logo, com as faixas de manta cortadas, procedeu-se a colagem do CFRP com o auxílio da resina epoxídica de laminação, a qual foi aplicada com intervalo de 45 minutos após a aplicação do *primer*. O preparo das resinas do tipo *primer* e de laminação foi baseado em três passos: agitação de cada um dos componentes, mistura do componente A ao B na proporção indicada pelo fabricante e mistura mecânica (com uma haste metálica em espiral) até a obtenção de uma coloração uniforme.

Posteriormente, a resina *primer* foi espalhada na superfície de concreto com o auxílio de um pincel. Fez-se, também, a impregnação da manta de CFRP com a resina de laminação e, antes da aplicação do sistema de reforço, fez-se a aplicação desta resina ao substrato de concreto. A Figura 16 apresenta os passos e procedimento utilizados na aplicação do reforço nas vigas de concreto armado.

Figura 16: (a) corte da manta de fibra de carbono, (b) impregnação dos compósitos de CFRP e (c) aplicação do CFRP ao substrato de concreto



Fonte: O Autor

Na aplicação do reforço procurou-se garantir o alinhamento das fibras na direção longitudinal da viga, a não formação de bolhas de ar no tardo do compósito de CFRP e o não acúmulo de resina em excesso. Para tal, recorreu-se ao uso de um rolo.

Após a cura da resina (aproximadamente 14 dias em ambiente laboratorial) as vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP foram expostas às condições ambientais apresentadas anteriormente. Nesta data também foram realizados os ensaios das vigas de referência sem e com reforço.

3.1.4 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

Os procedimentos para caracterização das propriedades mecânicas do concreto, tais como resistência a compressão axial e módulo de elasticidade, são descritas abaixo.

O controle tecnológico seguiu os procedimentos de moldagem e cura prescritos pela ABNT NBR 5738 (2015), onde foram moldados 45 corpos de prova cilíndricos com 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro. Após 24 horas da concretagem, os corpos de prova foram desmoldados e curados juntamente com as vigas.

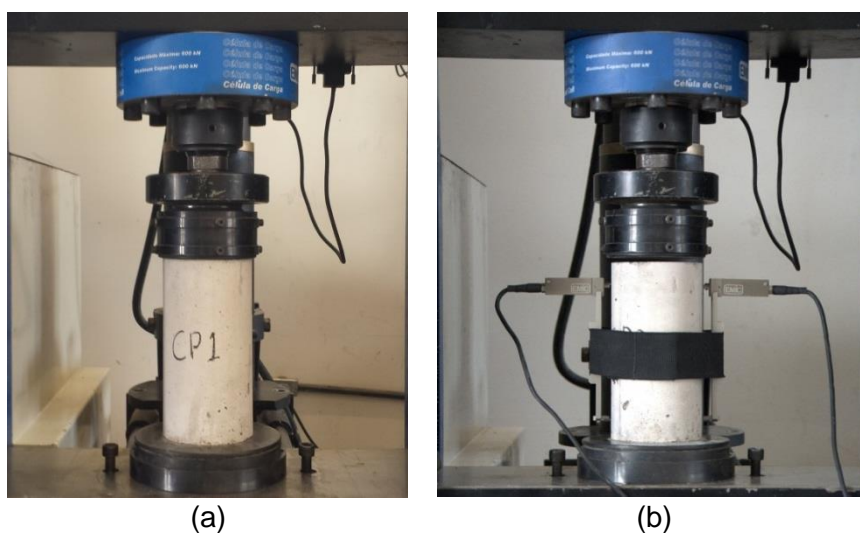
Os corpos de prova de concreto utilizados para determinação da resistência a compressão axial e módulo de elasticidade foram retificados para regularizar sua superfície e garantir uma melhor distribuição de carga no momento dos ensaios.

A determinação da resistência à compressão foi realizada de acordo com as premissas da ABNT NBR 5739 (2018) para o concreto nas idades de 28, 200 e 418 dias, sendo ensaiados cinco corpos de prova para cada idade. A Figura 17a apresenta o ensaio de compressão axial realizado.

O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado de acordo com a ABNT NBR 8522 (2017) para o concreto nas mesmas idades dos ensaios de compressão axial. Dos cinco corpos de prova ensaiados, três foram utilizados para determinação do módulo de elasticidade. Neste ensaio foi utilizado um extensômetro eletrônico de configuração dupla da marca EMIC, o qual possui um comprimento de leitura de 150 mm e uma faixa de medição entre 0,0001 e 2,5 mm (Figura 17b).

A norma ABNT NBR 8522 (2017) determina a aplicação de uma tensão de 0,5 MPa, denominada σ_a e uma tensão equivalente a 30% da carga de ruptura do concreto (σ_b) determinada nos ensaios de compressão axial. Para tal, foi aplicada uma tensão de 30% de f_c , mantendo essa tensão por 60 segundos, posteriormente a carga foi reduzida a uma tensão de 0,5 MPa e mantida por mais 60 segundos. Este ciclo foi repetido por mais três vezes até a obtenção do módulo de elasticidade.

Figura 17: Ensaio de caracterização do concreto: (a) resistência à compressão e (b) determinação do módulo de elasticidade



Fonte: O Autor

Os ensaios de caracterização do concreto foram realizados no LSE da UFSCar. Para tal, utilizou-se uma máquina de ensaios universal da marca EMIC, modelo DL 60000, a qual possui uma célula de carga com capacidade máxima de 600 kN com resolução de leitura de 0,1 kN. Após a caracterização dos corpos de prova de referência, aos 200 dias, os mesmos foram expostos juntamente com as vigas aos ambientes pré-definidos anteriormente.

3.1.5 CARACTERIZAÇÃO DO AÇO

As propriedades mecânicas do aço foram avaliadas por meio de ensaios de tração axial de acordo com as recomendações da ABNT NBR 6892-1 (2013).

Foram ensaiadas seis amostras de armadura. As amostras possuíam um comprimento de 50 cm e foram retiradas aleatoriamente do lote. Três amostras possuíam diâmetro (ϕ) de 5 mm (CA-60) e três amostras possuíam diâmetro (ϕ) de 10 mm (CA-50).

Para cada diâmetro de barra foi determinado a tensão de escoamento (f_s), a tensão última (f_u), a deformação no escoamento (ϵ_s) e o módulo de elasticidade (E). A aferição das deformações das barras de aço foi determinada por meio do mesmo extensômetro eletrônico utilizado para determinação do módulo de elasticidade do concreto, o qual foi instalado no centro dos corpos de prova. A Figura 18 apresenta o ensaio de caracterização das barras de aço.

Figura 18: Caracterização das barras de aço



Fonte: O Autor

Os ensaios de caracterização das armaduras também foram realizados no LSE da UFSCar com a mesma máquina de ensaios universal utilizada para caracterização do concreto.

3.1.6 CARACTERIZAÇÃO DAS RESINAS EPOXÍDICAS

Neste programa experimental utilizaram-se resinas epoxídicas bi-componentes do tipo *primer* e laminação, designadas por resina A e B, respectivamente.

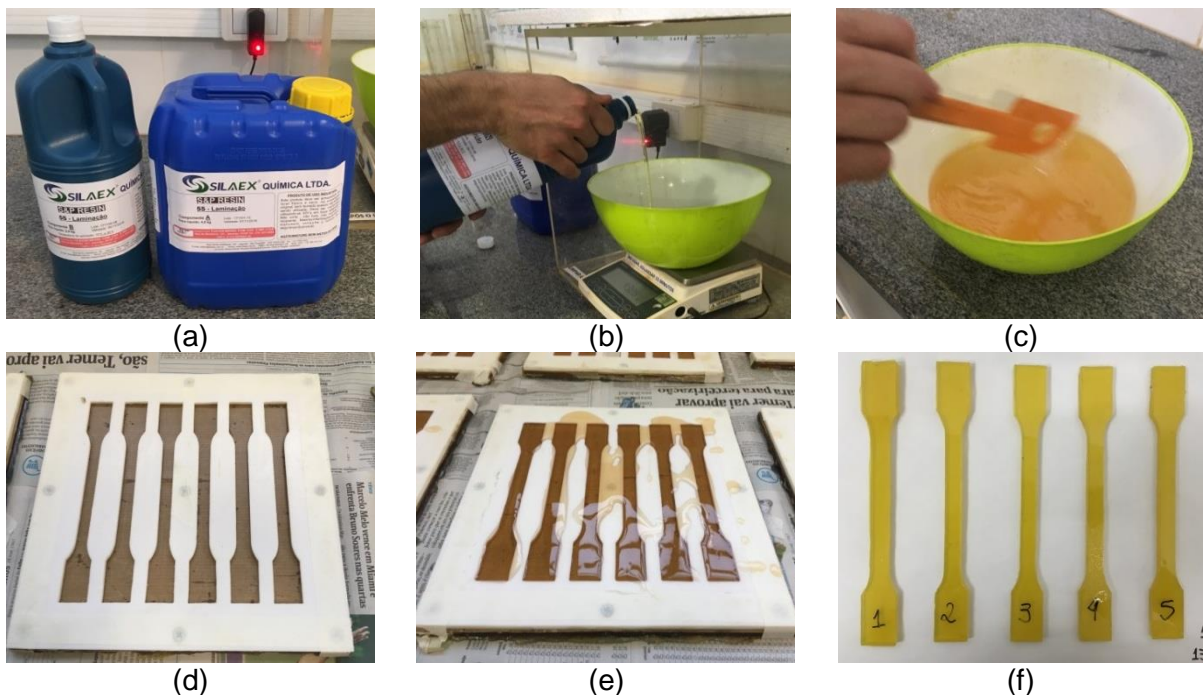
Para moldagem dos corpos de prova de resina epoxídica foi necessária a confecção de moldes de teflon, cuja geometria de reprodução seguiu as dimensões também descritas

na ISO 527-2 (2012). Na Figura 19 é apresentada metodologia utilizada na confecção dos corpos de prova de resina epoxídica.

Para caracterização das propriedades mecânicas das resinas epoxídicas foram realizados ensaios de tração uniaxial, a uma velocidade de aplicação de carga de 2 mm/min, de acordo com os procedimentos descritos na ISO 527-2 (2012). Deste modo, pelo menos cinco corpos de prova de cada resina epoxídica utilizada neste programa experimental (*primer* e laminação) foram moldados e após a cura total (aproximadamente 14 dias após a moldagem) também foram expostos aos mesmos ambientes já apresentados e ensaiados nas idades pré-determinadas.

Os ensaios de caracterização das resinas epoxídicas foram realizados no Laboratório de Polímeros do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da UFSCar. Para tal, utilizou-se uma máquina de ensaios universal da marca Instron, modelo 5569, com velocidade de aplicação de carga de 2 mm/min.

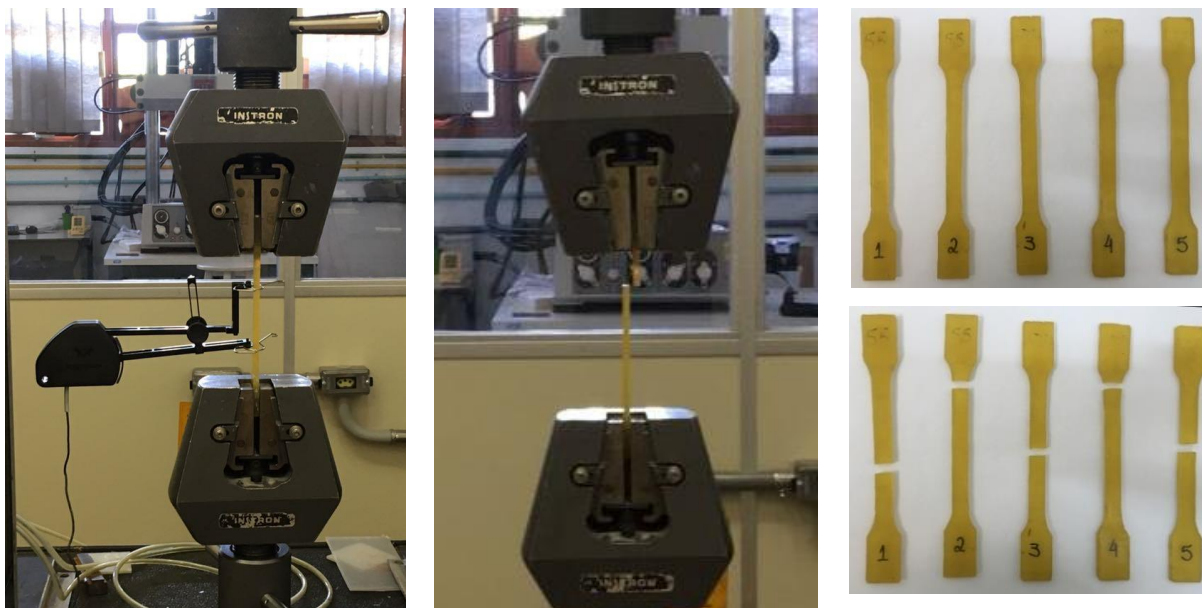
Figura 19: (a) componentes, (b) pesagem dos componentes, (c) mistura manual, (d-e) molde de teflon antes e após o lançamento da resina e (f) corpos de prova de resina



Fonte: O Autor

Para aferição das deformações foi utilizado um extensômetro eletrônico, também da marca Instron, com um comprimento de leitura de 50 mm e uma capacidade máxima e mínima pra leitura da deformação de +500‰ e -50‰, respectivamente, o qual foi instalado no centro dos corpos de prova. A Figura 20 apresenta o arranjo de ensaio e o aspecto final dos corpos de prova após o ensaio.

Figura 20: Ensaio de tração uniaxial das resinas epoxídicas e aspecto dos corpos de prova antes e após o ensaio



Fonte: O Autor

3.1.7 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS DE CFRP

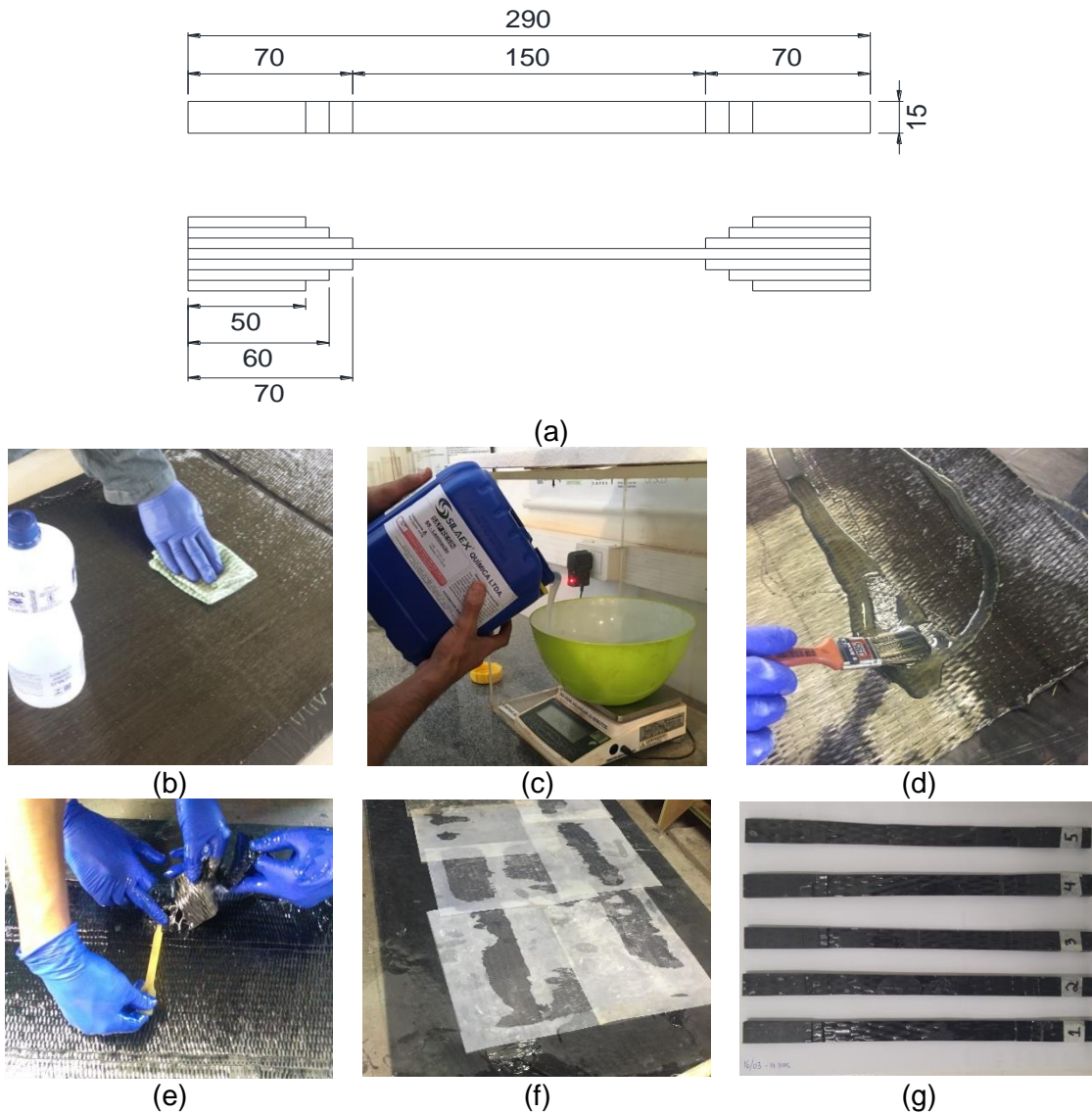
O sistema de fabricação do compósito de CFRP, na qual a fibra e a matriz são fornecidas em separado, é conhecido como sistema curado “*in situ*”. Neste programa experimental, um sistema curado “*in situ*” foi utilizado.

Neste sentido, uma manta de fibra de carbono unidirecional com gramatura de 300 g/m² foi impregnada com resina do tipo epóxi. Segundo o fabricante, esta manta de fibra de carbono possui resistência a tração última de 3800 MPa, módulo de elasticidade de 240 GPa e uma deformação na ruptura de 15,5 %.

Após a cura e ensaio dos corpos de prova de referência, os mesmos foram expostos aos mesmos ambientes já apresentados e ensaiados nas idades pré-determinadas. A Figura 21 apresenta as dimensões dos corpos de prova de compósito de CFRP e a metodologia utilizada na sua confecção.

Com relação à caracterização das propriedades mecânicas do compósito de CFRP, foram realizados ensaios de tração de pelo menos cinco corpos de prova, a uma velocidade de aplicação de carga de 2 mm/min, segundo a recomendação das normas ISO 527-1 (2012) e ISO 527-5 (2012).

Figura 21: (a) dimensões dos corpos de prova. Moldagem: (b) Limpeza da manta de fibra de carbono, (c) preparo da resina epoxídica, (d) laminação do compósito, (e) execução de reforço nas extremidades dos corpos de prova, (f) processo de cura e (g) aspecto final dos corpos de prova.

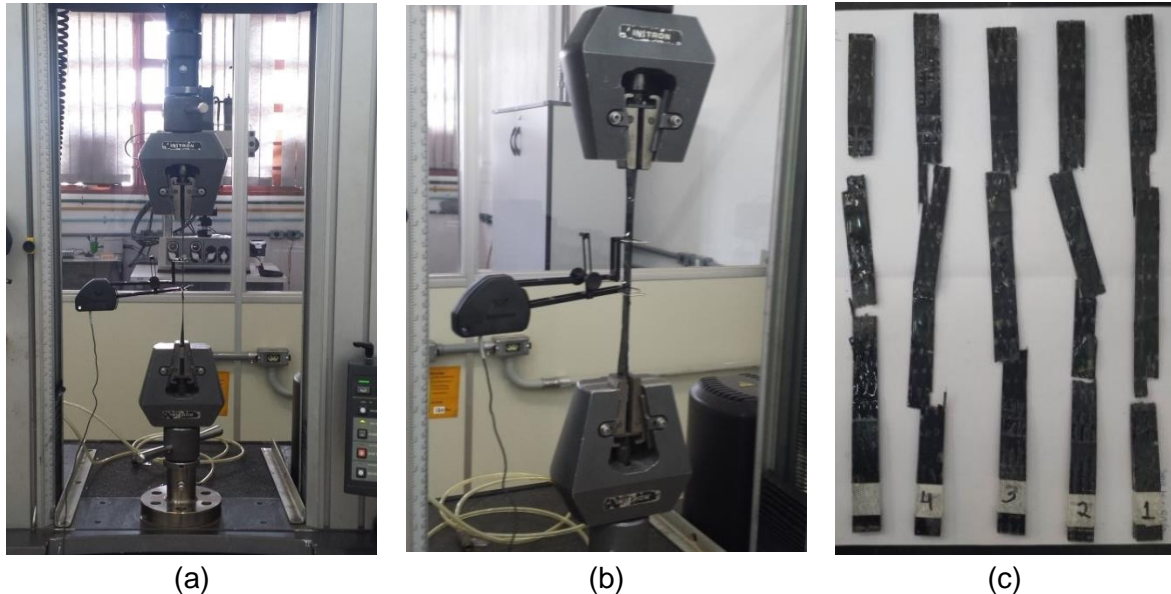


Fonte: O Autor

A Figura 22 apresenta a configuração de ensaio geralmente utilizada na caracterização do comportamento à tração dos compósitos de CFRP para o reforço estrutural e seu respectivo modo de ruptura.

Nos ensaios de caracterização dos compósitos de CFRP também foi utilizado um extensômetro eletrônico com um campo de leitura de 50 mm e uma capacidade de máxima e mínima de deformação de +50% e -5%, respectivamente, instalado no centro dos corpos de prova.

Figura 22: (a) Corpo de prova de manta de CFRP – dimensões em mm e (b) ensaio de tração uniaxial e corpos de prova de CFRP com os respectivos modos de ruptura



Fonte: O Autor

Os ensaios de caracterização dos compósitos de CFRP foram realizados no Laboratório de Polímeros do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da UFSCar. Para tal, utilizou-se a mesma máquina de ensaios universal utilizada para caracterização das resinas epoxídicas, com velocidade de aplicação de carga de 2 mm/min.

3.1.8 DEGRADAÇÃO NATURAL

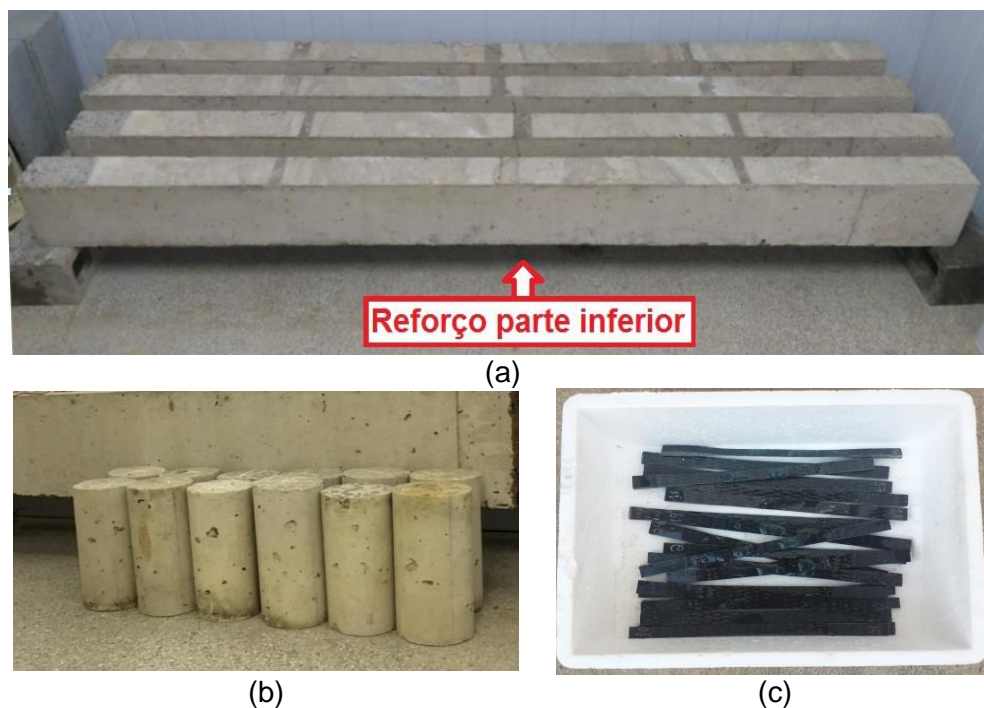
Neste item são apresentados os ambientes de exposição onde os elementos foram mantidos em longo prazo para o estudo da degradação.

Após 14 dias do reforço das vigas de concreto armado (tempo necessário para cura completa da resina epoxídica) e após a moldagem e caracterização dos corpos de prova de referência de concreto, das resinas epoxídicas (resina A e B) e dos compósitos de CFRP, os mesmos foram expostos ao ambiente laboratorial e às intempéries (ambiente externo) com monitorização da temperatura, umidade e radiação UV. Vale ressaltar que durante os 14 dias necessários para a cura completa da resina epoxídica, os elementos foram mantidos em ambiente laboratorial.

Sendo assim, todos os elementos, tanto as vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP quanto os corpos de prova de concreto, resinas epoxídicas e compósitos de CFRP, que não foram expostos a intempéries, mantiveram-se em ambiente laboratorial interno, protegido e com temperatura e umidade monitorizados.

O local escolhido para armazenamento das vigas e dos corpos de prova dos materiais constituintes do sistema de reforço foi uma câmara isolada localizada no interior do Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) da UFSCar. A Figura 23 apresenta o ambiente laboratorial com alguns elementos expostos.

Figura 23: Ambiente laboratorial: (a) vigas de referência reforçadas, (b) corpos de prova de concreto e (c) compósitos de CFRP



Fonte: O Autor

Para exposição dos elementos às intempéries (ambiente externo) foi escolhido um local próximo ao Complexo de Laboratórios Multidisciplinares de Estudos Estratégico e Avançado (COLMEEA) da UFSCar, onde se localiza a estação meteorológica de superfície automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Trata-se de uma área isenta de barreiras ou sombras que possam afetar os ensaios de degradação das vigas reforçadas e dos materiais intervenientes.

A Figura 24 apresenta a localização da área escolhida para exposição dos elementos às intempéries bem como as vigas de concreto armado reforçadas e os materiais constituintes do sistema de reforço (resinas epoxídicas e compósito de CFRP) expostos.

Vale ressaltar que o tipo de degradação abordada neste trabalho foi natural, com os elementos expostas em uma área externa e além do mais, todos os elementos expostos às intempéries não possuíam nenhum tipo de proteção contra agentes ambientes externos. Para a exposição das vigas de concreto, o reforço foi posicionado na parte inferior (Figura 24b), ou seja, sem a incidência direta de agentes agressivos.

Figura 24: (a) área de exposição e (b) vigas de concreto reforçadas expostas à intempéries e (c) resinas e compósitos de CFRP expostos à intempéries



(a)



(b)



(c)

Fontes: Google Maps (2019) e o Autor

3.1.9 CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE – CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPER-GEIGER

Para os elementos expostos às intempéries, o efeito da degradação no sistema de reforço é intensificado devido à ação conjunta de uma série de fatores climáticos (ciclos de gelo-degelo, temperatura, carbonatação, radiação ultravioleta, ciclos de umidade-secagem) característicos de cada região.

A classificação climática de uma determinada região é a tentativa de reunir o maior número de elementos (radiação, precipitação, vento, temperatura) os quais possam caracterizar um determinado ambiente. Para tal, um dos sistemas de classificação climática mais abrangente é o de Köppen-Geiger o qual parte do pressuposto de que a vegetação natural é a melhor expressão de um clima (ROLIM *et al.*, 2007).

Na classificação climática de Köppen-Geiger são consideradas as características sazonais e os valores médios anuais e mensais de temperatura do ar e precipitação.

Consiste basicamente na divisão do clima mundial em cinco grandes grupos climáticos. Esses cinco grandes grupos, incluindo os subgrupos e as subdivisões do clima de determinada região são denotados por um conjunto de letras maiúsculas e minúsculas (SÁ JUNIOR, 2009). A Tabela 9 apresenta as denotações e os tipos climáticos de acordo com o sistema de classificação de Köppen-Geiger.

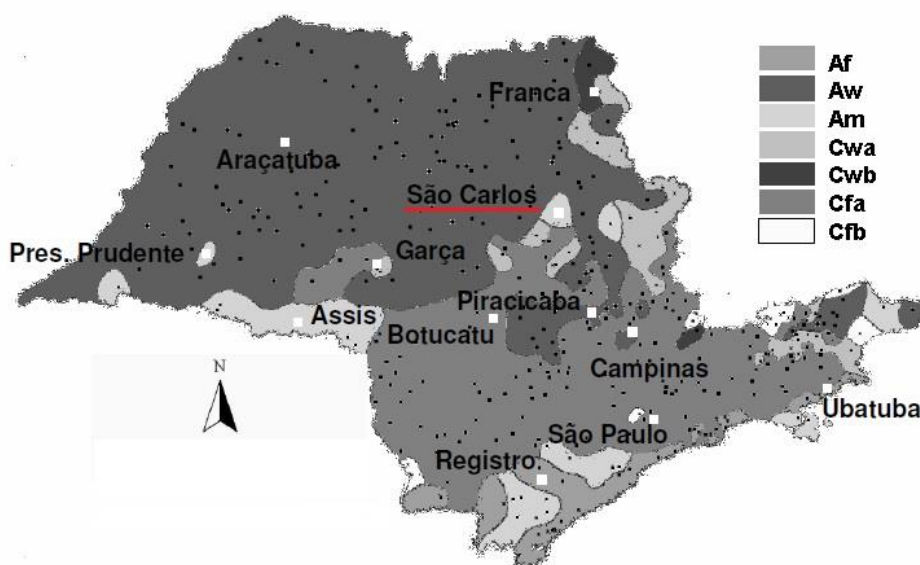
Tabela 9: Classificação climática segundo Köppen-Geiger

Grupos climáticos	Subgrupos climáticos	Subdivisões
A – Tropical chuvoso	f – Tropical úmido	
	m – Tropical de monção	
	w – Tropical de savana com estação seca de inverno	
	s – Tropical com estação seca de verão	
B – Seco	S – Estepes	h – Estepe quente
		k – Estepe moderadamente frio
	W - Deserto	h – Regiões desérticas quentes
		k – Regiões desérticas frias
C – Temperado	f – Úmido sem estação seca	a – Verão quente
		b – Verão moderadamente quente
		c – Verão moderadamente frio e curto
	w – Úmido com chuvas de verão e inverno seco	a – Verão quente
		b – Verão moderadamente quente
		c – Verão curto e moderadamente frio
	s - Úmido com verão seco	a – Verão quente
		b – Verão moderadamente quente
c – Verão curto e moderadamente frio		
D – Continental temperado	f – Frio sem estação de seca	a – Verão quente sem estação de seca
		b – Verão frio sem estação de seca
		c – Verão moderadamente frio sem estação de seca
		d – Inverno intenso sem estação de seca
	w – Frio com inverno seco e chuvas de verão	a – Inverno seco e com verão quente
		b – Inverno seco e com verão moderadamente quente
		c – Inverno seco e com verão moderadamente frio
		d – Inverno seco e intenso
E - Glacial	T – Clima de tundra	
	F – Clima das calotas polares, neve e gelo	

Fonte: Adaptado de Sá Junior (2009)

De acordo com Alvares *et al.* (2013) e seguindo as premissas do sistema Köppen-Geiger, o clima predominante no Brasil é o tropical, cerca de 81,4% do território brasileiro, seguido do clima temperado e clima seco, cerca de 13,7 e 4,9% do território, respectivamente. No estado de São Paulo, segundo Rolim *et al.* (2007), os climas principais são o tropical de savana (Aw) e o temperado quente (Cfa), os quais abrangem grande parte do estado, como pode ser observado na Figura 25.

Figura 25: Classificação climática do estado de São Paulo pelo sistema



Fonte: Rolim *et al.* (2007)

Para a cidade de São Carlos, localizada no estado de São Paulo (com latitude $21^{\circ}57'42''$ (S), longitude $47^{\circ}50'28''$ (W) e altitude de 860 metros), onde os elementos ficaram expostos às intempéries, o clima também foi analisado com base no sistema de Köppen-Geiger. Nesse caso, de acordo com a Empresa Brasileira de Agropecuária (EMBRAPA, 2019) (ver também Figura 25), o clima local considerado é o temperado úmido com inverno seco e verão quente (Cwa).

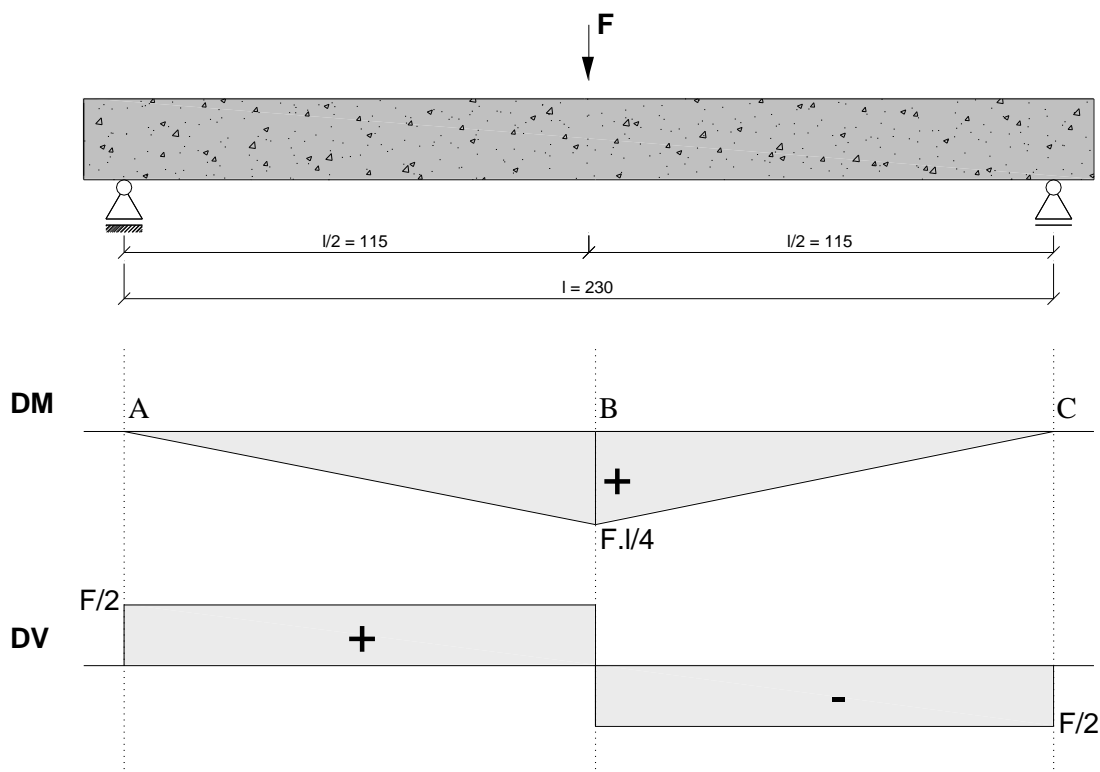
3.2 METODOLOGIA DE ENSAIOS DAS VIGAS

A metodologia de ensaio adotada consistiu no carregamento gradativo até a ruptura das vigas de concreto armado simplesmente apoiadas. Para a análise do comportamento a flexão foram realizados ensaios de flexão em três pontos com aplicação de carga a meio vão das vigas. Este modelo de ensaio permite observar o comportamento de vigas submetidas à flexão simples.

Os ensaios para determinação do comportamento das vigas de concreto armado foram realizados no LSE da UFSCar por meio da mesma máquina de ensaios universal utilizada para caracterização dos corpos de prova de concreto e das barras de aço.

A Figura 26 apresenta o esquema do ensaio de flexão em três pontos e os diagramas de momento fletor e esforço cortante.

Figura 26: Carregamento e diagramas de momento fletor (DM) e esforço cortante (DV)



Fonte: O Autor

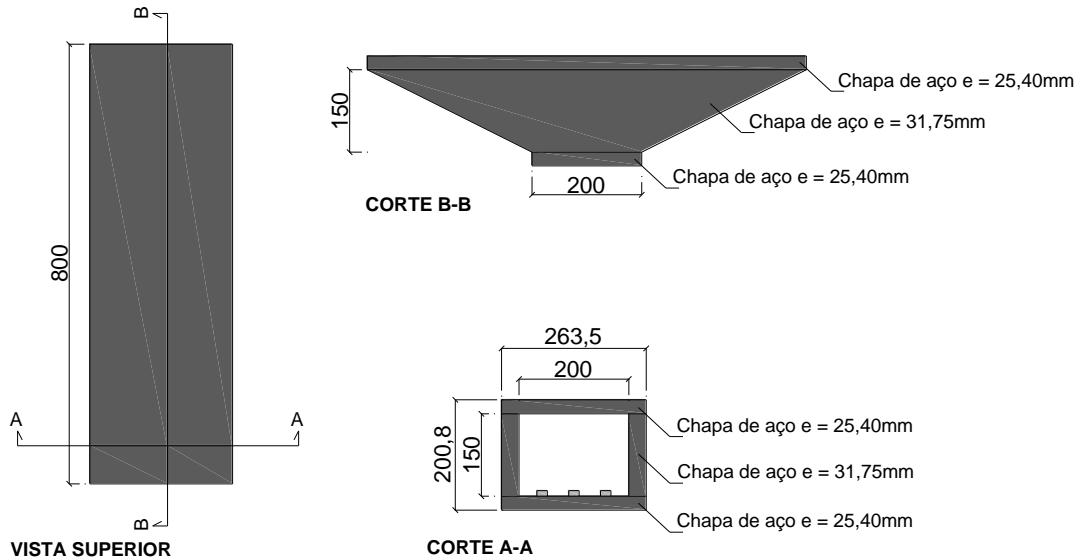
O controle de deslocamento dos ensaios foi realizado pelo transdutor interno do atuador da máquina de ensaios universal, a uma velocidade de 0,5 mm/min. A carga total aplicada foi aferida com recurso a célula de carga da máquina, a qual possui capacidade máxima de carga de 600 kN e resolução de leitura de 0,1 kN.

O deslocamento vertical das vigas foi aferido por intermédio de um transdutor de deslocamento fixado a um suporte externo e posicionado a meio vão das vigas, o qual será detalhado posteriormente.

Para que fosse possível a realização dos ensaios de flexão na máquina universal de ensaios foi necessária a elaboração de um dispositivo que servisse de apoio para as vigas e ao mesmo tempo exercesse esforços contrários ao aplicado pela máquina de ensaios universal. Para tal, foi elaborada uma peça rígida feita com chapas de aço de 31,75 mm e 25,40 mm de espessura (ℓ), a qual serviu de apoio a um perfil metálico W200 x 26,6 com

250 cm de comprimento. A Figura 27 apresenta o projeto com as dimensões da peça rígida de aço.

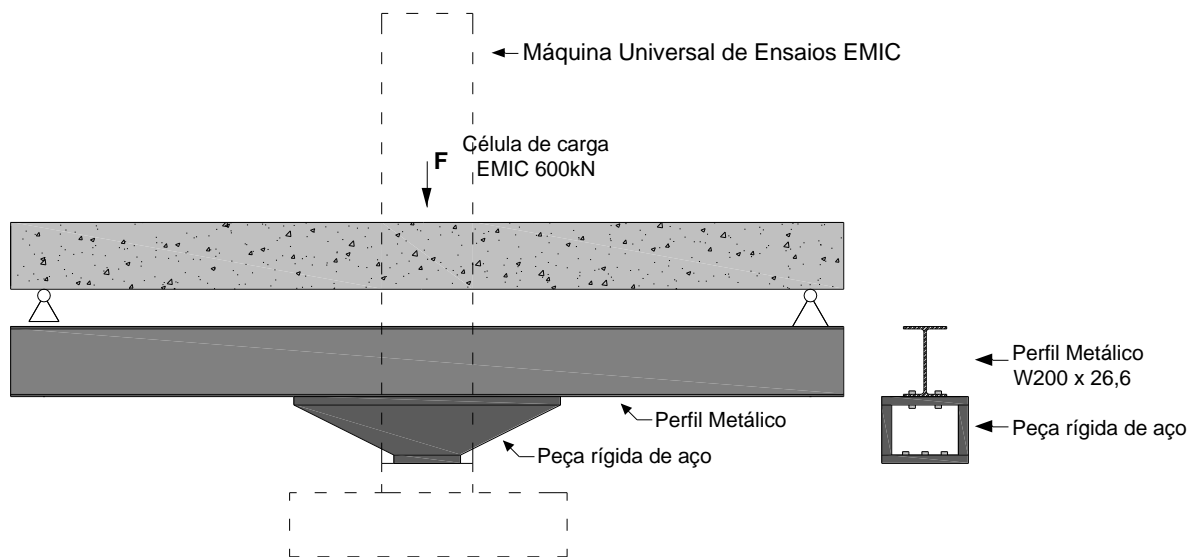
Figura 27: Projeto da peça rígida de aço. Dimensões em mm



Fonte: O Autor

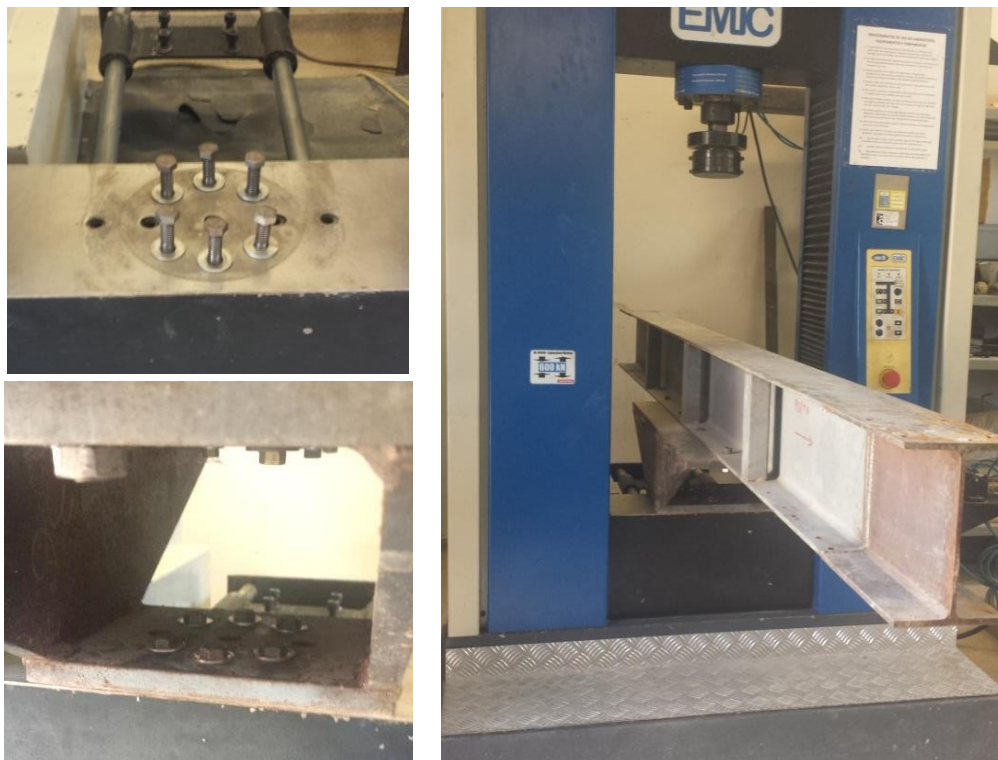
Posteriormente, a peça rígida de aço foi fixada na máquina de ensaios universal por meio de seis parafusos de aço do tipo sextavado M12. Em seguida fixou-se o perfil metálico simetricamente na parte superior da peça rígida com a utilização de oito parafusos de aço do tipo sextavado M10. A Figura 28 apresenta a vista lateral do dispositivo de ensaio e a Figura 29 os detalhes da fixação da peça rígida de aço na máquina de ensaios universal.

Figura 28: Vista lateral do dispositivo de ensaio



Fonte: O Autor

Figura 29: Detalhes da fixação da peça rígida de aço e aspecto final do dispositivo de ensaio



Fonte: O Autor

3.3 INSTRUMENTAÇÃO

O esquema de instrumentação utilizado nos ensaios das vigas de concreto armado consistiu na utilização de transdutores de deslocamento e extensômetros elétricos, os quais foram dispostos conforme apresentado na Figura 30.

Os deslocamentos e as deformações no concreto, armadura longitudinal e compósito de CFRP foram registradas por meio de um sistema de aquisição de dados fabricado pela *LYNX Tecnologia*. Os transdutores de deslocamento e os extensômetros elétricos foram ligados a um aquisitor de dados, modelo ADS-2000, o qual está disponível no LSE da UFSCar.

O deslocamento vertical das vigas foi aferido por meio de um transdutor de deslocamento (LVDT HS50MG4440), da marca *Vishay*, com um campo de leitura de 50 mm ($\pm 0,01$ mm), fixado a um suporte externo e posicionado a meio vão das vigas como citado anteriormente (Figura 30a).

As deformações no concreto foram medidas por meio de um extensômetro elétrico do tipo PA-06-1500BA-120 (resistência de 120Ω e comprimento da grade de leitura de 40 mm),

produzido pela *Excel Sensores*, o qual foi posicionado a meio vão das vigas (SG1) (Figura 30b).

As deformações na armadura longitudinal foram aferidas por meio de extensômetros elétricos do tipo KFG-20-120-C1-11 (resistência de 120Ω e comprimento da grade de leitura de 20 mm) produzidos pela *KYOWA*, o qual foi posicionado na seção da seção central da uma das armaduras longitudinais (SG2) (Figura 30c).

Em relação às deformações do compósito de CFRP foram utilizados extensômetros elétricos do tipo KFG-20-120-C1-11, os mesmos utilizados e armadura longitudinal, e do tipo PA-06-250BA-350 (resistência de 350Ω e comprimento da grade de leitura de 6 mm) também produzidos pela *Excel Sensores*, os quais foram posicionados ao longo do material de reforço (SG3 ao SG5) (Figura 30d). A Figura 31 apresenta detalhes da instrumentação do concreto, armadura longitudinal e compósitos de CFRP.

Figura 30: Instrumentação das vigas: (a) Deslocamento vertical, (b) concreto, (c) armadura longitudinal e (d) compósito de CFRP. Dimensões em cm

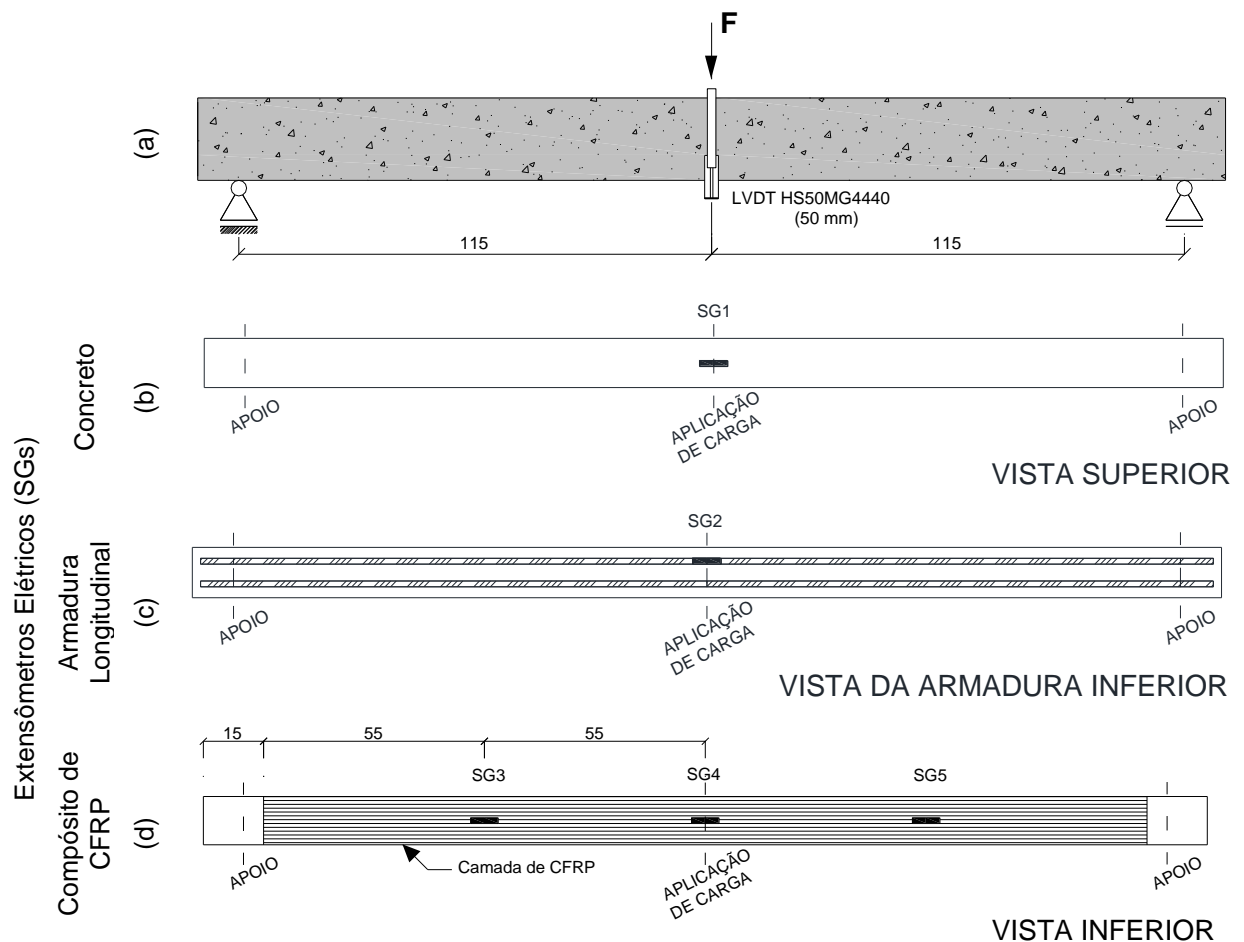
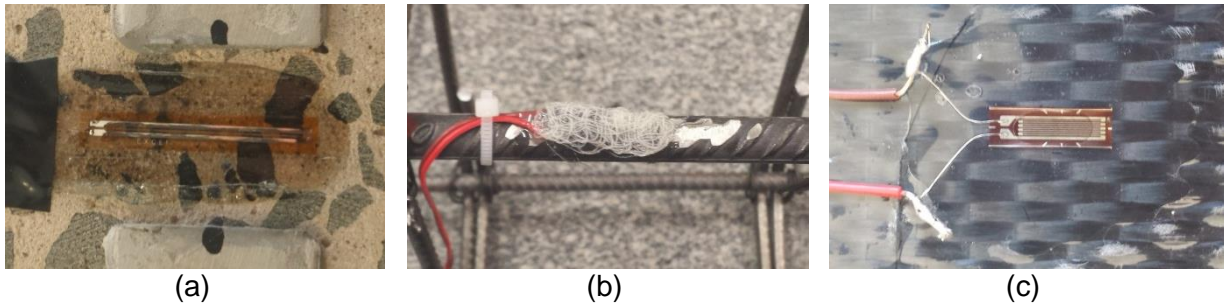


Figura 31: Detalhes da instrumentação do (a) concreto, (b) armadura longitudinal e (c) composto de CFRP



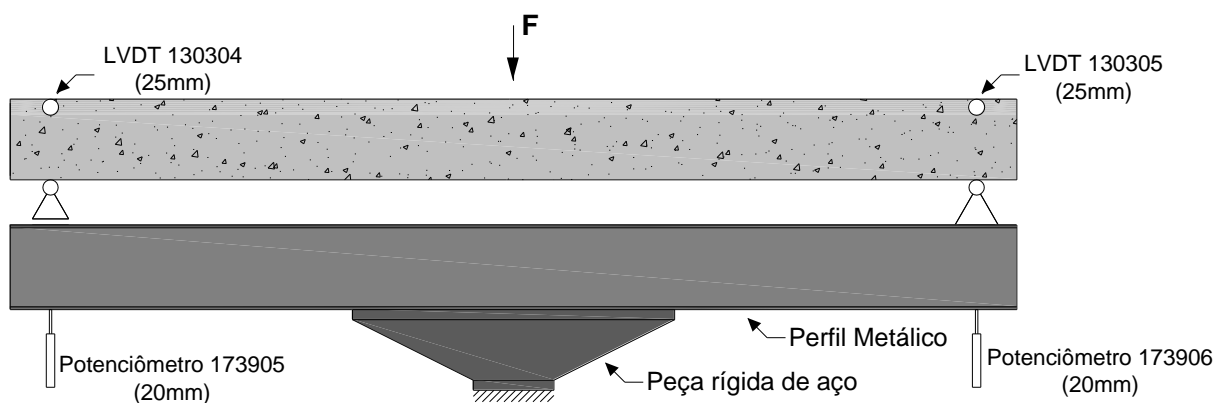
Fonte: O Autor

A rotação dos apoios das vigas de concreto armado ensaiadas também foi aferida. Neste caso, foram utilizados dois transdutores de deslocamentos (LVDT 130304 e 130305), com um campo de leitura de 25 mm ($\pm 0,01$ mm), posicionados nas extremidades laterais das vigas, alinhados com os apoios.

Como o dispositivo de ensaio das vigas de concreto armado consiste de um perfil metálico com as extremidades em balanço (ver Figura 28), potenciômetros foram convenientemente posicionados de modo a aferirem os deslocamentos das extremidades do perfil. Para tal, dois potenciômetros (Potenciômetro 173905 e 173906), com um campo de leitura de 20 mm ($\pm 0,01$ mm), posicionados nas extremidades do perfil metálico e alinhados com os apoios, foram utilizados. Posteriormente, estes deslocamentos foram descontados do deslocamento aferido a meio vão das vigas de concreto armado ensaiadas.

A Figura 32 apresenta a instrumentação adotada para a aferição dos deslocamentos das extremidades do perfil metálico enquanto a Figura 33 os detalhes do posicionamento dos transdutores de deslocamento.

Figura 32: Instrumentação para aferição do deslocamento do perfil metálico e rotação dos apoios



Fonte: O Autor

Figura 33: Detalhe do posicionamento dos transdutores de deslocamento



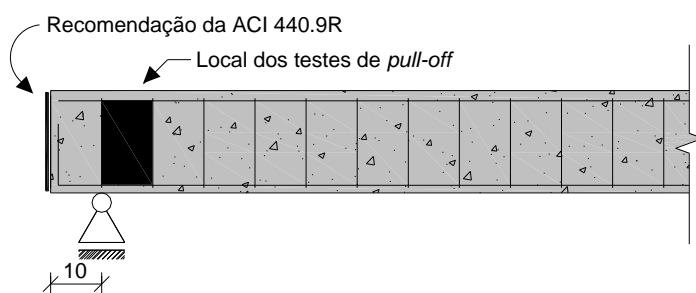
Fonte: O Autor

3.4 ENSAIOS DE *PULL-OFF* (ARRANCAMENTO)

Os ensaios de *pull-off*, no campo da engenharia de reforço estrutural, são utilizados para verificação da tensão de aderência entre os compósitos de FRP e o substrato de concreto, aço ou madeira.

No presente programa experimental, para avaliar a degradação temporal da interface entre o compósito de CFRP e o substrato de concreto, ensaios de *pull-off* foram conduzidos nas idades pré-determinadas apresentadas na Tabela 7. Os ensaios foram realizados nas faces laterais das vigas de concreto armado, perpendicularmente à direção das fibras, conforme ilustrado na Figura 34, devido a inexistência de armadura e por não apresentar um quadro fissuratório após a execução dos ensaios de flexão nesta região. Além disso, a realização do ensaio de *pull-off* nas extremidades das vigas, conforme recomenda a ACI 440.9R (2015), não foi possível devido a existência da armadura de ancoragem nesta região de apoios.

Figura 34: Local de realização dos testes de *pull-off*



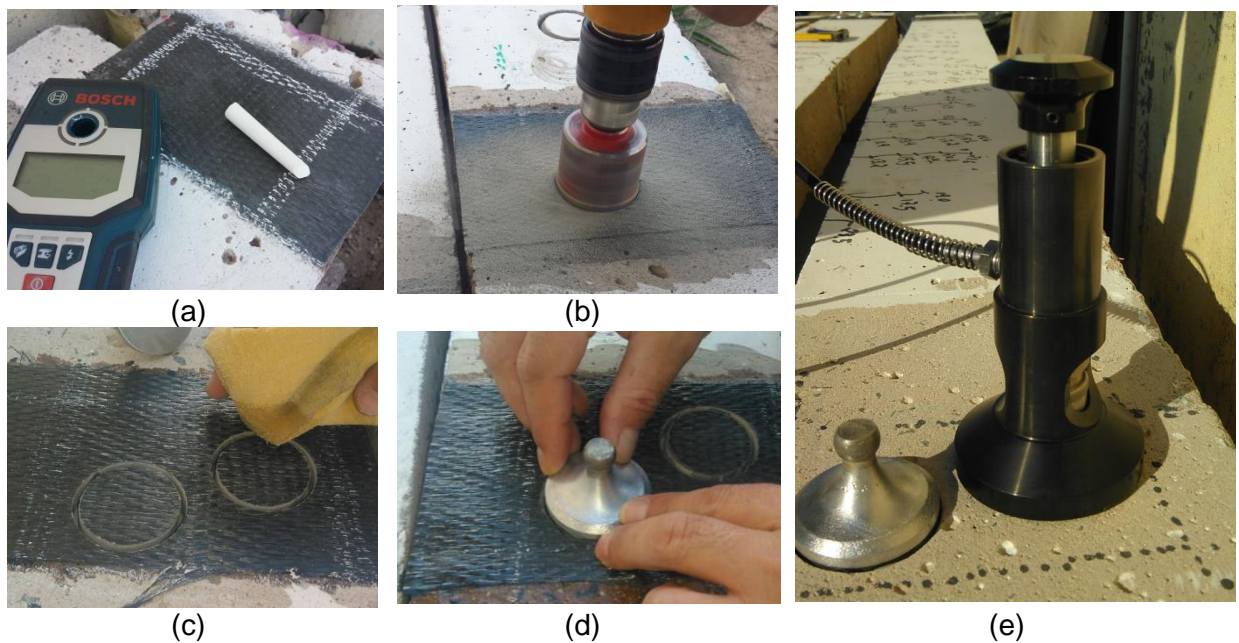
Fonte: O Autor

Um equipamento de *pull-off* da marca *DeFelsko*, modelo ATM50, disponível no LSE da UFSCar, foi utilizado nos ensaios de arrancamento. Este aparelho possui um campo de leitura, para a pastilha de 50 mm, de 0,4 a 3,3 MPa e uma precisão de 0,01 MPa. A aplicação de carga do mesmo é realizada manualmente. Os ensaios foram realizados seguindo as premissas básicas da norma ASTM D7522 (2015).

Neste âmbito, inicialmente realizou-se a pacometria para verificação do real posicionamento de armadura e demarcação de uma área para colagem do compósito de CFRP a ser ensaiado. A colagem do compósito obedeceu ao mesmo procedimento já apresentado e utilizado para o reforço à tração das vigas. Nas idades pré-definidas procedeu-se a realização de cortes circulares, com uma profundidade de 2 cm, como auxílio de uma serra copo. Posteriormente fez-se colagem de pastilhas de alumínio, com diâmetro de 50 mm, ao substrato de CFRP com o auxílio de um adesivo estrutural a base de epóxi (nomeadamente *Compound Adesivo*).

Após a colagem e cura do adesivo, a pastilha de alumínio foi fixa ao aparato mecânico do equipamento de *pull-off* e a aplicação da força de tração foi então realizada pela reação de apoio do aparato do equipamento à viga de concreto. A leitura da força de tração foi feita por meio de um visor digital presente no equipamento. A Figura 35 exemplifica a metodologia básica utilizada para a execução dos ensaios de *pull-off*.

Figura 35: (a) pacometria para demarcação da área, (b) preparação dos cortes, (c) limpeza da superfície, (d) colagem das pastilhas e (e) aparato de engate do equipamento de *pull-off*



Fonte: O Autor

3.5 MONITORIZAÇÃO DA TEMPERATURA, UMIDADE E RADIAÇÃO

Durante o período de exposição das vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP e dos corpos de prova de concreto, resina epoxídica e compósito de CFRP, foram realizadas as monitorizações da temperatura, umidade e radiação.

Para os elementos mantidos em ambiente laboratorial (interno e protegido) a temperatura e umidade foram monitoradas por meio da utilização da plataforma eletrônica de código aberto Arduíno.

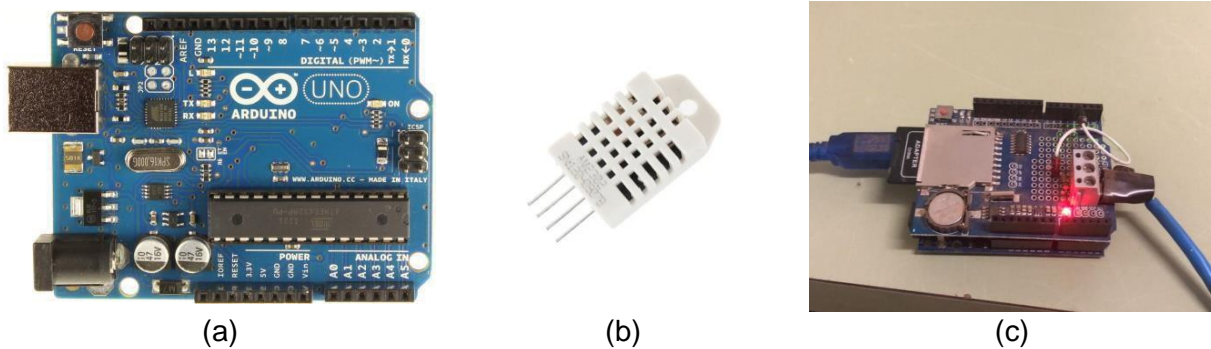
A plataforma Arduíno surgiu na Itália em 2005 no intuito de incentivar a programação e prototipagem a um baixo custo. Trata-se de uma plataforma aberta *open source* de prototipagem eletrônica projetada com um microcontrolador e programável via USB por meio de uma IDE (*Integrated Development Environment*, em língua inglesa). Ela é composta por *hardware* (placa controladora) e *software* (ambiente de desenvolvimento) os quais são baseados em circuitos simples de entrada e saída e uma fonte reguladora de tensão. São utilizados principalmente nas áreas de automação e robótica (SILVA *et al.*, 2014; BAIÃO, 2016).

A plataforma Arduíno possui linguagem de programação baseada em C/C++, a qual possibilita a criação de diversas operações de entrada e saída. Sua principal função em um sistema interativo é facilitar sua prototipagem e execução (BARELLA, MOURA JUNIOR e BORGES, 2016).

Para este trabalho, a plataforma Arduíno e os sensores utilizados foram desenvolvidos e calibrados em um estudo realizado por Escobal (2017), em que a autora utilizou a plataforma para aferir a temperatura e umidade de adesivos epoxídicos expostos a intempéries (ambiente externo). O projeto foi desenvolvido na linguagem de programação C/C++ com o auxílio de uma plataforma eletrônica de código aberto Arduíno e sensores do tipo DHT22. Após a programação das rotinas e instalação dos sensores na plataforma Arduíno, foi feita a sua validação por meio da comparação dos valores com um termohigrômetro. A gravação dos dados de temperatura e umidade foram realizadas por meio de um módulo de cartão SD.

Neste âmbito, o projeto de *data logger* baseado em plataforma Arduíno desenvolvido por Escobal (2017) foi utilizado nesse trabalho para aferir a temperatura e umidade do ambiente laboratorial. A Figura 36 apresenta os componentes da plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto Arduíno.

Figura 36: (a) plataforma de prototipagem eletrônica, (b) sensor de temperatura e umidade do tipo DHT22 e (c) sensor em funcionamento.



Fonte: Escobal (2017)

Para os elementos expostos às intempéries (ambiente externo) os dados de temperatura, umidade e radiação UV foram monitorizados por meio da estação meteorológica de observação de superfície automática localizada na UFSCar, área norte. A estação meteorológica, nomeadamente São Carlos-A711, possui as seguintes coordenadas geográficas: latitude -21.980353° e longitude -47.883927° . A mesma está localizada a uma altitude de 859 metros.

Como citado anteriormente, os corpos de prova foram alocados no interior dessa estação. A estação possui uma unidade de memória central conectada a vários sensores dos parâmetros meteorológicos que disponibilizam automaticamente os dados de temperatura, umidade e radiação UV a cada hora. A captação dos dados meteorológicos foi realizada por meio eletrônico, pelo *site* do INMET.

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística é a ciência comumente utilizada para organização de informações, análise e interpretação de dados coletados e divulgação de resultados.

Neste trabalho, a análise estatística dos resultados obtidos nos ensaios dos materiais constituintes do sistema de reforço foi realizada no intuito de obter uma melhor compreensão dos resultados. Apenas uma análise dos resultados médios obtidos nos ensaios após a exposição dos corpos de prova pode levar a uma interpretação errônea dos dados obtidos.

Foram analisados os resultados de tensão máxima e módulo de elasticidade obtidos nos ensaios das resinas epoxídicas do tipo *primer*, de laminação e do compósito de CFRP de referência, com 7 e 14 dias de cura, e após exposição por 4 e 8 meses em ambiente laboratorial e a intempéries (ver Tabela 8).

Para tal, realizou-se o teste de Tukey ao nível de 5% de significância para comparar e ranquear as médias e, determinar os intervalos com diferenças entre os períodos de realização dos ensaios.

Nos gráficos apresentados para o teste de Tukey, A representa a primeira maior média obtida para as propriedades mecânicas avaliadas, B a segunda maior média e assim sucessivamente, em que as letras iguais implicam em períodos distintos de realização dos ensaios com médias estatisticamente equivalentes. Para a realização do teste de Tukey foi utilizado o software *Origin*, versão 2018, desenvolvido pela *Originlab*.

Nota-se ainda que foi utilizada uma confiabilidade de 95% para os intervalos de confiança das médias apresentadas.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados e análises dos ensaios de caracterização dos materiais (aço, concreto, resinas epoxídicas e compósito de CFRP) e de flexão em três pontos realizados nas vigas de concreto armado de referência, sem e com reforço, e expostas em ambiente laboratorial (interno, protegido) e a intempéries (ambiente externo).

4.1 DADOS METEOROLÓGICOS

Como citado anteriormente na metodologia, a temperatura, umidade e radiação UV dos ambientes (laboratorial e intempéries) foram monitorizados durante todo o período de exposição dos elementos.

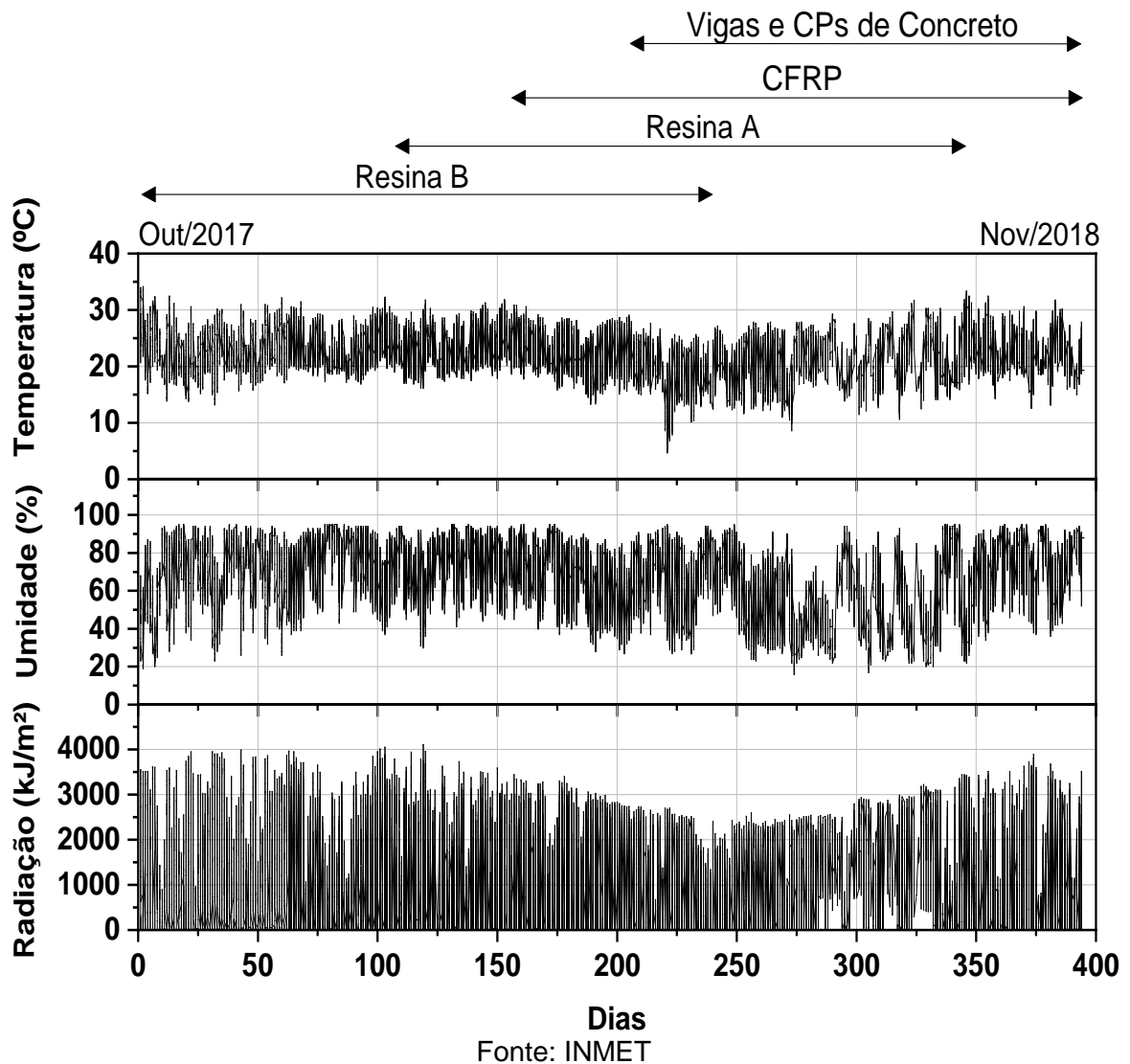
Sendo assim, a temperatura e umidade média do ambiente laboratorial, aferida pela plataforma Arduino e sensor do tipo DHT22, foi de 23,3°C ($\pm 0,03\%$) e 36,5% ($\pm 0,24\%$), respectivamente. Nota-se que os valores em parênteses representam o Coeficiente de Variação (COV) das amostras, onde $COV = (\text{Desvio Padrão}/\text{Média}) \times 100$.

Para a exposição às intempéries (ambiente externo), a Figura 37 apresenta os dados de temperatura, umidade e radiação UV ao longo do período de exposição das resinas epoxídicas, compósitos de CFRP, vigas e corpos de prova de concreto.

O período de exposição considerado nesta pesquisa para a Resina A, Resina B, compósito de CFRP, vigas/corpos de prova de concreto abrange os meses de janeiro a setembro de 2018, outubro de 2017 a junho de 2018, março a novembro de 2018 e maio a novembro de 2018, respectivamente.

Durante esses períodos de exposição às intempéries, os valores máximos e mínimos de temperatura, umidade e radiação UV foram relativamente semelhantes, sendo assim, verificou-se temperaturas máximas e mínimas de 34,2 e 4,7°C e umidades máximas e mínimas de 95 e 16%, respectivamente. Em relação a radiação UV a estação meteorológica superfície registou um pico de 4112 kJ/m² e uma radiação média de 788 kJ/m² ao longo dos períodos de exposição.

Figura 37: Dados meteorológicos para a exposição às intempéries



4.2 MATERIAIS

4.2.1 CONCRETO

Para determinação da resistência a compressão do concreto foram utilizados cinco corpos de prova, dentre os quais três serviram para determinação do módulo de elasticidade. Os corpos de prova foram ensaiados aos 28 dias e à data de realização dos ensaios das vigas, especificamente aos 200 e 418 dias.

A Tabela 10 apresenta as propriedades mecânicas médias do concreto de referência e nas distintas idades de ensaio após exposição em ambiente laboratorial e a intempéries.

Tabela 10: Propriedades mecânicas do concreto

Ambientes de exposição	Idade (Dias)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
REF	28	22,0 (3,50)*	29,3 (7,03)
	200	28,5 (0,54)	31,6 (5,32)
LAB	418	27,4 (0,50)	31,2 (2,87)
WEA	418	25,2 (6,94)	28,5 (3,06)

* (valor) Coeficiente de Variação (COV) = (Desvio-padrão/Média) × 100

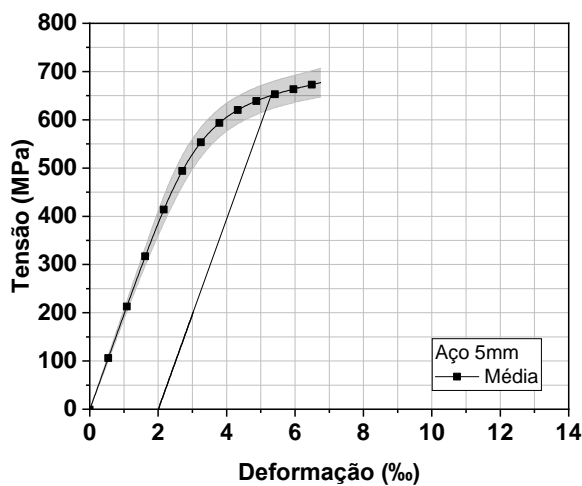
Fonte: O Autor

4.2.2 AÇO

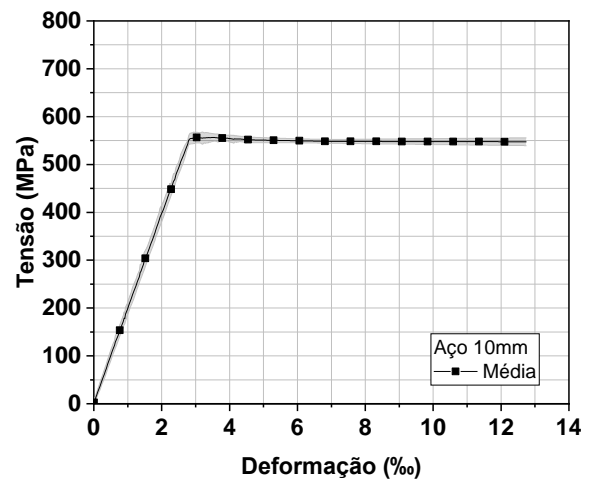
A Figura 38 apresenta os diagramas tensão *versus* deformação do aço utilizado nas vigas de concreto armado. Para as barras com 5 mm de diâmetro (Figura 38a) verificou-se um comportamento típico para o aço do tipo CA-60, sem um patamar de escoamento bem definido.

Já para as barras com 10 mm de diâmetro (Figura 38b), o comportamento foi característico do aço CA-50, com patamar e resistência de início de escoamento bem caracterizados no diagrama.

Figura 38: Diagrama tensão *versus* deformação das barras de aço: (a) aço 5 mm CA-60 e (b) aço 10 mm CA-50



(a)



(b)

Fonte: O Autor

A Tabela 11 apresenta as propriedades mecânicas das barras de aço (tensão e deformação de escoamento, módulo de elasticidade e tensão última), as quais foram determinadas por meio de ensaios experimentais.

Tabela 11: Resumo das propriedades mecânicas do aço utilizado.

Diâmetro (mm)	Tensão de escoamento (MPa)	Deformação no escoamento (‰)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão última (MPa)
5	646,8 (4,04)*	2,0	191,3 (7,19)	670,6 (3,62)
10	547,4 (2,13)	2,8 (1,59)	196,9 (1,58)	662,6 (1,40)

* (valor) Coeficiente de Variação (COV) = (Desvio-padrão/Média) x 100

Fonte: O Autor

4.2.3 MATERIAIS CONSTITUINTES DO SISTEMA DE REFORÇO

O comportamento das resinas epoxídicas do tipo *primer* e de laminação, Resinas A e B, respectivamente, e dos compósitos de CFRP, após exposição em ambiente laboratorial e às intempéries, foi analisado por meio de diagramas de tensão *versus* deformação dos valores médios obtidos nos ensaios de tração.

A Tabela 12 apresenta as propriedades mecânicas das resinas epoxídicas e dos compósitos de CFRP obtidas para os corpos de prova de referência com 7 e 14 dias de cura, e após 4 e 8 meses de exposição aos ambientes, enquanto a Figura 39 apresenta os diagramas de tensão média *versus* deformação dos corpos de prova.

Nota-se que os diagramas individuais de tensão média *versus* deformação dos corpos de prova, para cada idade de ensaio, se encontram no Apêndice B deste trabalho.

Analisando os resultados da Tabela 12 e Figura 39 nota-se que, embora o fabricante indique um tempo de cura de 7 dias, percebe-se que os materiais continuaram a apresentar aumento de resistência e rigidez aos 14 dias de cura.

Para a Resina A (Figura 39a) mantida em ambiente laboratorial, e levando em consideração os 14 dias de cura, nota-se que aos 4 meses o material apresentou um pequeno incremento de tensão máxima e módulo de elasticidade (5,7% e 4,5%, respectivamente). Após 8 meses de exposição e tomando-se os resultados dos ensaios realizados aos 14 dias como referência, não houve grande alteração da tensão de tração máxima do *primer*, apresentando uma pequena redução de 2,9%. Entretanto, uma redução de 9,1% no módulo de elasticidade foi verificada nos ensaios.

Verifica-se, também, uma pequena redução na ductilidade dos corpos de prova após os 8 meses de exposição em ambiente laboratorial. Logo, não foram verificadas mudanças expressivas quanto ao modo de ruptura e comportamento tensão-deformação ao longo do período de exposição em ambiente laboratorial. Verifica-se a presença de um trecho inicial elástico-linear e, posteriormente, de um trecho plástico, o qual é seguido da ruptura dos corpos de prova.

Considerando a exposição às intempéries da Resina A (Figura 39b), nota-se que aos 4 meses exposição, tendo como referência os ensaios realizados aos 14 dias, ocorreu uma redução de 39,1% na resistência a tração e 4,5% no módulo de elasticidade. Aos 8 meses de exposição, foi verificado uma redução mais acentuada da resistência à tração (cerca de 51,0%) enquanto o módulo de elasticidade apresentou uma redução de 9,1%. Verifica-se, também, para ambas as idades, a redução da ductilidade das amostras com alteração no modo de ruptura de dúctil para frágil.

Em relação a Resina B mantida em ambiente laboratorial (Figura 39c) verifica-se que, até os 4 meses de exposição, os corpos de prova não apresentaram grandes alterações em suas propriedades mecânicas (redução de apenas cerca de 3,1% da resistência a tração). No entanto, após os 8 meses, houve uma considerável redução de 23,8 e 19,2% na resistência à tração e no módulo de elasticidade, respectivamente.

Essa redução na resistência a tração e no módulo de elasticidade não alterou o comportamento do diagrama tensão-deformação e a tensão máxima continuou sendo atingida com deformações muito próximas. Nota-se ainda que aos 7 dias de cura a resistência a tração já apresentou-se próxima ao obtido na cura completa indicada pelo fabricante (14 dias).

Para a exposição às intempéries da Resina B (Figura 39d), nota-se que aos 7 e 14 dias de exposição os diagramas tensão-deformação não apresentaram grandes mudanças, apenas um pequeno incremento da tensão máxima. Após os 4 meses de exposição verificou-se notáveis perdas em suas propriedades mecânicas, com uma redução em sua resistência a tração e módulo de elasticidade de 63,3% e 9,1%, respectivamente. Aos 8 meses de exposição a resistência a tração máxima reduziu bruscamente (cerca de 69,2%), enquanto o módulo de elasticidade apresentou uma redução de 18,2%. Observa-se, também, redução da ductilidade para ambas as idades de exposição com alteração no modo de ruptura, o qual ocorre de maneira brusca e sem nenhum trecho de plastificação.

Diferentemente da Resina A, a Resina B apresentou uma considerável perda em suas propriedades mecânicas após os 8 meses de exposição em ambiente laboratorial. Outra divergência entre as resinas epoxídicas está relacionado às suas propriedades mecânicas obtidas aos 14 dias de cura. Nota-se que tanto a resistência a tração quanto o módulo de elasticidade da Resina B foram superiores (cerca de 16%) aos da Resina A considerando-se o tempo de cura equivalente.

Para os compósitos de CFRP (Figuras 39e e 39f) verifica-se que os corpos de prova apresentaram um comportamento elástico linear até sua ruptura, típico de materiais frágeis. Com relação sua exposição em ambiente laboratorial (Figura 39e), nota-se uma maior

variação no comportamento dos corpos de prova após as idades de 4 e 8 meses. Nota-se também que uma maior redução da resistência à tração dos corpos de prova ocorreu após os 4 meses de exposição (redução de cerca de 15% da resistência a tração). Para esse mesmo período verificou-se uma pequena redução de 1,73% do módulo de elasticidade. Após os 8 meses de exposição, os corpos de prova do compósito de CFRP voltaram a ganhar resistência e apresentaram uma menor perda na resistência a tração, cerca de 11%, enquanto o módulo de elasticidade reduziu apenas 3,3%.

A deformação última também apresentou reduções de 14 e 7% ao longo dos 4 e 8 meses de exposição em ambiente laboratorial, respectivamente. Verifica-se que uma maior perda ocorreu nos ensaios realizados aos 4 meses de exposição.

Para a exposição às intempéries dos compósitos de CFRP (Figura 39f) e tomando-se como referência os ensaios realizados aos 14 dias, foi verificada uma redução da resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação última de 18, 4,9 e 13,3%, respectivamente, após 4 meses de exposição.

Para a idade de 8 meses, os corpos de prova do compósito de CFRP apresentaram reduções de 1,4, 1,3 e 0,7% na resistência a tração, módulo de elasticidade e deformação última, respectivamente. Verifica-se, mais uma vez, a grande variação no comportamento das amostras para as idades analisadas.

Apesar das propriedades dos compósitos de CFRP apresentarem reduções ao longo do tempo de exposição, essas oscilações não significam diretamente que o material sofreu degradação. É importante sempre verificar o coeficiente de variação nas propriedades das amostras, que, como foi citado, apresenta grande variação. Uma análise estatística dos valores é realizada a seguir no item 4.2.4 deste capítulo.

Em relação a fibra de carbono utilizada neste trabalho, o fabricante apresenta em seu catálogo técnico os valores de tensão, módulo de elasticidade e deformação da fibra individual, e não do compósito. Neste sentido, os valores experimentalmente obtidos aos 14 dias de cura foram 20,5 e 21,1% inferiores a tensão de tração e deformação característica da fibra, respectivamente, e 3,27 % superior ao módulo de elasticidade.

A Figura 40 apresenta o relatório fotográfico dos modos de ruptura das resinas epoxídicas (do tipo *primer* e de laminação) e dos compósitos de CFRP após a realização dos ensaios de tração uniaxial.

Note-se que ao longo do período de exposição às intempéries a coloração dos corpos de prova das resinas epoxídicas, tanto do tipo *primer* quanto de laminação, apresentou uma pequena variação. Aos 14 dias de cura verifica-se uma coloração amarela

mais clara enquanto os corpos prova com 8 meses de exposição apresentam uma coloração mais escura, com um amarelo mais turvo.

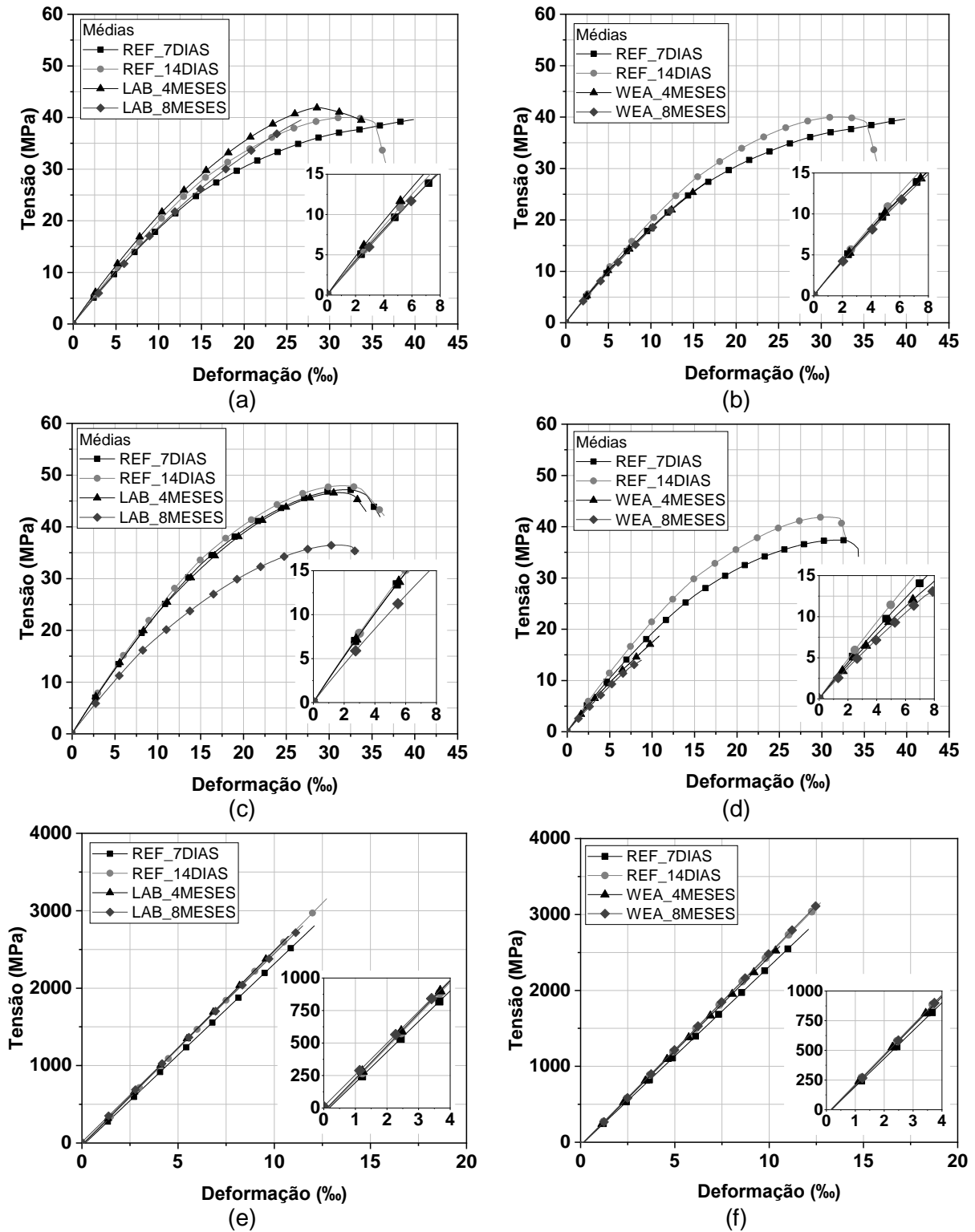
Tabela 12: Resumo das propriedades mecânicas das resinas epoxídicas (Resina A e Resina B) e dos compósitos de CFRP expostos em ambiente laboratorial e às intempéries

Tipo de ensaio	Material	Ambientes de exposição	Idade de exposição ao ambiente	Tensão máxima (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Previsão de deformação última (‰)
Ambiente laboratorial	Resina A	REF	7 dias	35,8 (6,11)	2,1 (10,20)	-----
			14 dias	40,2 (3,84)	2,2 (10,54)	
		LAB	4 meses	42,5 (4,73)	2,3 (9,15)	
			8 meses	39,0 (10,09)	2,0 (7,29)	
	Resina B	REF	7 dias	47,3 (2,51)	2,5 (6,07)	-----
			14 dias	48,2 (3,12)	2,6 (6,22)	
		LAB	4 meses	46,7 (1,12)	2,6 (4,48)	
			8 meses	36,7 (5,27)	2,1 (3,05)	
	Compósitos de CFRP	REF	7 dias	2906,2 (6,29)	226,4 (12,48)	12,9 (9,08)
			14 dias	3153,2 (3,21)	248,1 (7,79)	12,8 (10,11)
		LAB	4 meses	2672,0 (17,91)	243,8 (3,34)	11,0 (20,36)
			8 meses	2806,1 (6,30)	239,8 (17,65)	11,9 (15,47)
Exposição às intempéries	Resina A	REF	7 dias	35,8 (6,11)	2,1 (10,20)	-----
			14 dias	40,2 (3,84)	2,2 (10,54)	
		WEA	4 meses	24,5 (2,43)	2,1 (0,21)	
			8 meses	19,7 (15,15)	2,0 (5,12)	
	Resina B	REF	7 dias	36,7 (2,98)	2,1 (7,27)	-----
			14 dias	42,2 (2,59)	2,2 (6,96)	
		WEA	4 meses	15,5 (16,58)	2,0 (3,55)	
			8 meses	13,0 (6,39)	1,8 (8,26)	
	Compósitos de CFRP	REF	7 dias	2906,2 (6,29)	226,4 (12,48)	12,9 (9,08)
			14 dias	3153,2 (3,21)	248,1 (7,79)	12,8 (10,11)
		WEA	4 meses	2583,9 (13,96)	236,0 (10,44)	11,1 (21,51)
			8 meses	3108,6 (5,45)	244,8 (1,92)	12,7 (7,32)

* (valor) Coeficiente de Variação (COV) = (Desvio-padrão/Média) × 100

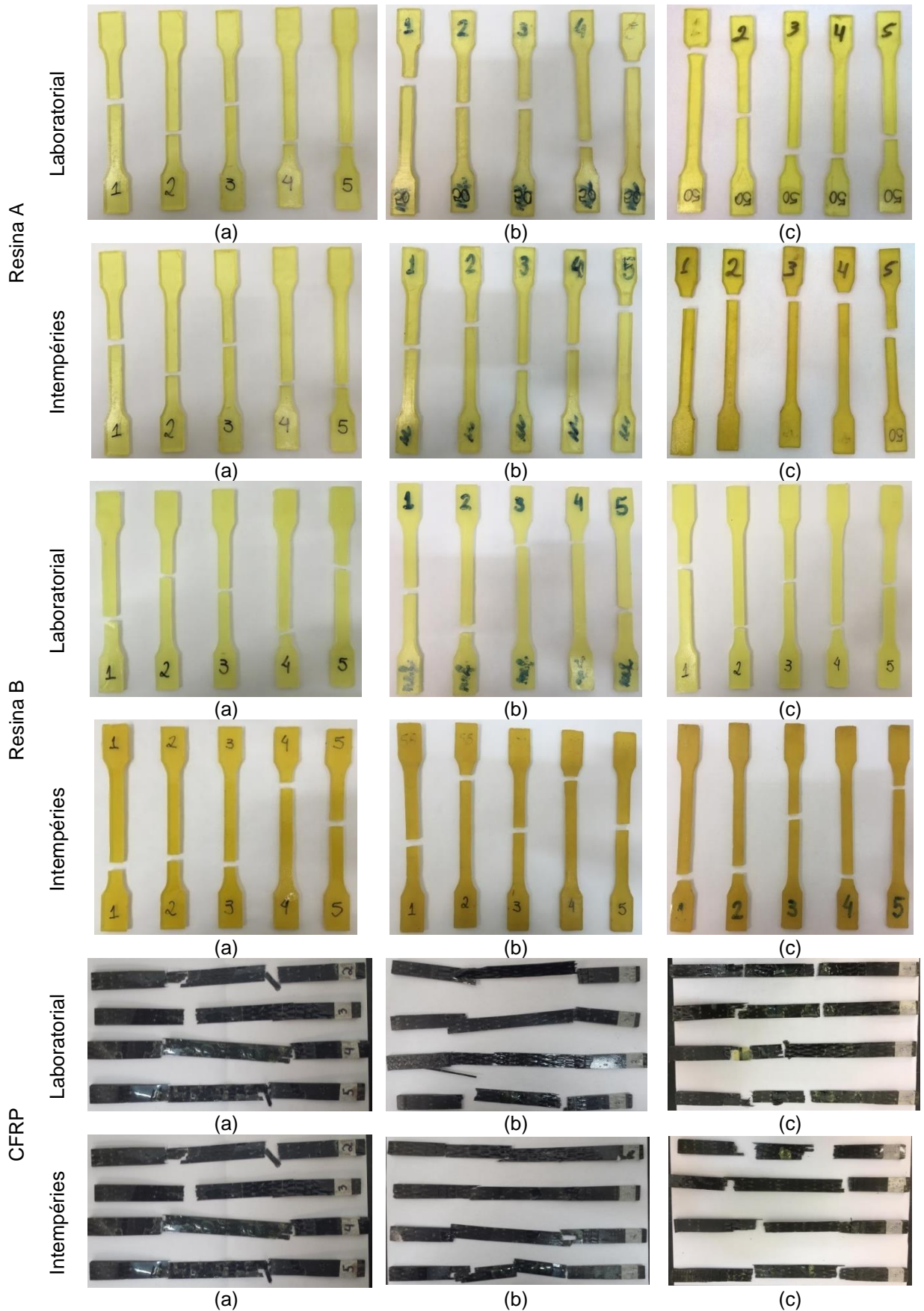
Fonte: O Autor

Figura 39: Comparação entre os diagramas de tensão média versus deformação da (a-b) resina A (*primer*), (c-d) resina B (laminação) e (e-f) compósitos de CFRP mantidos em ambiente laboratorial e expostos às intempéries



Fonte: O Autor

Figura 40: Relatório fotográfico das resinas epoxídicas e dos compostos de CFRP: (a) 14 dias de cura, (b) 4 meses de exposição e (c) 8 meses de exposição

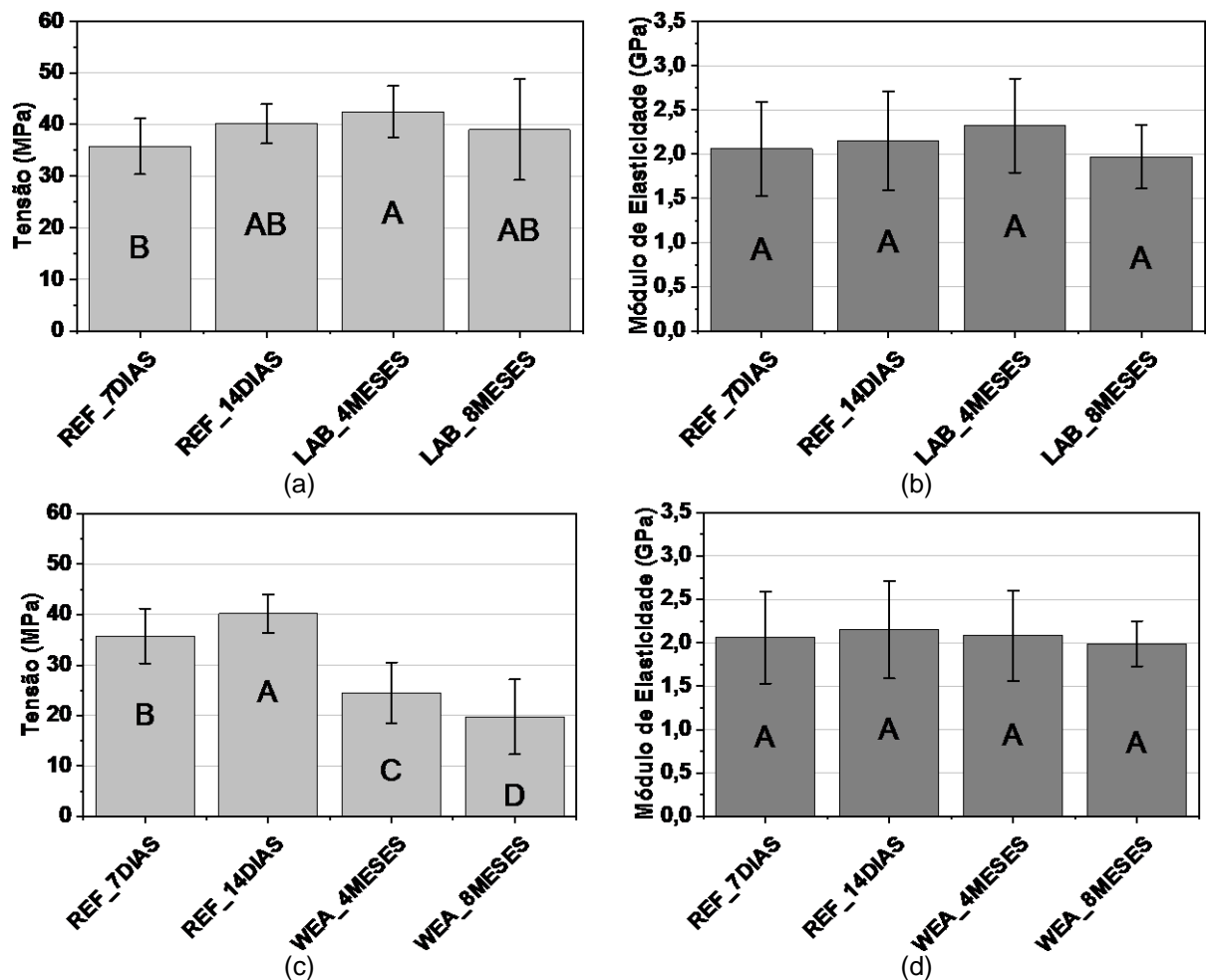


Fonte: O Autor

4.2.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No intuito de obter uma melhor interpretação dos resultados obtidos para os materiais constituintes do sistema de reforço, foi realizada uma análise estatística dos resultados de tensão última e módulo de elasticidade após exposição aos ambientes. A Figura 41 apresenta o resultado do teste de Tukey da resistência a tração máxima e módulo de elasticidade das resinas epoxídicas do tipo *primer*.

Figura 41: Teste de Tukey para tensão última e módulo de elasticidade da resina epoxídica do tipo *primer*: (a-b) ambiente laboratorial e (c-d) exposição às intempéries



Fonte: O Autor

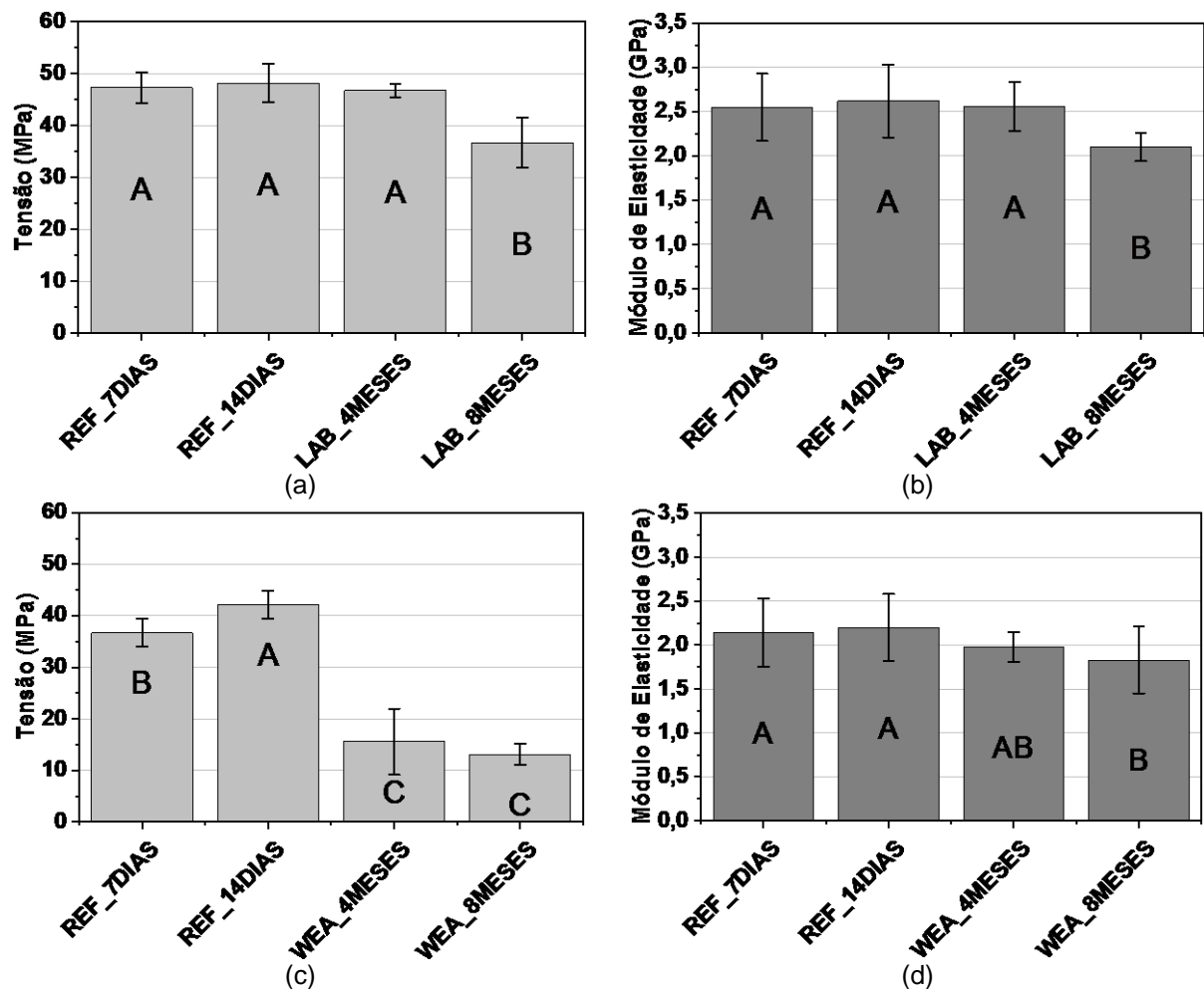
Analisando as Figuras 41a e 41b é possível observar que a exposição por um período de 8 meses em ambiente laboratorial não afetou as propriedades mecânicas da resina epoxídica do tipo *primer*, ou seja, os resultados apresentaram propriedades mecânicas com médias estatisticamente equivalentes. Nota-se apenas um aumento significativo de 18,7% da média da resistência a tração dos corpos de prova com 4 meses de exposição em relação aos de referência com 7 dias de cura.

De acordo com a Figura 41c é possível constatar que todas as médias da resistência a tração da resina epoxídica do tipo *primer* expostas a intempéries foram estatisticamente distintas. Em relação aos corpos de prova de referência verifica-se um ganho de resistência com a evolução temporal do tempo de cura de 7 para 14 dias. Nota-se ainda, em relação aos corpos de prova de referência, com 14 dias de cura, que a resistência a tração sofre uma grande degradação, diminuindo 39 e 50% para os ensaios realizados após 4 e 8 meses de exposição às intempéries. Verifica-se também que a resistência a tração sofre uma tendência de degradação até os 8 meses de exposição.

Para o módulo de elasticidade (Figura 41d) da resina epoxídica do tipo *primer* verifica-se que os valores médios foram estatisticamente similares, não apresentando degradação dessa propriedade.

A Figura 42 apresenta o resultado do teste de Tukey da resistência a tração máxima e módulo de elasticidade das resinas epoxídicas de laminação.

Figura 42: Teste de Tukey para tensão última e módulo de elasticidade da resina epoxídica de laminação: (a-b) ambiente laboratorial e (c-d) exposição às intempéries



Fonte: O Autor

Observando as Figuras 42a e 42b nota-se que após os 8 meses de exposição em ambiente laboratorial dos corpos de prova da resina epoxídica de laminação a média da resistência a tração e do módulo de elasticidade apresentaram reduções de 23,8 e 19,2%, respectivamente, quando comparados à média dos corpos de prova de referência com 14 dias de cura.

Entretanto, os corpos de prova com 7 e 14 dias de cura e expostos por 4 meses em ambiente laboratorial resultaram em valores médios de resistência a tração e módulo de elasticidade estatisticamente equivalentes, ou seja, não houve degradação entre esses períodos.

Analisando-se a Figura 42c é possível observar que os corpos de prova de referência da resina epoxídica de laminação apresentou valores médios da resistência a tração estatisticamente distintos, sendo verificado um ganho de resistência com a evolução do tempo de cura. Já para os corpos de prova expostos por 4 e 8 meses às intempéries nota-se que a resistência a tração foi degradada de maneira significativa após exposição a intempéries, cerca de 64 e 70% da condição de referência (com 14 dias de cura), respectivamente. Observa-se que as amostras com 4 e 8 meses de exposição resultaram em valores médios estatisticamente iguais, ou seja, houve uma estabilização da degradação entre esses dois períodos.

Para o módulo de elasticidade (Figura 42d) verifica-se que os corpos de prova de referência, com 7 e 14 dias de cura, e expostos por 4 meses a intempéries resultaram em valores médios estatisticamente equivalentes. O mesmo ocorreu para os corpos de prova com 4 e 8 meses de exposição.

Observa-se ainda que, até os 4 meses de exposição a intempéries, os resultados médios do módulo de elasticidade permaneceram estatisticamente equivalentes. No entanto, após os 8 meses, verifica-se uma redução de 18,2% quando comparados aos ensaios de referência com 14 dias de cura. Diferentemente da resistência a tração, o decréscimo do módulo de elasticidade, devido a ação das intempéries, pode estar ocorrendo de maneira lenta e gradual para o período de tempo em que os ensaios foram realizados. Ensaios com amostras futuras poderão afirmar se realmente a degradação esta ocorrendo de maneira lenta.

Com exceção das resinas epoxídicas de laminação (Resina B), ensaiadas após 8 meses de exposição em ambiente laboratorial, os resultados encontrados no presente trabalho para as resinas epoxídicas do tipo *primer* (Resina A) corroboraram com os resultados encontrados no trabalho de Silva (2017), no qual resinas epoxídicas também

foram mantidas em ambiente laboratorial por um período de 8 meses e demonstraram pequenas reduções de 6 e 12% para a resistência à tração e módulo de elasticidade, respectivamente.

Em trabalho realizado por Fernandes *et al.* (2015) resinas epoxídicas também foram mantidas em ambiente laboratorial, no entanto por um período de 2 anos. Os resultados, assim como no presente trabalho, também apresentaram pequenas reduções em suas propriedades mecânicas, especificamente 5,5 e 6,9% na resistência a tração e no módulo de elasticidade, respectivamente.

Os resultados encontrados para as resinas epoxídicas de laminação (Resina B), expostas a intempéries, também foram verificados em pesquisa realizada por Escobal (2016). O autor avaliou a degradação de resinas epoxídicas de laminação expostas a intempéries (ambiente externo com temperatura e umidade monitorizados) em um período total de 4 meses. Os resultados demonstraram perdas de 44% na resistência à tração após os 4 meses de exposição.

Escobal (2016) também avaliou as mesmas resinas epoxídicas expostas a ciclos de envelhecimento acelerado, contido por radiação UV, temperatura de 60°C e vapor de água a 50°C. Os resultados demonstraram grande redução da resistência a tração das resinas (cerca de 60%), assim como verificado no presente trabalho para as Resinas A e B expostas às intempéries.

Os resultados encontrados por Zhao *et al.* (2017) também foram semelhantes aos desta pesquisa. Os autores avaliaram corpos de prova de resina epoxídica expostos a ciclos de radiação UV (simulando exposição em um ambiente externo) por um período de 90 dias. Ao final dos ensaios, os autores verificaram uma redução máxima de 20,4% no módulo de elasticidade dos corpos de prova.

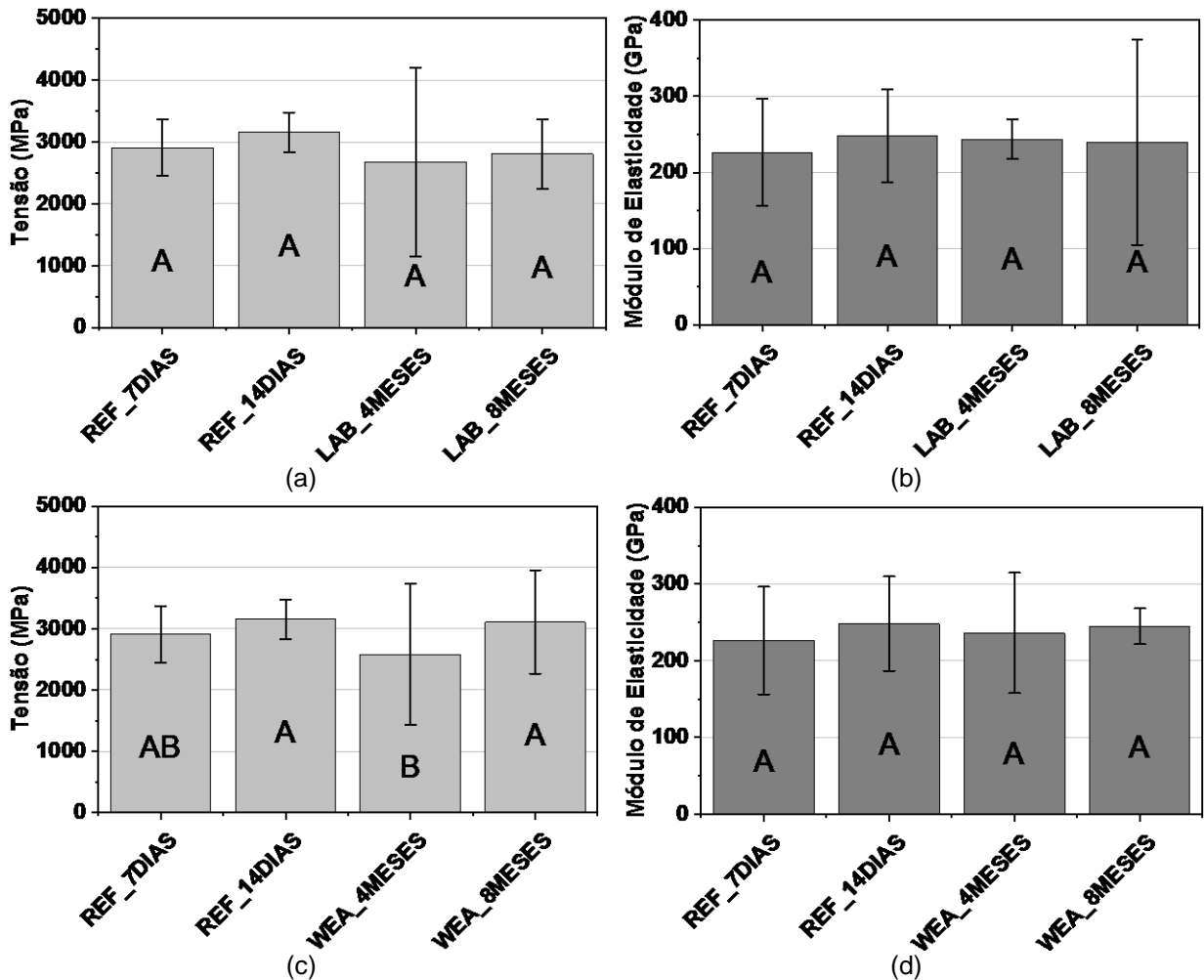
Comparando os dois tipos de resinas epoxídicas, verifica-se que ambas sofreram reduções em sua resistência a tração, tanto para exposição ao ambiente laboratorial quanto intempéries, no entanto, nota-se que a exposição a intempéries foi mais agressiva.

Nota-se ainda que a resina epoxídica de laminação (Resina B) foi mais suscetível a degradação frente à exposição a intempéries, uma vez que suas propriedades mecânicas sofreram maiores reduções quando comparada às reduções verificadas para a resina epoxídica do tipo *primer* (Resina A), a qual foi exposta às mesmas condições ambientais.

Em relação à coloração, segundo Isis (2006), o fato das resinas epoxídicas ficarem expostas às intempéries, sob a incidência direta da radiação UV, pode causar a degradação desse material por um mecanismo conhecido por fotodegradação, o qual é capaz de quebrar as ligações químicas das matrizes poliméricas, alterando sua coloração.

A Figura 43 apresenta o resultado do teste de Tukey da resistência a tração máxima e módulo de elasticidade dos compósitos de CFRP.

Figura 43: Teste de Tukey para tensão última e módulo de elasticidade dos compósitos de CFRP: (a-b) ambiente laboratorial e (c-d) exposição às intempéries



Fonte: O Autor

Pela análise das Figuras 43a e 43b verifica-se que, após a exposição em ambiente laboratorial dos compósitos de CFRP, as propriedades mecânicas (resistência a tração e módulo de elasticidade) não apresentaram degradação de suas propriedades, ou seja, resultaram em médias estatisticamente equivalentes.

Observando a Figura 43c observa-se que os resultados demonstraram médias estatisticamente similares para os corpos de prova de referência, com 7 e 14 dias de cura, e após 8 meses de exposição. O mesmo ocorreu para os corpos de prova com 7 dias de cura e 4 meses de exposição.

Verifica-se que a resistência a tração dos corpos de prova do compósito de CFRP após exposição a intempéries não foi afetada. Constatou-se apenas uma redução de 18% após os 4 meses de exposição. Logo, aos 8 meses, sua resistência a tração foi recuperada.

Para o módulo de elasticidade (Figura 43d) verifica-se a equivalência dos valores médios, ou seja, o módulo de elasticidade não foi afetado ao longo do período de exposição a intempéries.

Os resultados obtidos no presente trabalho, para os compósitos de CFRP, corroboram com alguns resultados encontrados na literatura, os quais apresentam os compósitos de CFRP como sendo materiais resistentes a diferentes condições ambientes agressivas.

No caso das pesquisas realizadas por Fernandes (2016) e Silva (2017) verificou-se que o compósito de CFRP sofreu pouca alteração em suas propriedades mecânicas (redução máxima de 7% na resistência a tração e 6% no módulo de elasticidades) após exposição a diversos tipos de ambientes, tais como ciclos térmicos, ciclos de gelo e degelo, ciclos de umidade e água com cloretos.

Pesquisa realizada por Cromwell, Harries e Shahrooz (2010) também constataram que a exposição de laminados de CFRP à ambientes agressivos, tais como umidade constante e solução salina, não causa grandes alterações na sua resistência a tração, módulo de elasticidade e deformação última.

Já em pesquisa realizada por Dalfré (2016) não foi verificada grande alteração na resistência a tração e no módulo de elasticidade de corpos de prova de compósito de CFRP expostos a ciclos de umidade e umidade constante em um período total de 2 anos.

4.3 COMPORTAMENTO DAS VIGAS DE CONCRETO ARMADO

O comportamento das vigas de concreto armado de referência (com e sem reforço) e reforçadas expostas em ambiente laboratorial e a intempéries foi analisado com base na ductilidade, incremento da capacidade de carga, deformação dos materiais (concreto, aço e CFRP) e modo de ruptura do sistema de reforço.

O critério de parada adotado nos ensaios nas vigas de referência sem reforço foi estabelecido em termos de deformação da armadura de flexão (no momento que a deformação no aço atingiu o valor médio de 11‰), enquanto o adotado nas vigas reforçadas de referência e expostas em ambiente laboratorial e intempéries foi estabelecido em termos de falha do sistema de reforço, seguido pela perda repentina de carga e destacamento do material.

Nota-se que os gráficos de força *versus* deslocamento lateral da face superior das vigas na seção de apoio e força *versus* deslocamento do perfil metálico se encontram no Apêndice E do presente trabalho.

4.3.1 VIGAS DE REFERÊNCIA SEM REFORÇO (V_REF_0)

Os diagramas força *versus* deslocamento vertical, deformação na armadura longitudinal e no concreto são apresentados nas Figuras 44 a 46, respectivamente.

Figura 44: Força *versus* deslocamento vertical das vigas de referência sem reforço

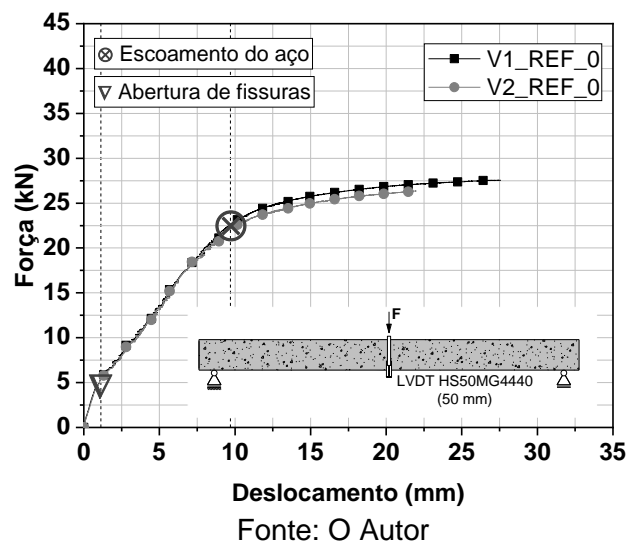


Figura 45: Força *versus* deformação na armadura longitudinal das vigas de referência sem reforço

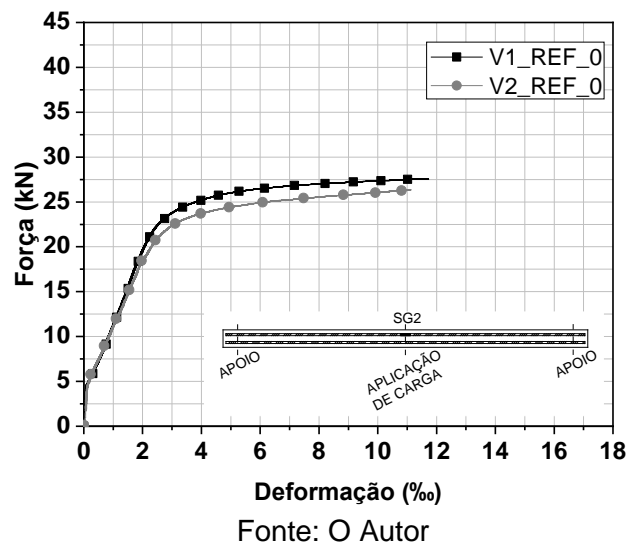
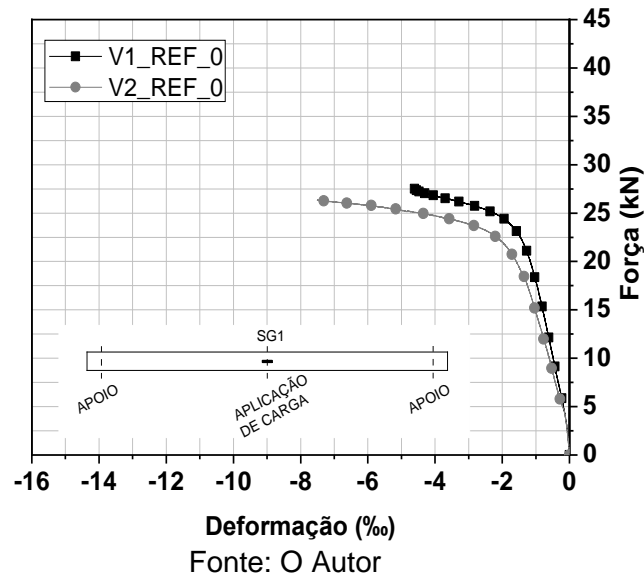


Figura 46: Força versus deformação no concreto das vigas de referência sem reforço



4.3.2 VIGAS DE REFERÊNCIA REFORÇADAS (V_REF_CFRP)

Os gráficos de força versus deslocamento vertical, deformação na armadura longitudinal, concreto e compósito de CFRP são apresentados nas Figuras 47 a 50, respectivamente.

Figura 47: Força versus deslocamento vertical das vigas de referência reforçadas

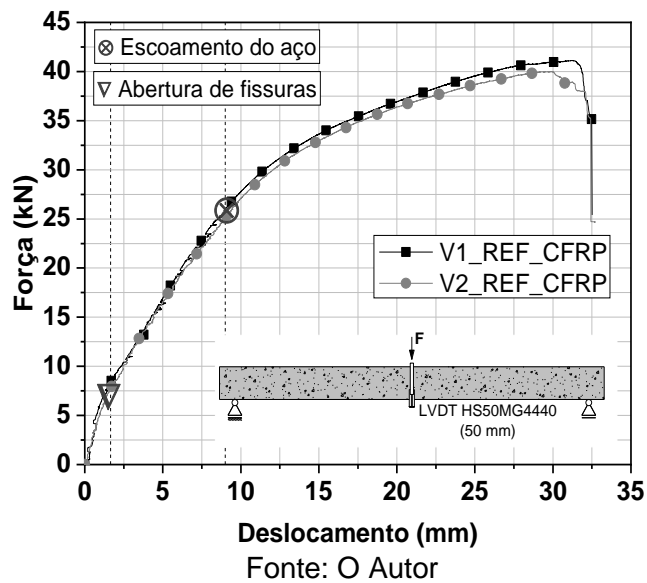


Figura 48: Força versus deformação na armadura longitudinal das vigas de referência reforçadas

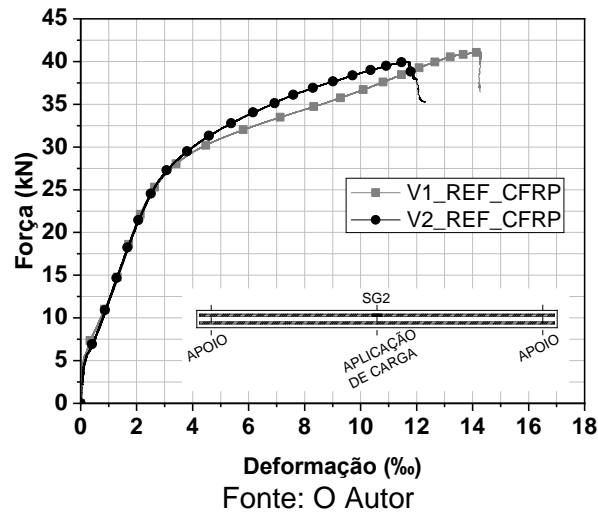


Figura 49: Força versus deformação no concreto das vigas de referência reforçadas

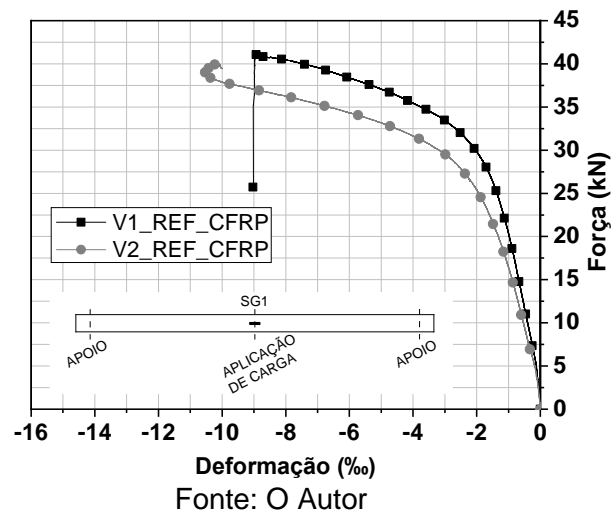
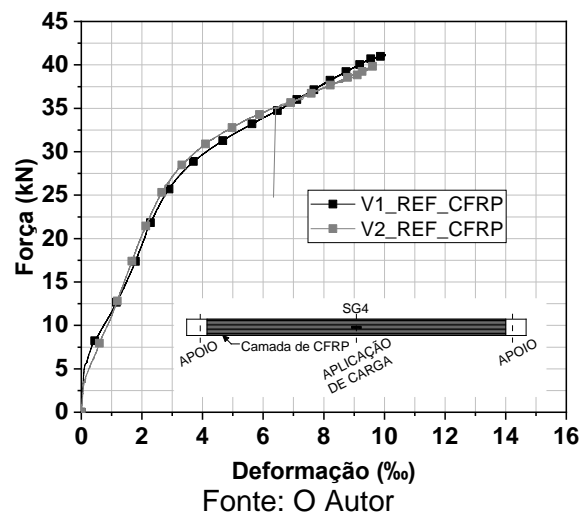


Figura 50: Força versus deformação máxima do compósito de CFRP das vigas de referência reforçadas



4.3.3 VIGAS REFORÇADAS MANTIDAS EM AMBIENTE LABORATORIAL (V_LAB_CFRP)

Os gráficos de força *versus* deslocamento vertical, deformação na armadura longitudinal, concreto e compósito de CFRP são apresentados nas Figuras 51 a 54, respectivamente.

Nota-se que os gráficos de força *versus* deformação no concreto e no compósito de CFRP para a viga V1_LAB_CFRP não foram apresentados devido a falha mecânica no extensômetro elétrico.

Figura 51: Força *versus* deslocamento vertical das vigas reforçadas expostas em ambiente laboratorial

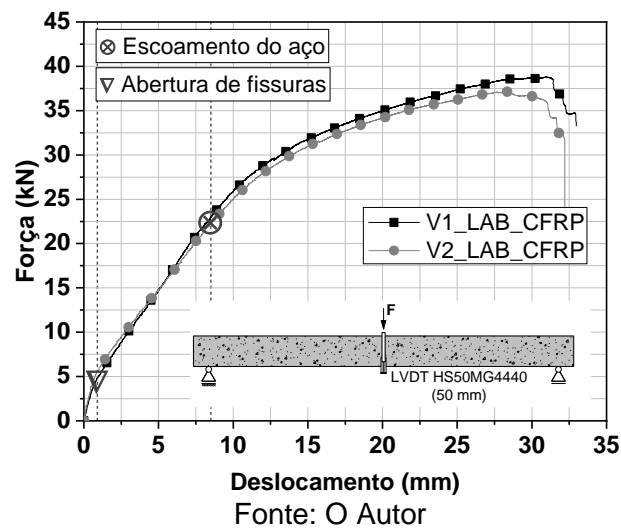


Figura 52: Força *versus* deformação na armadura longitudinal das vigas reforçadas expostas em ambiente laboratorial

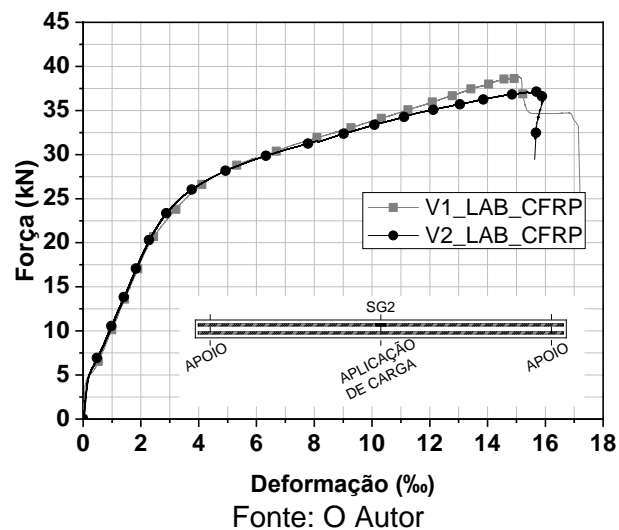


Figura 53: Força versus deformação no concreto das vigas reforçadas expostas em ambiente laboratorial

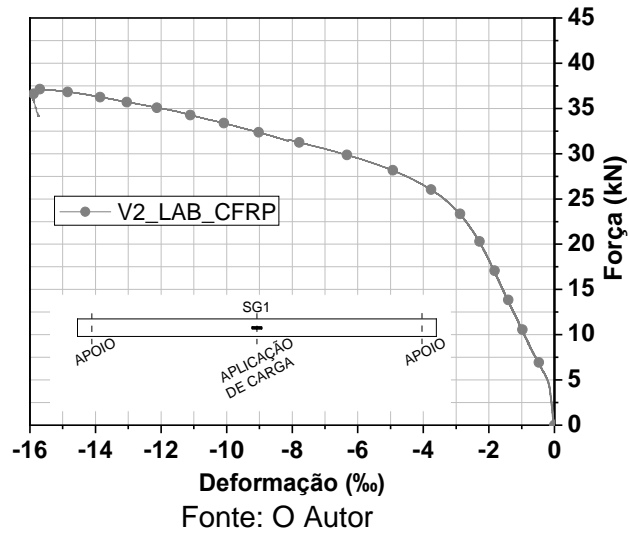
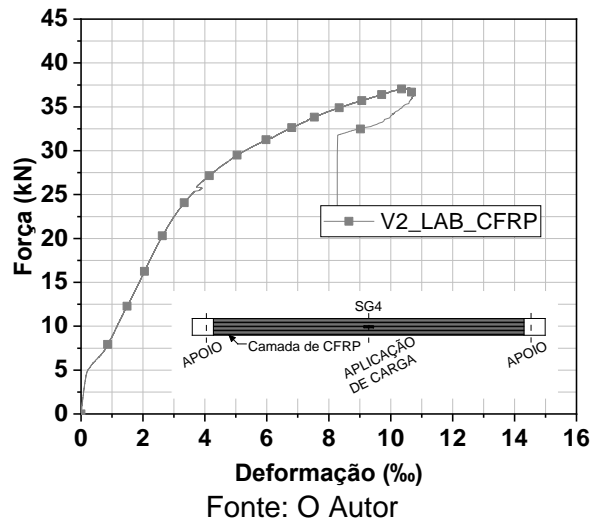


Figura 54: Força versus deformação máxima do compósito de CFRP das vigas reforçadas expostas em ambiente laboratorial



4.3.4 VIGAS REFORÇADAS EXPOSTAS ÀS INTEMPÉRIES (V_WEA_CFRP)

Os gráficos de força versus deslocamento vertical, deformação na armadura longitudinal e no compósito de CFRP são apresentados nas Figuras 55 a 57, respectivamente.

Nota-se que os gráficos de força versus deformação no concreto para as vigas V1_WEA_CFRP e V2_WEA_CFRP não foram apresentados devido a falha mecânica no extensômetro elétrico.

Figura 55: Força versus deslocamento vertical das vigas reforçadas expostas às intempéries

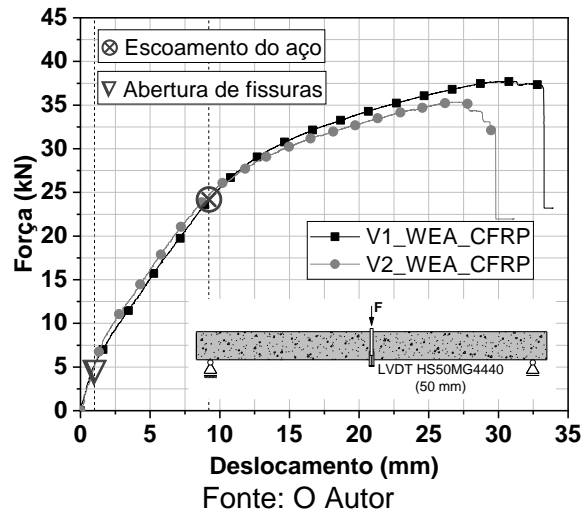


Figura 56: Força versus deformação na armadura longitudinal das vigas reforçadas expostas às intempéries

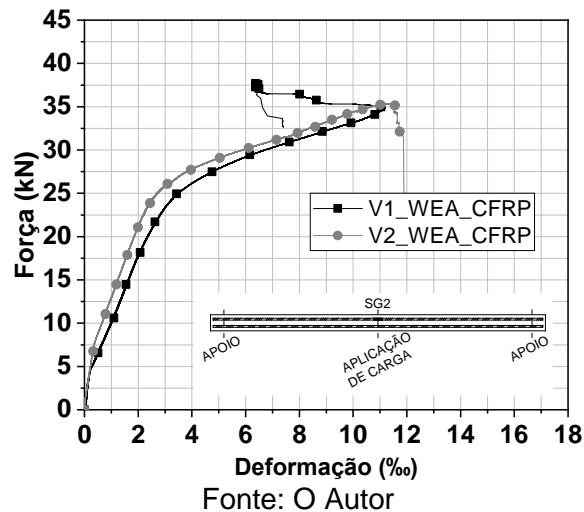
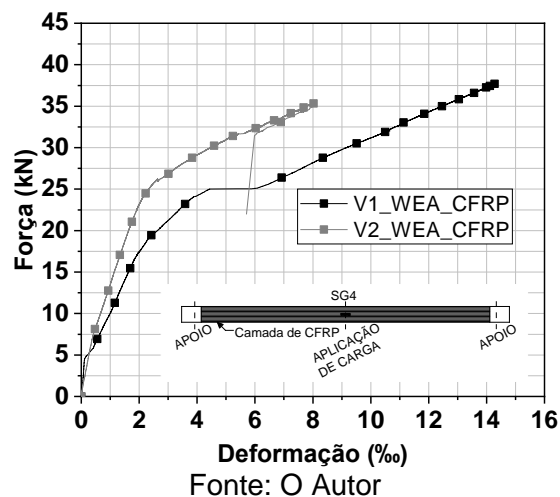


Figura 57: Força versus deformação máxima do compósito de CFRP das vigas reforçadas expostas às intempéries.



4.3.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Analisando-se as curvas força *versus* deslocamento vertical (Figura 44) das vigas de referência sem reforço é possível perceber que as mesmas apresentaram os três estágios de comportamento: o primeiro representa o concreto não fissurado, o segundo corresponde ao concreto fissurado com o aço no regime elástico, e o terceiro equivale ao concreto fissurado com escoamento da armadura longitudinal de tração.

Para as curvas Força *versus* deslocamento das vigas reforçadas de referência, mantidas em ambiente laboratorial e expostas às intempéries, Figuras 47, 51 e 55, respectivamente, nota-se que esses elementos apresentaram os mesmos três estágios de comportamento das vigas de referência sem reforço. Porém, após o escoamento do aço, verifica-se que apenas o sistema de reforço contribui para o aumento da capacidade de carga das vigas, justificando o comportamento linear da curva (sem patamar de escoamento), por consequência do comportamento elástico-linear do compósito de CFRP.

Acerca da abertura de fissuras, as vigas de referência sem reforço, de referência reforçadas, mantidas em ambiente laboratorial e expostas às intempéries apresentaram a primeira fissura visível nos pontos de inflexão das curvas, apresentadas nas Figuras 44, 47, 51 e 55, respectivamente, quando uma força média de 5, 7,5, 5,4 e 5,1 kN foi atingida. Nesse ponto verificou-se também uma redução da rigidez do conjunto de vigas devido a fissuração do concreto.

A Tabela 13 apresenta o resumo dos resultados obtidos nos ensaios dos conjuntos de vigas para o início do escoamento da armadura longitudinal e no instante que as vigas atingem o máximo carregamento, em que F_{sy} e F_{max} representam a força registrada no início do escoamento do aço e para a força máxima, respectivamente, u_{sy} e u_{Fmax} são os deslocamentos verticais registrados para F_{sy} e F_{max} , ϵ_c , ϵ_s e $\epsilon_{f,max}$ são as deformações no concreto, armadura longitudinal e na manta de CFRP para F_{sy} e F_{max} , respectivamente.

Analisando a média das deformações registradas nos compósitos de CFRP para as vigas reforçadas de referência e expostas aos ambientes (laboratorial e intempéries) ($\epsilon_{f,max}$) (Figuras 50, 54 e 57), no momento em que F_{max} foi atingida e levando-se em conta a deformação experimentalmente obtida (12,8‰), um grau de mobilização médio do material de reforço de 77,9, 83,6 e 87,5% foi atingido, respectivamente. Segundo o fabricante do material de reforço (S&P, 2019), para as vigas aqui analisadas, recomenda-se um valor máximo de mobilização de 82,6% para os compósitos de CFRP manualmente laminados.

Verifica-se que as vigas reforçadas expostas aos ambientes apresentaram um grau de mobilização superior ao indicado pelo fabricante. Apesar de representar um elevado nível

de aproveitamento do material de reforço, o fabricante não aconselha que essas deformações sejam atingidas pelos compósitos de CFRP.

Tabela 13: Resumo dos resultados obtidos nos ensaios das vigas

Vigas		Escoamento da armadura longitudinal (ε_{sy})				Esmagamento do concreto ($\varepsilon_{c,esm}$)				Máxima força registrada				
		F_{sy} (kN)	u_{sy} (mm)	ε_c (‰)	$\varepsilon_{f,max}$ (‰)	$F_{c,esm}$ (kN)	u_{esm} (mm)	ε_{sy} (‰)	$\varepsilon_{f,max}$ (‰)	F_{max} (kN)	$u_{F,max}$ (mm)	ε_c (‰)	ε_s (‰)	$\varepsilon_{f,max}$ (‰)
REF 0	V1	23,4	10,4	1,6	---	26,4	17,4	5,7	---	27,6	27,6	4,7	11,7	---
	V2	21,9	10,1	2,0	---	24,4	13,9	4,9	---	26,4	22,7	7,5	11,1	---
REF CFRP	V1	26,1	9,0	1,5	3,0	33,4	14,8	7,1	5,8	41,1	32,5	9,1	14,5	10,0
	V2	26,2	9,5	2,1	2,8	29,6	11,7	3,8	3,6	40,0	32,8	10,5	12,4	9,7
LAB CFRP	V1	22,4	8,2	---	---	---	---	---	---	38,8	46,9	---	17,4	---
	V2	23,1	9,0	1,3	3,1	31,7	16,0	8,3	6,3	37,2	32,8	4,4	17,4	10,7
WEA CFRP	V1	22,5	8,4	---	3,4	---	---	---	---	37,7	33,9	---	11,2	14,3
	V2	25,3	9,6	---	2,4	---	---	---	---	35,3	31,1	---	11,9	8,1

* Extensômetros mecanicamente danificados

Fonte: O Autor

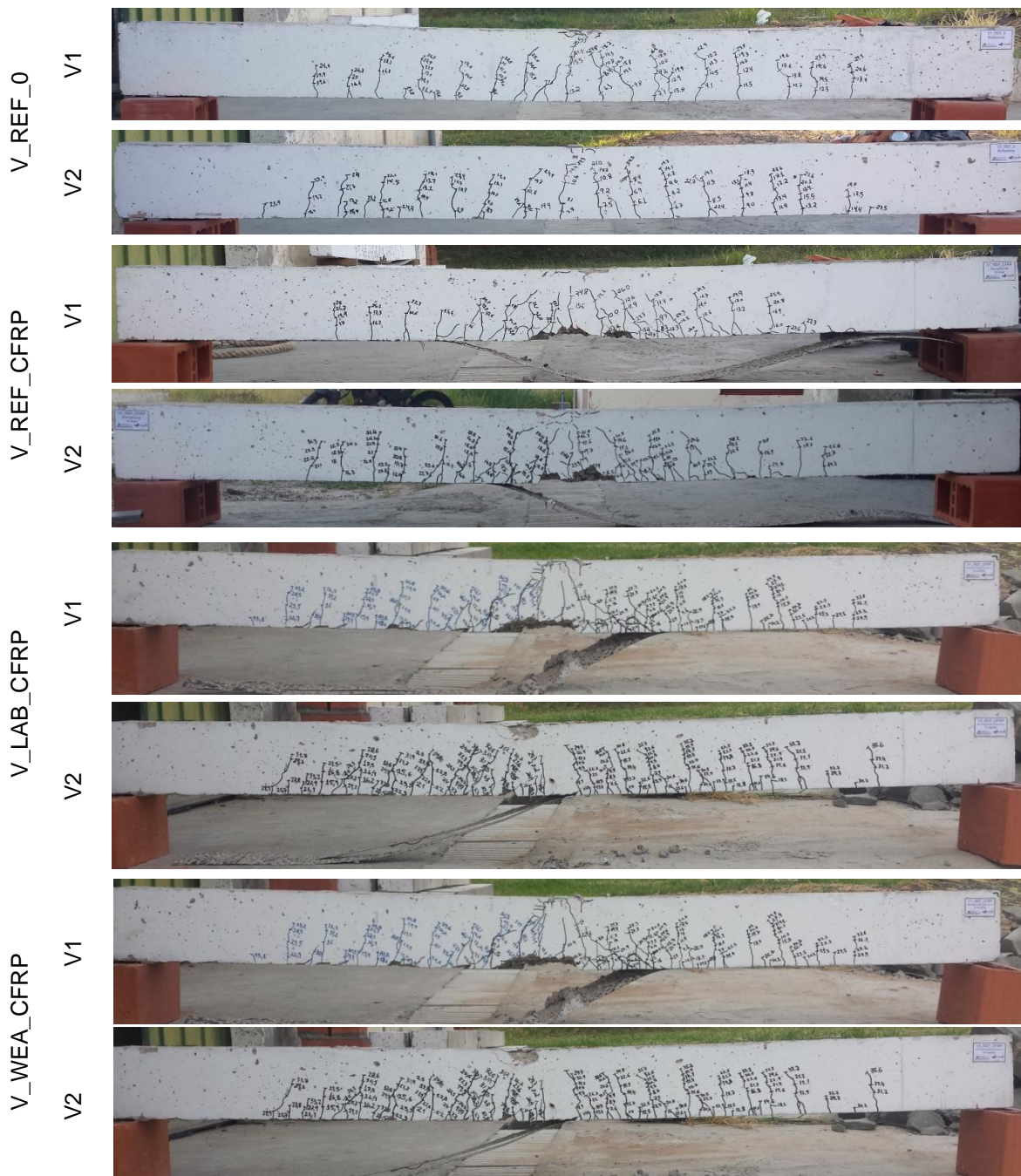
A Figura 58 apresenta o padrão de fissuração final registrado nos conjuntos de vigas ensaiadas. Nota-se para todas as vigas ensaiadas que as primeiras fissuras verificadas foram causadas pelos esforços de flexão, apresentando configurações típicas formadas por fissuras verticais a meio vão das vigas, ou seja, no ponto de máximo momento fletor. Com o aumento da aplicação de carga, verificou-se uma propagação das fissuras e leve inclinação, em direção aos apoios, devido a ação simultânea do momento fletor e do esforço transversal.

Quanto ao modo de ruína, as vigas de referência sem reforço, como esperado para o domínio 2 para o qual a peça foi dimensionada, apresentaram uma ruptura dúctil caracterizada pela deformação acentuada da armadura longitudinal de tração e início de esmagamento do concreto comprimido.

Em relação ao modo de ruptura das vigas reforçadas (de referência e expostas aos ambientes), após grande deformação e elevada curvatura dos elementos, verificou-se o surgimento de fissuras paralelas ao material de reforço nos momentos que antecederam a ruptura do elemento.

A ruína se deu de forma frágil, precedida de pequenos estalos do material de reforço (as quais se iniciaram com uma carga média de 37, 35 e 32kN para as vigas reforçadas de referência, mantidas em ambientes laboratorial e expostas a intempéries, respectivamente), e posteriormente acompanhada pelo descolamento da manta de CFRP aderida ao substrato de concreto com destacamento do concreto de cobertura localizado na região de máximo momento fletor. A Figura 59 apresenta o modo de ruína típico das vigas reforçadas ensaiadas.

Figura 58: Fissuração final das vigas ensaiadas



Fonte: O Autor

Figura 59: Modo de ruína típico das vigas reforçadas ensaiadas



Fonte: O Autor

4.4 ANÁLISE GERAL DAS VIGAS ENSAIADAS

Uma análise geral dos ensaios das vigas de concreto armado foi realizada no intuito de avaliar a eficácia do sistema de reforço e a possível perda da resistência a flexão dos elementos reforçados expostos em ambiente laboratorial e a intempéries.

A Tabela 14 apresenta o resumo dos resultados médios obtidos nos ensaios dos conjuntos de vigas para o início do escoamento da armadura longitudinal (ϵ_{sy}) e no instante que as vigas atingem o máximo carregamento (F_{max}). O indicador de eficácia do sistema de reforço a flexão em termos de aumento da capacidade de carga (IR) também é apresentado, o qual foi obtido pela análise da força média ($F = (F_{V1} + F_{V2}) / 2$) registrada para as vigas sem reforço e reforçadas (de referência e expostas aos ambientes), respectivamente.

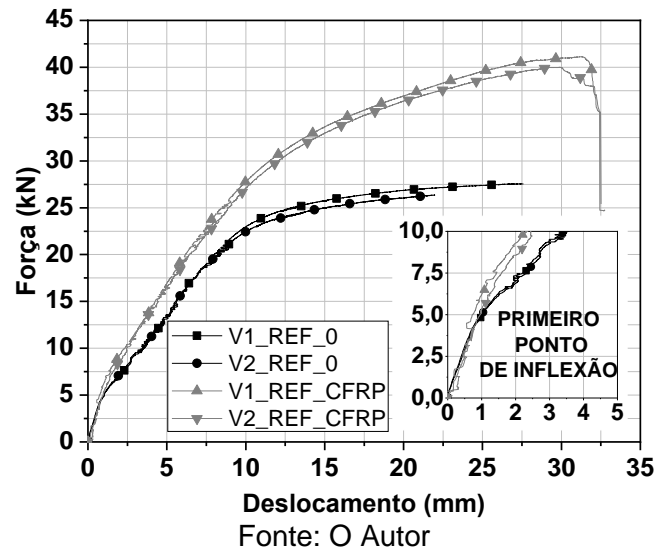
Tabela 14: Resumo dos resultados médios obtidos nos ensaios das vigas

Vigas	Escoamento da armadura longitudinal (ϵ_{sy})				Esmagamento do concreto ($\epsilon_{c,esm}$)				Máxima força registrada					
	F_{sy} (kN)	u_{sy} (mm)	ϵ_c (‰)	$\epsilon_{f,max}$ (‰)	$F_{c,esm}$ (kN)	u_{esm} (mm)	ϵ_{sy} (‰)	$\epsilon_{f,max}$ (‰)	F_{max} (kN)	$u_{F,max}$ (mm)	ϵ_c (‰)	ϵ_s (‰)	$\epsilon_{f,max}$ (‰)	IR (%)
REF 0	21,8	10,3	1,8	----	25,4	15,6	5,2	----	27,0	25,2	6,1	11,4	----	----
REF CFRP	26,1	9,3	1,8	2,9	31,5	13,3	5,5	4,7	40,6	32,7	9,8	13,5	9,9	50,0
LAB CFRP	22,8	8,6	1,2	3,1	31,7	16,0	8,3	6,3	38,0	39,9	3,2	17,4	10,7	43,9
WEA CFRP	23,9	9,0	----	2,9	----	----	----	----	36,5	32,5	----	11,6	11,2	38,3

Fonte: O Autor

No âmbito de avaliar a eficácia do sistema de reforço com mantas de CFRP aplicadas segundo a técnica EBR, a Figura 60 apresenta uma comparação entre as curvas força *versus* deslocamento vertical das vigas de referência sem reforço (V1_REF_0 e V2_REF_0) e reforçadas (V1_REF_CFRP e V2_REF_CFRP).

Figura 60: Força *versus* deslocamento das vigas de referência sem reforço e reforçadas



Pela análise da Tabela 14 e Figura 60 é possível verificar para as vigas de referência sem reforço e reforçadas a eficácia do sistema de reforço CFRP EBR no incremento da capacidade de carga e da rigidez das vigas reforçadas.

Em relação ao início do escoamento do aço, verifica-se que o reforço proporcionou um aumento de 28,1% da rigidez junto com um aumento médio da capacidade de carga de 15,6%. Além disso, devido ao aumento da rigidez dos elementos reforçados, verifica-se uma redução do deslocamento vertical médio de 9,8% para as vigas de referência reforçadas em comparação com as vigas de referência sem reforço.

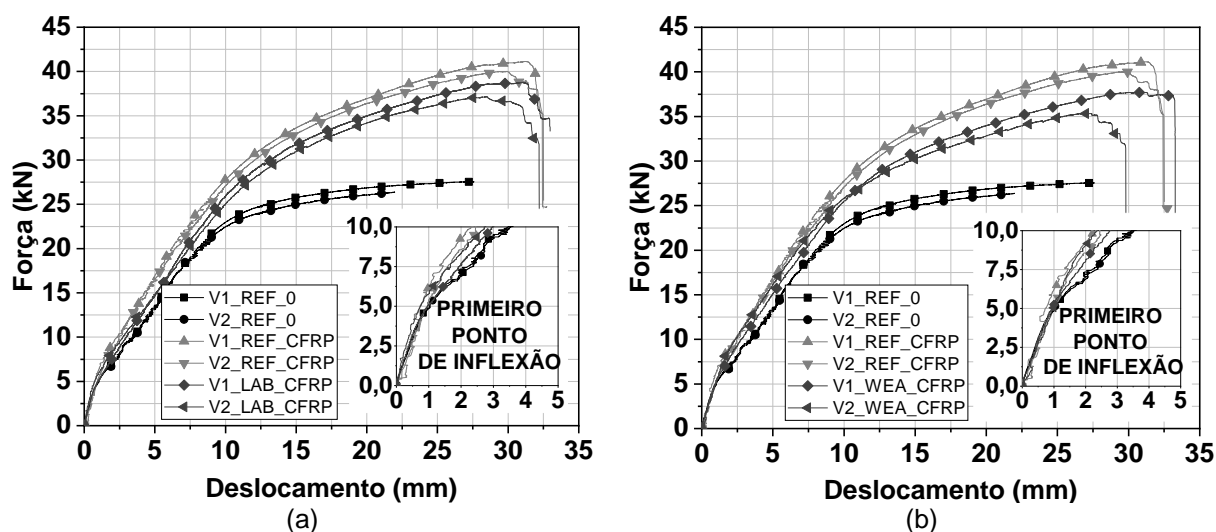
Para a máxima força registrada nos ensaios das vigas de referência sem reforço e reforçadas com uma camada de manta de CFRP (F_{max}), verifica-se um aumento médio da capacidade de carga de 50,5% em relação as vigas não reforçadas.

Quanto ao modo de ruptura verifica-se que a utilização do sistema de reforço CFRP EBR altera os modos de ruína dos elementos reforçados. A ruína que antes era dúctil e governado pela deformação da armadura longitudinal passou a ocorrer de maneira frágil com o descolamento da manta de CFRP aderida ao substrato de concreto.

Apresentam-se a seguir uma análise da possível degradação do sistema de reforço e perda da resistência a flexão das vigas reforçadas mantidas em ambiente laboratorial e

expostas às intempéries. As Figuras 57a e 57b demonstram uma comparação entre as curvas força *versus* deslocamento vertical das vigas de referência sem reforço (V1_REF_0 e V2_REF_0) e reforçadas (V1_REF_CFRP e V2_REF_CFRP) com as expostas em ambiente laboratorial (V1_LAB_CFRP e V2_LAB_CFRP) e a intempéries (V1_WEA_CFRP e V2_WEA_CFRP), respectivamente. Vale ressaltar que os resultados da monitorização da umidade, temperatura e radiação UV foram apresentados no item 4.1 deste capítulo.

Figura 61: Comparação entre as curvas força *versus* deslocamento das vigas de referência e expostas aos ambientes: (a) laboratorial e (b) intempéries



Fonte: O Autor

Pela análise da Figura 61 e Tabela 14, e levando em consideração o período de exposição, nota-se que ambas as vigas reforçadas, mantidas em ambiente laboratorial e expostas às intempéries, mantiveram o incremento de carga e rigidez proporcionado pelo sistema de reforço CFRP EBR.

Para o início do escoamento no aço das vigas reforçadas expostas em ambiente laboratorial e a intempéries e levando em consideração as vigas de referência sem reforço, observa-se um incremento médio da capacidade de carga de 4,5 e 9,6%, respectivamente, junto com um aumento médio da rigidez de 25,5%. Para a máxima força registrada, nota-se um aumento médio da capacidade de carga de 43,9 e 38,3%, respectivamente.

Analisando o início do escoamento do aço das vigas expostas aos ambientes e tomando como base os resultados obtidos nos ensaios das vigas de referência reforçadas, nota-se que os elementos mantidos em ambiente laboratorial e a intempéries apresentaram uma redução da carga média de escoamento de 12,6 e 8,4%, respectivamente, além de uma redução da rigidez em torno de 6%.

É possível observar também que a força máxima das vigas reforçadas expostas aos ambientes sofreu uma redução de 6,4 e 10,0% quando comparado à força máxima observada nas vigas de referência reforçadas.

Com relação a carga média de abertura de fissuras, a qual ocorreu no primeiro ponto de inflexão das curvas (ver detalhe na Figura 61), também foi verificada uma redução, cerca de 28 e 32% para as vigas reforçadas mantidas em ambiente laboratorial e expostas às intempéries, respectivamente, quando comparadas às vigas reforçadas de referência.

Quanto ao modo de ruptura dos elementos reforçados expostos aos ambientes verifica-se que não houve alterações quando comparado às vigas reforçadas de referência. A ruína continuou ocorrendo de forma frágil com descolamento da manta de CFRP aderida ao substrato de concreto. Verifica-se também, nos ensaios das vigas expostas, que os estalos que antecederam a ruptura ocorreram de maneira precoce e com uma carga inferior à verificada para as vigas de referência reforçadas.

Analisando a força máxima registrada nos ensaios das vigas reforçadas (Tabela 14) nota-se que a exposição a intempéries foi mais agressiva para o sistema de reforço, uma vez que sua carga última foi inferior a dos elementos mantidos em ambiente laboratorial.

4.4.1 ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DO SISTEMA DE REFORÇO

Quanto à durabilidade dos elementos reforçados não se pode afirmar, inicialmente, que as reduções na resistência a flexão foram causadas pela degradação do sistema de reforço CFRP após sua exposição aos ambientes mencionados.

Nota-se que as análises da possível degradação do sistema de reforço foram realizadas com base nas reduções das forças para distintos momentos: abertura de fissuras, escoamento do aço e ruptura. Embora essas reduções representem fortes indícios de degradação dos materiais compósitos presentes no reforço CFRP, o concreto também pode ter sofrido degradação com a ação deletéria do ambiente a qual estava inserido.

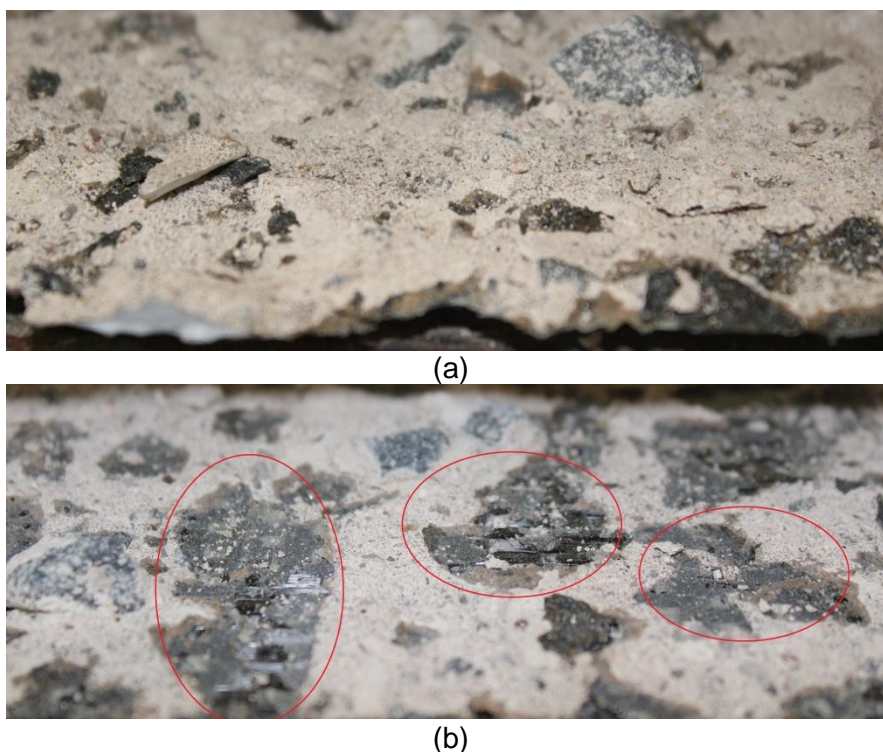
Uma análise em longo prazo, com ensaios de elementos expostos por um período maior de tempo, poderá apresentar, com mais clareza, se realmente as reduções na resistência a flexão das vigas reforçadas foi causada pela degradação do sistema de reforço ou do concreto propriamente dito.

Uma forte hipótese de que a redução na resistência a flexão das vigas expostas tenha sido ocasionada pela degradação do sistema de reforço está relacionada diretamente com a degradação da interface concreto/adetivo/CFRP, uma vez que, nos ensaios dos materiais intervenientes, as resinas epoxídicas, utilizadas para colagem da manta de CFRP

ao substrato de concreto, sofreram grande alteração em suas propriedades mecânica após exposição às intempéries. O mais provável é que essas resinas tenham sofrido com a ação do intemperismo, prejudicando a durabilidade da interface adesivo/substrato.

A Figura 62 apresenta o detalhe da interface concreto/adesivo/CFRP após os ensaios de flexão das vigas reforçadas de referência e expostas às intempéries. Observa-se que após exposição, o modo de ruptura começa a ocorrer na ligação adesivo/substrato (Figura 62b), enquanto nas vigas de referência reforçadas essa ruptura ocorre praticamente no concreto, sem exposição das resinas epoxídicas utilizadas para colagem da manta de CFRP (Figura 62a).

Figura 62: Detalhe da interface concreto/adesivo/CFRP após os ensaios. (a) viga de referência reforçada e (b) viga reforçada exposta às intempéries.



Fonte: O Autor

4.5 ENSAIOS DE *PULL-OFF* (ARRANCAMENTO)

Ensaio de *pull-off* foram conduzidos a fim de avaliar a perda de aderência entre manta de CFRP e o substrato de concreto, após a exposição ao ambiente laboratorial e intempéries.

A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de *pull-off* para as vigas de referência (sem e com reforço) e reforçadas expostas em ambiente laboratorial e a

intempéries, enquanto a Figura 63 apresenta o padrão típico de ruptura obtido nos ensaios de arrancamento.

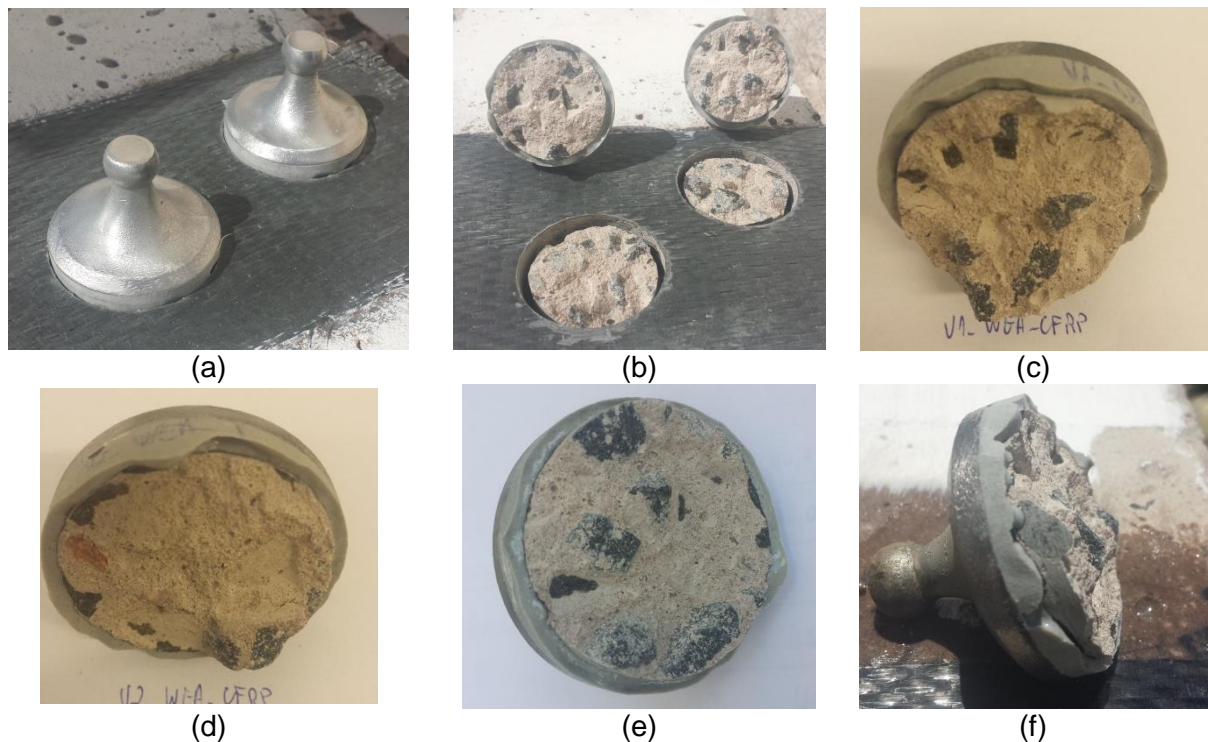
Tabela 15: Resultados obtidos no ensaio de *pull-off*

Vigas	Idade do ensaio	Tensão de aderência (MPa)	Modo de ruptura
V_REF_0	348 dias (após a concretagem)	2,1 (11,67)	100% C
V_REF_CFRP	14 dias (após o reforço)	1,8 (11,54)	100% C
V_LAB_CFRP	6 meses	2,0 (18,43)	100% C
V_WEA_CFRP	6 meses	1,9 (11,36)	100% C

* (valor) Coeficiente de Variação (COV) = (Desvio-padrão/Média) × 100; C – Concreto; A/C – Interface Adesivo/Concreto.

Fonte: O Autor

Figura 63: Ruptura típica verificada nos ensaios de arrancamento: (a) antes e (b) após os ensaios de arrancamento, (c-f) ruptura típica do concreto



Fonte: O Autor

De acordo com os ensaios de arrancamento direto e analisando a Tabela 15 verifica-se que não houve alteração quanto aos modos de ruptura. Tanto para os ensaios realizados nas vigas de referência, sem e com reforço, quanto para os realizados nas vigas reforçadas expostas em ambiente laboratorial e a intempéries a ruptura ocorreu no concreto (Figura 63) e não na interface concreto/adesivo/CFRP, diferentemente do verificado nos ensaios das vigas de concreto reforçadas.

O que se notou ao longo dos ensaios de arrancamento foi uma redução da tensão de aderência em relação aos ensaios realizados nas vigas de referência sem reforço. Foram verificadas pequenas reduções de 14,5 e 19% na tensão de aderência para os ensaios realizados nas vigas de referência reforçadas e expostas em ambiente laboratorial e a intempéries, respectivamente.

4.6 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS

Os valores experimentais encontrados para as vigas de referência, sem e com reforço, e expostas em ambiente laboratorial e às intempéries foram comparados com os valores de cálculo prescritos pelas normas ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2014) e ACI 440.2R (2017).

Para a realização dos cálculos teóricos das vigas foram utilizadas as propriedades do concreto, aço e compósito de CFRP determinadas experimentalmente. As propriedades desses materiais encontram-se nas Tabelas 10, 11 e 12, respectivamente. A partir desses dados a carga última foi encontrada por meio da determinação do momento fletor resistente da seção a meio vão das vigas.

Para as vigas de referência, expostas em ambiente laboratorial e expostas às intempéries, foram assumidas resistências à compressão característica do concreto de 28,5, 27,4 e 25,2 MPa e módulos de elasticidade de 31,6, 31,2 e 28,5 GPa, respectivamente. Em relação ao aço, a tensão de escoamento característica e módulo de elasticidade assumido foi de 547,4 MPa e 196,89 GPa, respectivamente.

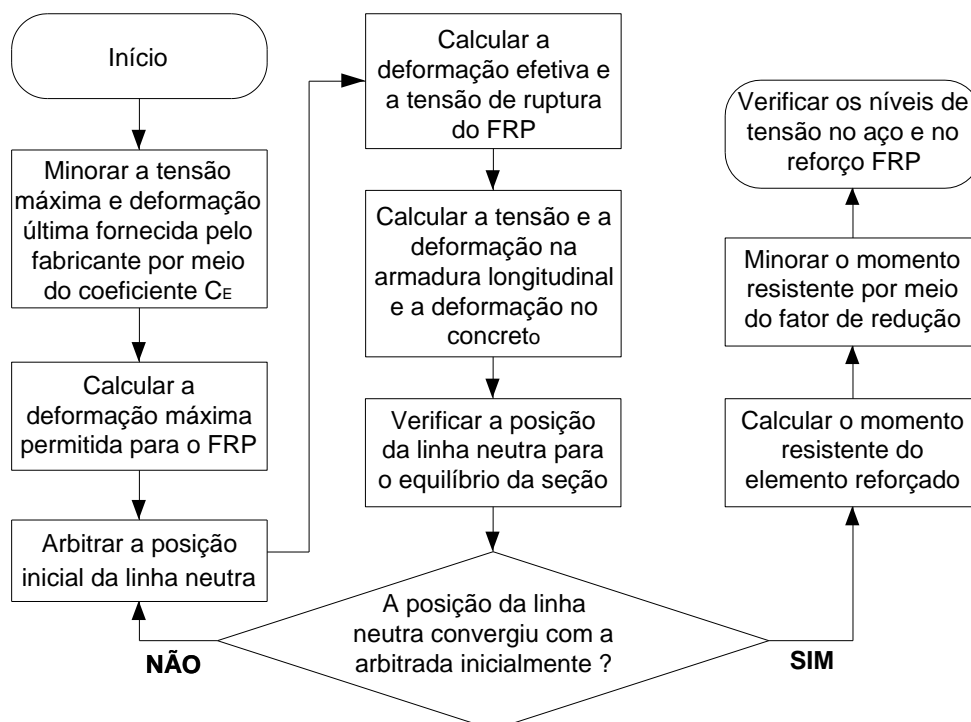
Para os compósitos de CFRP foram utilizadas as propriedades mecânicas obtidas aos 14 dias de cura. Neste sentido, o valor considerado para a resistência característica a tração última, módulo de elasticidade e deformação última foi de 3153,2 MPa, 248,1 GPa e 12,8 %, respectivamente.

A comparação entre os resultados teóricos e experimentais foi realizada levando-se em consideração duas variáveis: a primeira sem a incidência dos coeficientes de redução das propriedades e a segunda considerando-se os coeficientes de minoração.

Como citado anteriormente, a determinação do momento resistente de cálculo (M_u) das vigas reforçadas com uma camada de manta de CFRP aplicadas segundo a técnica EBR foi realizada segundo as recomendações da ACI 440.2R (2017).

No cálculo do máximo momento resistente (M_u) das vigas de concreto armado reforçadas a flexão aplica-se um processo iterativo no qual o equilíbrio interno da seção e a compatibilidade das deformações são encontrados após a profundidade da linha neutra (c) satisfazer toda sequência de cálculo e convergir com a posição inicialmente arbitrada. Ao final de todo o processo, os níveis de tensão no aço ($f_{s,s}$) e no reforço de FRP ($f_{f,s}$) são determinados, como apresentado no fluxograma da Figura 64.

Figura 64: Fluxograma de cálculo do máximo momento resistente de uma viga reforçada a flexão



Fonte: O Autor

A Tabela 16 apresenta os parâmetros experimentais adotados para a determinação do momento resistente e força última das vigas de concreto armado de referência (com e sem reforço compósito) e expostas em ambiente laboratorial e às intempéries, seguindo as recomendações da ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2014) e ACI 440.2R (2017).

Para a comparação entre os resultados experimentais e teóricos foi considerado o escoamento máximo da armadura longitudinal ou esmagamento do concreto comprimido como modos de ruína do programa experimental, a partir desses pontos realizaram-se as comparações entre o programa experimental e análise teórica das vigas.

Tabela 16: Parâmetros para determinação da capacidade portante das vigas

Vigas	Norma	f_c (MPa)	E_c (GPa)	f_y (MPa)	E_y (GPa)	f_f (MPa)	E_f (GPa)	A_s (mm ²)	A_f (mm ²)
V_REF_0	NBR 6118	28,5	31,6	547,38	196,89	----	----	157,0	----
	ACI 318					----	----		----
V_REF_CFRP									
V_LAB_CFRP	ACI 440.2R	27,4	31,2			3153,2	248,1		19,4
V_WEA_CFRP		25,2	28,5						

Fonte: O Autor

As Tabelas 17 e 18 apresentam a comparação entre os valores experimentais e teóricos encontrados para as vigas de referência sem reforço e reforçadas, em que $F_{u,exp}$ e $F_{u,teo}$ são as cargas últimas experimentais e teóricas, respectivamente. Para as vigas de referência reforçadas, foi aplicado o coeficiente de redução ambiental ($C_E = 0,85$). O exemplo de dimensionamentos teórico das vigas encontra-se no apêndice D deste trabalho.

Analisando as Tabelas 17 e 18 verifica-se que em todos os ensaios ocorreu primeiro o esmagamento do concreto comprimido e posteriormente o escoamento da armadura longitudinal.

Nota-se, também, que para as vigas de referência reforçadas, o descolamento da manta de CFRP ocorreu a uma carga muito superior à esperada pelo dimensionamento da ACI 440.2R (2017). Observa-se nesse caso que a ACI 440.2R (2017) é conservadora, uma vez que o valor teórico da carga última encontrada foi 20,2% inferior ao valor experimental verificado nos ensaios das vigas de referência reforçadas.

Levando em consideração as vigas de referência sem reforço e sem a redução das propriedades, observa-se que a relação entre carga última a flexão experimental e teórica ficaram próximas a 1,0 e os modos de ruptura foram semelhantes. No entanto, ao aplicar os coeficientes de minoração nas propriedades nota-se uma relação entre as cargas últimas relativamente distantes de 1,0, demonstrando que os modelos analíticos são conservadores.

Para as vigas de referência reforçadas, sem e com a redução das propriedades dos materiais, observa-se uma relação entre as cargas últimas também próximas a 1,0 e modos de ruptura semelhantes. É possível verificar que a utilização do coeficiente de redução ambiental (C_E) não modificou as cargas últimas das vigas de referência reforçadas, apenas reduziu a tensão e deformação última do compósito de CFRP.

Tabela 17: Resultados do programa experimental das vigas de referência

Vigas	Resultados experimentais							Modo de ruína	F_{\max} (kN)
	f_c (MPa)	$F_{s,along\ max}$ (kN)	$\varepsilon_{s,F_{along\ max}}$ (‰)	$\varepsilon_{c,ruína}$ (‰)	F_{esm} (kN)	$\varepsilon_{s,F_{esm}}$ (‰)	$\varepsilon_{c,F_{esm}}$ (‰)		
V_REF_0	28,5	26,7	10,0 (NBR)	6,1	25,4 (NBR)	5,0 (NBR)	3,5 (NBR)	A/C	27,0
		26,9	12,0 (ACI)	6,1	24,9 (ACI)	4,5 (ACI)	3,0 (ACI)		
V_REF_CFRP	28,5	34,0	6,8	9,5	31,5	5,5	3,0	C/A	40,6

A – Deformação excessiva da armadura longitudinal
 B – Descolamento da manta de CFRP
 C – Esmagamento do concreto da zona comprimida

Fonte: O Autor

Tabela 18: Resultados da análise teórica das vigas de referência

Vigas	Modelos analíticos						Modo de ruína	$\frac{F_{u,exp}}{F_{u,teo}}$
	M_u (kN.m)	$F_{u,teo}$ (kN)	x_c ou c (m)	ε_s (‰)	ε_c (‰)			
Sem redução das propriedades	V_REF_0	13,8 (NBR)	24,0 (NBR)	0,037	10	2,68	A	1,05
		13,8 (ACI)	24,0 (ACI)	0,035	12	3,00	A	1,03
	V_REF_CFRP ($C_E=1$)	18,6	32,4	0,053	6,8	3,00	C	0,97
	V_REF_CFRP ($C_E=0,85$)	18,6	32,4	0,053	6,8	3,00	C	0,97
Com redução das propriedades	V_REF_0	11,7 (NBR)	20,4	0,045	10	3,46	A	1,24
		12,4 (ACI)	21,6	0,035	12	3,00	A	1,15
	V_REF_CFRP ($C_E=1$)	16,7	29,1	0,053	6,8	3,00	C	1,08
	V_REF_CFRP ($C_E=0,85$)	16,7	29,1	0,053	6,8	3,00	C	1,08

A – Deformação excessiva da armadura longitudinal
 B – Descolamento da manta de CFRP
 C – Esmagamento do concreto da zona comprimida

Fonte: O Autor

As Tabelas 19 e 20 apresentam a comparação entre os valores experimentais e teóricos das cargas últimas encontradas para as vigas reforçadas expostas em ambiente laboratorial e às intempéries, onde foi considerado o coeficiente de redução ambiental (C_E).

O coeficiente de redução foi aplicado à tensão de tração máxima e deformação última dos compósitos de CFRP para a exposição em ambiente interno ($C_E = 0,95$, para as vigas V_LAB_CFRP) e externo ($C_E = 0,85$, para as vigas V_WEA_CFRP).

Tabela 19: Resultados do programa experimental das vigas expostas aos ambientes

Vigas	Resultados experimentais								
	f_c (MPa)	$F_{s,along\ max}$ (kN)	$\varepsilon_{s,F_{along\ max}}$ (‰)	$\varepsilon_{c,ruina}$ (‰)	F_{esm} (kN)	$\varepsilon_{s,F_{esm}}$ (‰)	$\varepsilon_{c,F_{esm}}$ (‰)	Modo de ruína	F_{max} (kN)
V_LAB_CFRP	27,4	30,0	6,4	4,17	31,7	8,3	3,0	A/C	38,0
V_WEA_CFRP	25,2	29,5	5,9	-----	-----	-----	3,0	-----	36,5

A – Deformação excessiva da armadura longitudinal
B – Descolamento da manta de CFRP
C – Esmagamento do concreto da zona comprimida

Fonte: O Autor

Tabela 20: Resultados da análise teórica das vigas expostas aos ambientes

	Vigas	Modelos analíticos						$\frac{F_{u,exp}}{F_{u,teo}}$
		M_u (kN.m)	$F_{u,teo}$ (kN)	x_c ou C (m)	ε_s (‰)	ε_c (‰)	Modo de ruína	
Sem redução das propriedades	V_LAB_CFRP ($C_E = 0,95$)	18,0	31,3	0,056	6,4	3,00	C	0,95
	V_WEA_CFRP ($C_E = 0,85$)	17,5	30,4	0,060	5,9	3,00	C	0,97
Com redução das propriedades	V_LAB_CFRP ($C_E = 0,95$)	16,2	28,2	0,056	6,4	3,00	C	1,06
	V_WEA_CFRP ($C_E = 0,85$)	15,7	27,3	0,060	5,9	3,00	C	1,08

A – Deformação excessiva da armadura longitudinal
B – Descolamento da manta de CFRP
C – Esmagamento do concreto da zona comprimida

Fonte: O Autor

Nota-se que, devido à falha mecânica dos extensômetros elétricos utilizados para aferição das deformações no concreto das vigas reforçadas expostas às intempéries, a comparação entre as cargas últimas ($F_{u,exp} / F_{u,teo}$) foi realizada considerando o valor encontrado para o alongamento máximo da armadura longitudinal.

De acordo com as Tabelas 19 e 20, observa-se que, para as vigas reforçadas expostas em ambiente laboratorial e às intempéries, o descolamento da manta de CFRP também ocorreu a uma carga muito superior à esperada pelo dimensionamento da ACI 440.2R (2017).

Nota-se que a relação entre as cargas últimas experimentais e teóricas das vigas expostas aos ambientes, sem e com redução das propriedades, também ficou próxima a 1,0 além de apresentar modos de ruína semelhantes.

É possível constatar que, apesar do coeficiente de redução ambiental (C_E) minorar a resistência a tração e deformação última do compósito de CFRP, a redução da carga última das vigas mantidas em ambiente laboratorial e expostas às intempéries se deve principalmente à redução das propriedades mecânicas do concreto experimentalmente avaliado e não da aplicação do coeficiente de redução ambiente (C_E).

5. CONCLUSÕES

Este trabalho é baseado na análise do comportamento mecânico, em longo prazo, de materiais intervenientes e vigas de concreto armado reforçadas à flexão com mantas de fibra de carbono (CFRP) aplicadas segundo a técnica EBR.

Para tal, um programa experimental foi conduzido no intuito de avaliar a possível degradação natural dos materiais constituintes do sistema de reforço e das vigas de concreto armado reforçadas, frente sua exposição em ambiente laboratorial (interno e protegido) e às intempéries (exposição exterior), para com isto obter parâmetros para balizar um futuro modelo de previsão de vida útil do sistema de reforço.

Com base nos resultados obtidos notou-se que a evolução do tempo de cura, de 7 para 14 dias, das resinas epoxídicas do tipo *primer* e de laminação expostas em ambiente laboratorial resultaram em valores estatisticamente equivalentes, ou seja, o tempo de cura não afetou as propriedades mecânicas dos corpos de prova, nem o comportamento do diagrama tensão-deformação destes materiais.

Ainda em relação à exposição em ambiente laboratorial das resinas epoxídicas, foi possível constatar que a resina de laminação apresentou perdas de 23,8 e 19,2% na resistência a tração e módulo de elasticidade após os 8 meses de exposição, respectivamente, além de alteração no modo de ruptura, enquanto a resina do tipo *primer* permaneceu com suas propriedades estatisticamente inalteradas.

Da análise da resina epoxídica do tipo *primer* expostas a intempéries observou-se para os ensaios realizados após 4 e 8 meses de exposição reduções de 39 e 50% da resistência a tração, respectivamente, além da alteração no modo de ruptura das amostras, enquanto o módulo de elasticidade resultou em valores estatisticamente equivalentes.

Da análise da resina epoxídica de laminação exposta por 4 e 8 meses a intempéries verificou-se que a resistência a tração foi reduzida em cerca de 64 e 70%, respectivamente, da condição de referência, com 14 dias de cura, Verificou-se também que o modo de ruptura alterou de dúctil para frágil sem que ocorresse plastificação. Com relação ao módulo de elasticidade, constatou-se que até os 4 meses de exposição os valores foram estatisticamente similares, porém, após os 8 meses, foi verificada uma redução de 18,2% no módulo de elasticidade quando comparado com a condição de referência.

Para os compósitos de CFRP, expostos em ambiente laboratorial e às intempéries, não foram verificados aumentos em suas propriedades mecânicas ao longo da evolução

temporal do tempo de cura de 7 para 14 dias, os seja, os resultados dos ensaios foram estatisticamente equivalentes.

Notou-se ainda que os ensaios realizados após os 8 meses de exposição aos ambientes resultaram em propriedades mecânicas estatisticamente equivalentes a dos ensaios de referência, com 14 dias de cura, sendo verificada apenas uma redução de 18% na resistência a tração após 4 meses de exposição a intempéries.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios das vigas verificou-se a eficiência do reforço com mantas de CFRP aplicadas segundo a técnica EBR.

Tendo como base o comportamento das vigas de referência, e levando em consideração o início do escoamento do aço, constatou-se que o reforço proporcionou um aumento de 28% da rigidez junto com o incremento médio da capacidade de carga de 16%. Para a máxima força registrada, um aumento médio da capacidade de carga de 50% foi verificado.

Para as vigas reforçadas expostas aos ambientes, notou-se que as mesmas mantiveram o incremento de carga e rigidez proporcionado pelo sistema de reforço. Para o início do escoamento do aço das vigas expostas em ambiente laboratorial e às intempéries, observou-se um aumento médio da capacidade de carga de 4,5 e 9,6%, respectivamente, e um aumento da rigidez de 25,5%.

Para a máxima força registrada nas vigas expostas em ambiente laboratorial e às intempéries e levando em consideração os resultados médios das vigas de referência sem reforço, foi verificado um incremento médio da capacidade de carga de 43,9 e 38,3%, respectivamente.

No entanto, foi possível constatar que, tanto a carga de início de escoamento da armadura longitudinal quando a força última registrada nas vigas expostas sofreram reduções quando comparadas às vigas de referência reforçadas. A carga de início de escoamento apresentou uma redução de 12,6 e 8,4% e a força máxima uma redução de 6,4 e 10% para as vigas expostas em ambiente laboratorial e às intempéries, respectivamente.

Para o grau de mobilização médio atingido pelo compósito de CFRP observou-se para as vigas de referência reforçadas uma mobilização inferior (77% de mobilização) ao preconizado pelo fabricante da fibra de carbono (mobilização máxima preconizada 82,6%), enquanto para as vigas expostas em ambiente laboratorial e a intempéries o grau de mobilização foi superior ao sugerido (83,6 e 87,5%, respectivamente).

Em relação aos modos de ruína, constatou-se que a utilização do sistema de reforço CFRP EBR alterou a ruptura dos elementos reforçados. Notou-se que as vigas de referência

sem reforço apresentaram uma ruptura dúctil governada pela deformação acentuada da armadura longitudinal enquanto as vigas reforçadas (de referência e expostas aos ambientes) uma ruptura frágil com o destacamento da manta de CFRP aderida ao substrato de concreto.

Levando-se em consideração a durabilidade do sistema de reforço e as reduções na resistência a flexão das vigas reforçadas expostas às intempéries, estima-se que a degradação tenha ocorrido na resina epoxídica localizada na interface adesivo/substrato de concreto, o que ocasionou a descolagem prematura da manta de CFRP.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de arrancamento direto, foi possível verificar que não houve alteração quanto aos modos de ruptura. Os ensaios realizados nas vigas de referência e expostas aos ambientes apresentaram uma ruptura no concreto e não na interface concreto/adesivo/CFRP. Verificaram-se apenas pequenas reduções na tensão de aderência ao longo dos ensaios realizados.

Com base na comparação entre os resultados teóricos e experimentais foi possível observar para as vigas de referência sem reforço, as quais foram dimensionadas seguindo as premissas das normas ABNT NBR 6118 (2014) e ACI 318 (2014), apresentam valores próximos para carga última, além de modos de ruptura equivalentes. No entanto, ao aplicar os coeficientes de minoração nas propriedades notou-se valores de cargas últimas relativamente distantes.

Para a comparação entre os resultados teóricos e experimentais das vigas de referência reforçadas (sem e com redução das propriedades), as quais foram dimensionadas com base na norma ACI 440.2R (2017), verificou-se valores próximos de carga última, além de modos de ruptura semelhantes. Notou-se ainda que a ACI 440.2R (2017) se mostra conservadora no dimensionamento de vigas de concreto reforçadas externamente com mantas de CFRP.

Para o dimensionamento teórico das vigas reforçadas expostas em ambiente laboratorial e às intempéries foi aplicado o coeficiente de redução ambiente (C_E), presente na ACI 440.2R (2017). Nesse caso, também foram observados valores próximos de carga última quando realizada a comparação entre os resultados teóricos e experimentais. Os modos de ruptura também se mostraram semelhantes.

Observou-se ainda que, o coeficiente de redução ambiental (C_E) reduziu apenas as propriedades mecânicas do compósito de CFRP (resistência a tração e deformação última), sendo que, as perdas da resistência teórica a flexão das vigas expostas aos ambientes foi

causada principalmente pela redução das propriedades do concreto experimentalmente avaliado.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista os resultados obtidos com a elaboração deste trabalho, sugere-se para dar continuidade no tema de comportamento e durabilidade do sistema de reforço com compósitos de CFRP aplicado em vigas de concreto armado, trabalhos futuros que abordem as seguintes questões:

- Durabilidade de vigas de concreto armado reforçadas externamente com mantas de CFRP e expostas a ciclos de umidade e umidade constante.
- Comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com camadas de mantas de CFRP expostas a ciclos de envelhecimento acelerado.
- Simulação numérica da degradação do sistema de reforço com mantas de CFRP aplicados em vigas de concreto.
- Comportamento e durabilidade de vigas de concreto armado confeccionadas com barras de CFRP.
- Influência da temperatura elevada em elementos de concreto armado reforçados com mantas de CFRP.
- Análise *in loco* da atual situação de pontes e viadutos reforçados externamente com mantas de CFRP.
- Aprimoramento dos modelos numéricos disponíveis para simular o comportamento de vigas de concreto reforçadas com mantas de CFRP e expostas a ambientes agressivos.
- Desenvolvimento de um modelo numérico para previsão da vida útil de elementos de concreto reforçados externamente com compósitos de CFRP.
- Caracterização dos materiais constituintes do sistema de reforço expostos a ambientes agressivos, tais como ciclos de gelo-degelo, temperatura, carbonatação, dentre outros.
- Elaboração de um modelo numérico que leve em consideração a interface concreto/adetivo/manta de CFRP.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-JELAWY, H. **Experimental and numerical investigations on bond durability of CFRP strengthened concrete members subjected to environmental exposure**. 2009. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade da Flórida Central, Orlando, Flórida.

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.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Committee 440.2R**: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Michigan, USA, 2017.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Committee 440.9R**: Guide to accelerated conditioning protocols for durability assessment of internal and external fiber-reinforced polymer (FRP) Reinforcement. Michigan, USA, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638**: Standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken, Pensilvânia, EUA, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7522**: Standard test method for pull-off strength for FRP laminate systems bonded to concrete substrate. West Conshohocken, Pensilvânia, EUA, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos elásticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6892-1**: Materiais metálicos – Ensaio de tração, Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2018.

AZEVEDO, D. M. M. **Reforço de estruturas de betão com colagem de sistemas compósitos de CFRP – Recomendações para Dimensionamento**. 2008. 238 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto.

BAIÃO, E. R. **Desenvolvimento de uma metodologia para o uso do *scratch for arduino* no ensino médio**. 2016. 101 f. Dissertação (Mestre em Educação) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BANEA, M. D.; SILVA, L. F. M.; CAMPILHO, R. D. S. G. Mechanical characterization of a high temperature epoxy adhesive. **Galati University Press**, v. 22, p. 57-61, 2011.

BARELLA, B. P.; MOURA JUNIOR, J. R. V.; BORGES, R. A. Introdução ao estudo da plataforma arduino para desenvolvimento de aplicações em integridade estrutural. In: Estudos Interdisciplinares em Ciências Exatas e da Terra. São Paulo, 123-136, 2016.

BUYUKOZTURK, O.; HEARING, B. Failure behavior of precracked concrete beams retrofitted with FRP. **Journal of composites for construction**, v. 2, n. 3, p. 138–144, 1998.

CAROLIN, A. **Carbon fiber reinforced polymers for strengthening of structural elements**. 2003. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Lulea University of Technology.

COELHO, M. R. F.; SENA-CRUZ, J. M.; NEVES, L. A. C. A review on the bond behavior of FRP NSM systems in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 1157-1169, 2015.

COELHO, M.; SILVA, L.; SENA-CRUZ, J.M.; BARROS, J. Estudo comparativo de diferentes técnicas no reforço à flexão de vigas de betão armado com recurso a CFRP's sob acções monotónicas e de fadiga. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. p. 1–18, 2011.

CORREIA, L.; TEIXEIRA, T.; MICHELS, J.; ALMEIDA, J. A. P. P.; SENA-CRUZ, J. Flexural behaviour of RC slabs strengthened with prestressed CFRP strips using different anchorage systems. **Composites Part B**. v. 81, p. 158-170, 2015.

CROMWELL, J. R.; HARRIES, K. A.; SHAHROOZ, B. M. Environmental durability of externally bonded FRP materials intended for repair of concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2528–2539, 2010.

DALFRÉ, G. M. **Flexural and shear strengthening of RC elements**. 2013. 432 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

DALFRÉ, G. M. (2016). Projeto Universal CNPq 483720/2013-5: **Estudo da degradação da aderência de compósitos colados a superfícies de concreto armado quando submetidos a ciclos de umidade e carbo-natação**. Relatório Técnico, CNPq.

DE LORENZIS, L; TENG, J. G. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. **Composites Part B**, v. 38, p. 119–143, 2007.

DIAS, S.; BARROS, J.; AZEVEDO, C. Comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos. In: Encontro nacional BETÃO ESTRUTURAL – BE2012, FEUP, 24-26 out, 2012.

EL-HACHA, R.; RIZKALLA S. H. Near-Surface-Mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures. **ACI Structural Journal**, v. 101, n. 5, p. 717-726, 2004.

EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Meteorologia**. Disponível em: <<http://www.cppse.embrapa.br/meteorologia/index.php?pg=caracterizacao>>. Acesso em: 15/11/2019. 2019.

ESCOBAL, A. D. Caracterização da degradação de adesivos estruturais utilizados em sistemas de reforço de estruturas de concreto armado. **Relatório final do projeto de pesquisa de iniciação científica**, São Carlos, 2016, 77 p.

EUROCOMP. Structural design of polymer composites – Design code and handbook. Editado por John L. Clarke. Londres, 1996.

FERNANDES, P. M. G. **Bond behaviour of NSM CFRP – Concrete systems: durability and quality control**. 280 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

FERNANDES, P.; SILVA, P.; CORREIA, L.; SENA-CRUZ, J. Durabilidade de um adesivo epóxi e um laminado de CFRP expostos a distintas condições ambientais. 3º Seminário sobre o projeto de reforço de estruturas de betão com FRP'S, p. 8-14, 2015.

FERRARI, V. J.; HANAI, J. B. de. Reforço à flexão de vigas de concreto armado com Tecido de Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (PRFC) aderido a substrato de transição constituído por compósito cimentício de alto desempenho. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 5, n. 5, p. 596-626, out 2012.

FIB Bulletin 14. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures – Technical report, Lausanne, Switzerland, 2001.

GANGARAO, H. V. S.; TALY, N.; VIJAY, P. V. Reinforced concrete design with FRP composites. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 400 pp., 2007.

INMET Instituto Nacional de Meteorologia. **Estações meteorológicas de superfície automática**. Disponível em: <<https://goo.gl/ry9dxj>>. Acesso em: 08/02/2019. 2019.

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.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 527-1**: Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles. Genebra, Suíça, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 527-2**: Plastics - Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics. Genebra, Suíça, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 527-5**: Plastics - Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites. Genebra, Suíça, 2012.

JSCE (Japan Society of Civil Engineers). Recommendation for upgrading of concrete structures with use of continuous fiber sheets. Tokyo, Japan, 2001.

JUVANDES, L. F. P. Aplicações de compósitos FRP no reforço de estruturas. **1^{as} Jornadas de MATERIAIS NA CONSTRUÇÃO**, p. 239–270, 2011.

JUVANDES, L. F. P. **Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de “CFRP”**. 1999. 396 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto.

KABIR, M. I.; SHRESTHA, R.; SAMALI, B. Experimental study on durability of CFRP-Concrete bond subjected to temperature, humidity and outdoor environment. In: Fourth Asia-Pacific Conference on FRP in Structure, 11-13 dez, 2013, Melbourne, Australia.

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. 268, p. 238-247, 2003.

KARBHARI, V. M. **Durability of composites for civil structural applications**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2007.

KHAN, R.; FAREED, S. Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by CFRP wraps with and without end anchorages. **Procedia Engineering**. v. 77, p. 123–130, 2014.

LONG, M.; DJELAL, C.; KESTELOOT, S.; BIGOURDAN, B.; LE GAC, P. Y.; SZULC, J. Durability of CFRP-Concrete bonding in a marine environment. In: 15^o European conference on composite materials, Venice, Italy, 24-28 Junho 2012.

MACHADO, A. P.; MACHADO, B. A. **Reforço de estruturas de concreto armado com sistemas compostos FRP**. São Paulo: Pini, 2015.

NORDIN, H. **Flexural strengthening of concrete structures with prestressed near surface mounted CFRP rods**. 2003. 143 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade da Tecnologia – Lulea, Suécia.

OBAIDAT, Y. T.; HEYDEN, S.; DAHLBLOM, O.; ABU-FARSAKH, G.; ABDEL-JAWAD, Y. Retrofitting of reinforced concrete beams using composite laminates. **Construction and Building Materials**. v. 25, p. 591-597, 2010.

PAN, Y.; XIAN, G.; SILVA, M. A. G. Effects of water immersion on the bond behavior between CFRP plates and concrete substrate. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 326-337, 2015.

REZAZADEH, M.; BARROS, J. A. O.; RAMEZANSEFAT, H. End concrete cover separation in RC structure strengthened in flexure with NSM FRP: Analytical Design Approach. **Engineering Structure**. v. 128, p. 415-427, 2016.

ROLIM, G. S.; CAMARGO, M. B. P.; LANIA, D. G.; MORAES, J. F. L. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 66, n. 4, p. 711-720, 2007.

SÁ JUNIOR, A. **Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do estado de Minas Gerais**. 2009. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras – Lavras, Minas Gerais.

SHOKRIEH, M. M.; BAYAT, A. Effects of ultraviolet radiation on mechanical properties of glass/polyester composites. **Journal of Composite Materials**, v. 41, set 2007.

SIGNOR, A. W.; VANLANDINGHAM, M. R.; CHIN, J. W. Effects of ultraviolet radiation exposure on vinyl ester resins: characterization of chemical, physical and mechanical damage. **Polymer Degradation and Stability**, v. 79, p. 359–368, 2002.

SILVA, P. M. **Time-dependent behaviour and durability of RC slabs strengthened with NSM CFRP strips**. 2017. 357 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

SILVA, J. L. S.; CAVALCANTE, M. M.; CAMILO, R. S.; GALINDO, A. L.; VIANA, E. C. Plataforma arduíno integrado ao PLX-DAQ: Análise e aprimoramento de sensores com

ênfase no LM35. Conference: Escola Regional de Computação Bahia, Alagoas e Sergipe. 2014. Feira de Santana. **Anais....** Feira de Santana, Bahia.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1 ed. São Paulo: Pini, 2009.

S&P (S&P Clever Reinforcement Company). **Ficha técnica da manta de fibra de carbono C-Sheet 240 para dry e wet lay up**: catálogo. São Paulo, 2019.

TENG, J. G.; CHEN, J. F.; SMITH, S. T.; LAM, L. Behaviour and strength of FRP-strengthened RC structures: a state-of-the-art review. **Structures & Buildings**, v. 156, p. 51-62, 2003.

TRIANAFILLOU, T. C.; PLEVRIS, N. Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fiber-composite materials. **Materials and Structures**, v. 25, p. 201-211, 1992.

VAZ, N.; AGUIAR, J. B.; CAMÕES, A. Influência de temperaturas elevadas no comportamento de reforços exteriores de betão armado. **Revista Internacional Construlink**, v. 3, n. 8, p. 22-29, 2005.

WU, Y.; HUANG, Y. Hybrid bonding of FRP to reinforced concrete structures. **Journal of Composites for Construction**, v. 12, n. 3, p. 266–273, 2008.

ZHENG, X. H.; HUANG, P. Y.; GUO, X. Y.; HUANG, J. L. Experimental study on bond behavior of FRP-Concrete interface in hygrothermal environment. **International Journal of Polymer Science**, 2016.

ZHAO, J.; CAI, G.; CUI, L.; SI LARBI, A.; TSAVDARIDIS, K. D. Deterioration of Basic Properties of the Materials in FRP-Strengthening RC Structures under Ultraviolet Exposure. **Polymers**, v. 9, 2017.

APÊNDICE B – DIAGRAMAS INDIVIDUAIS DE TENSÃO *VERSUS* DEFORMAÇÃO DAS RESINAS EPOXÍDICAS E DOS COMPÓSITOS DE CFRP

As Figuras B.1 à B.6 apresentam os diagramas individuais de tensão *versus* deformação das resinas epoxídicas e dos compósitos de CFRP.

Figura B.1: Diagramas tensão *versus* deformação das resinas do tipo *primer* expostas em ambiente laboratorial

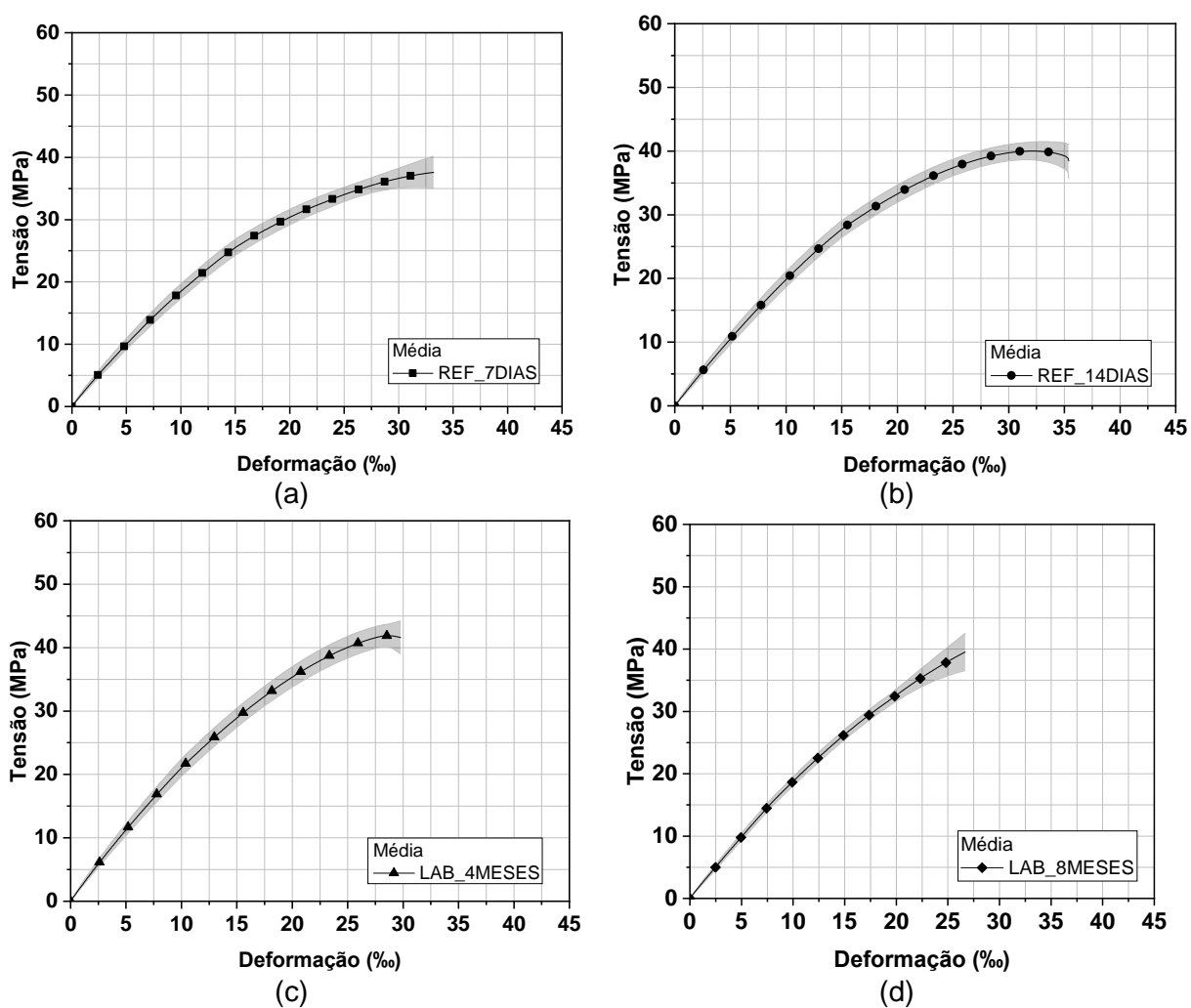
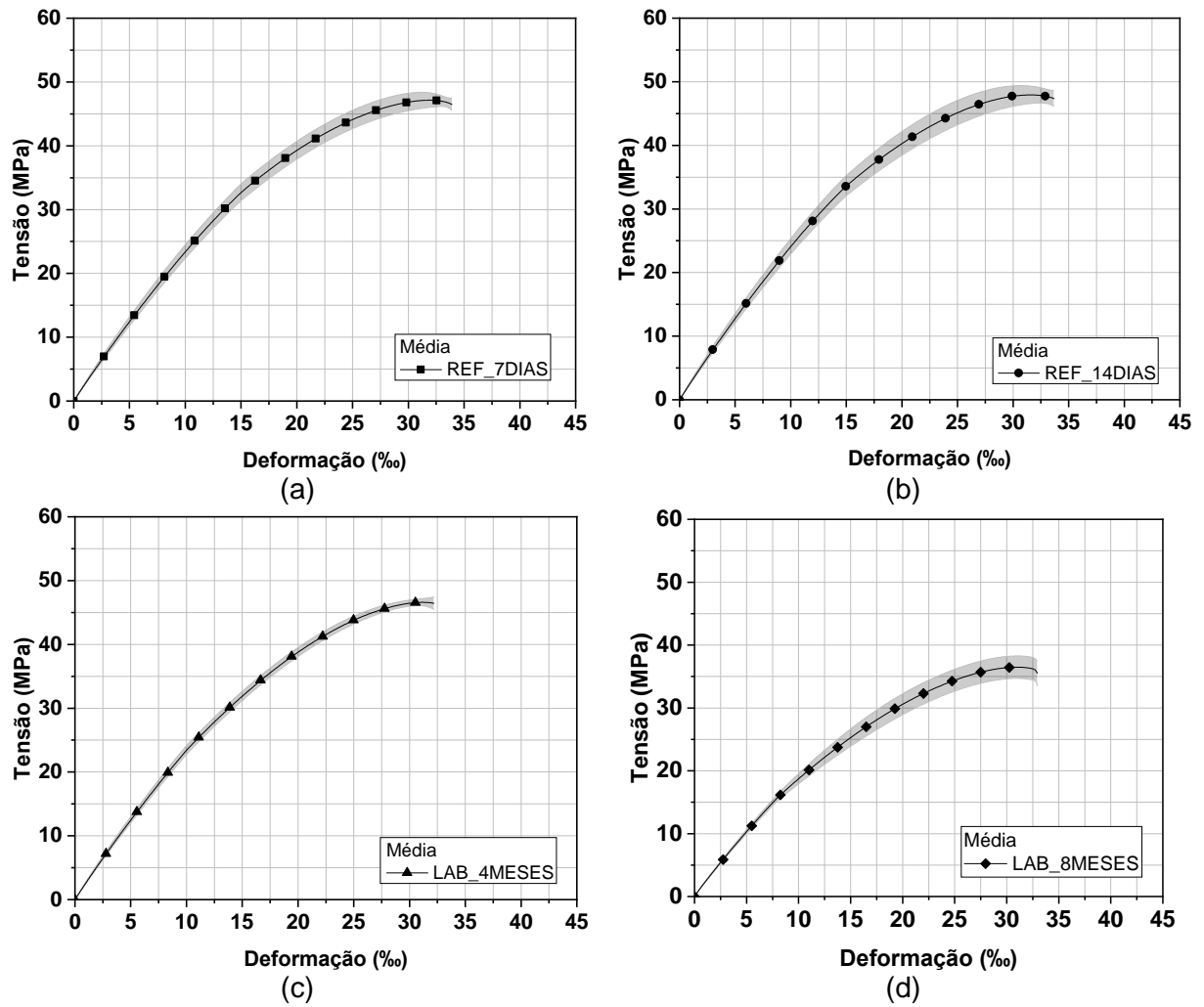
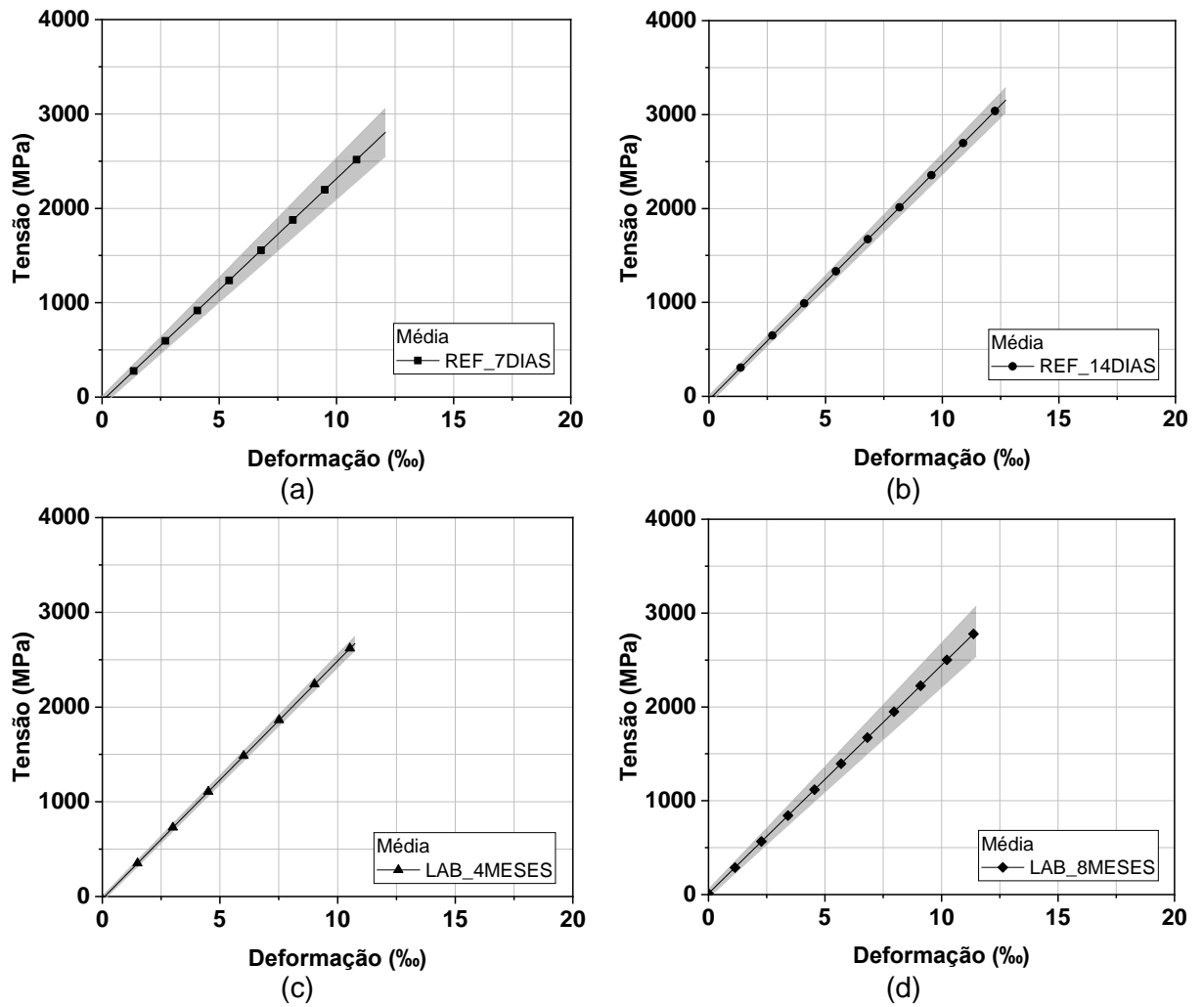


Figura B.2: Diagramas tensão versus deformação das resinas de laminação expostas em ambiente laboratorial.



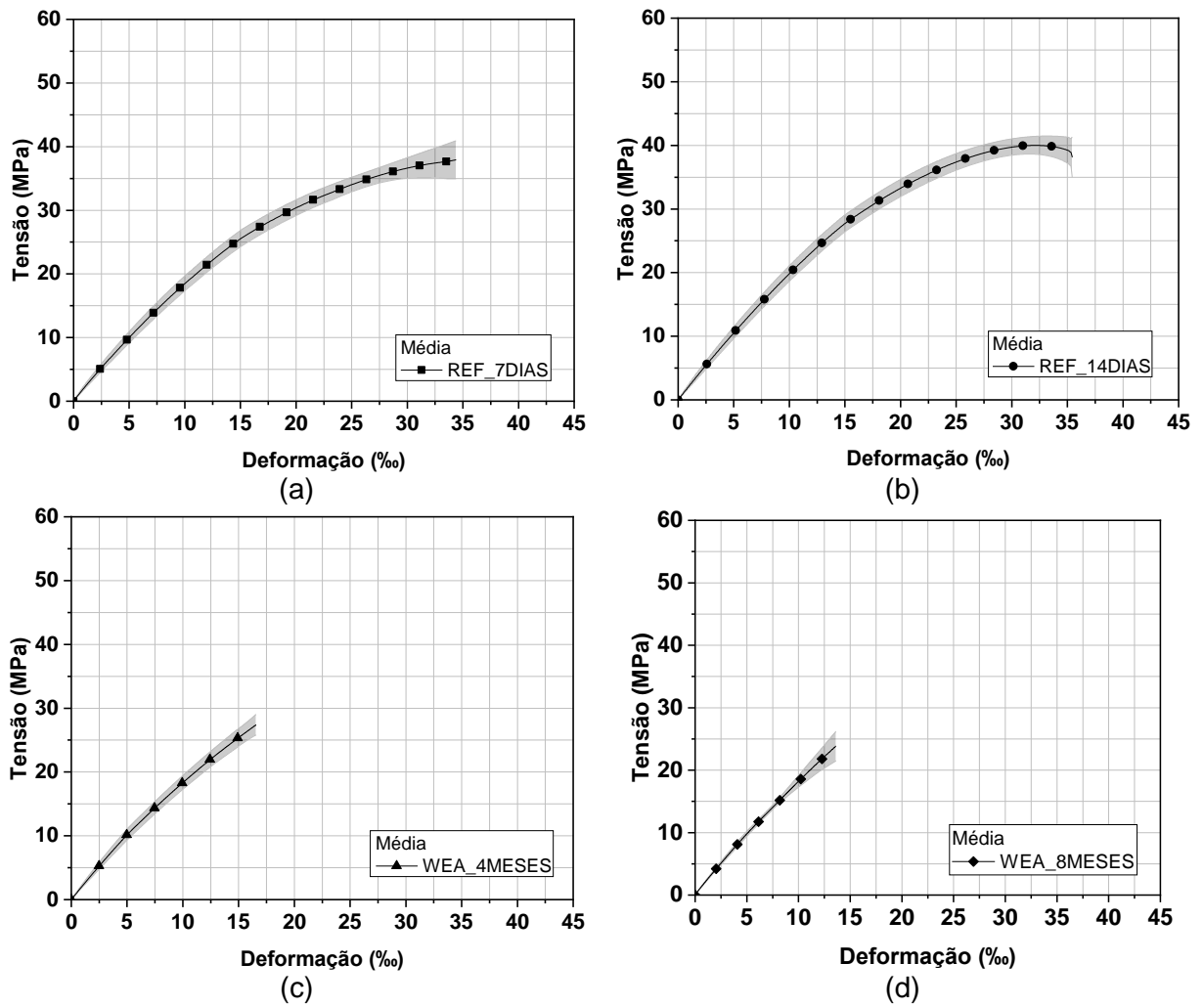
Fonte: O Autor

Figura B.3: Diagramas tensão versus deformação dos compósitos de CFRP expostos ao ambiente laboratorial



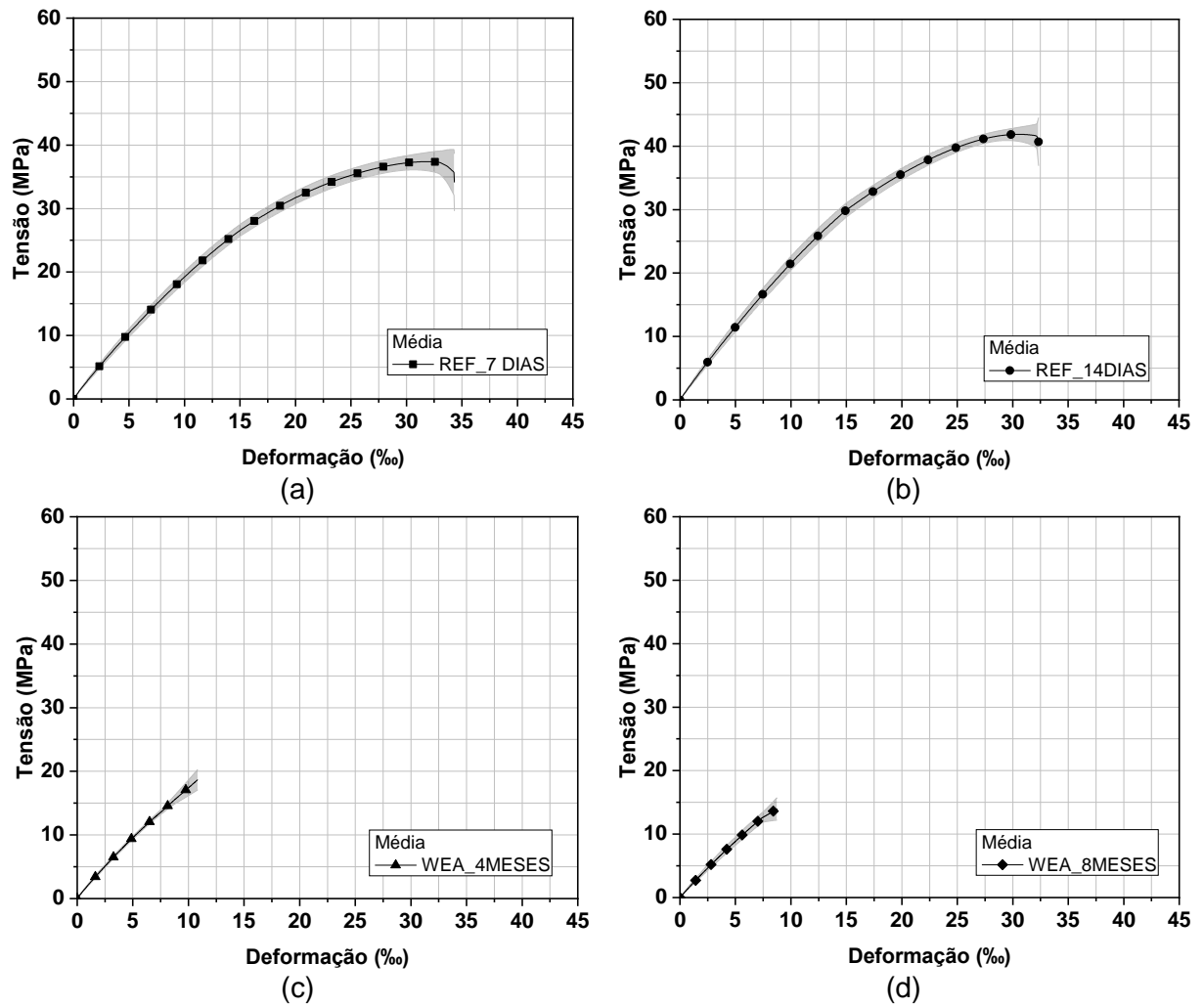
Fonte: O Autor

Figura B.4: Diagramas tensão versus deformação das resinas do tipo *primer* expostas a intempéries



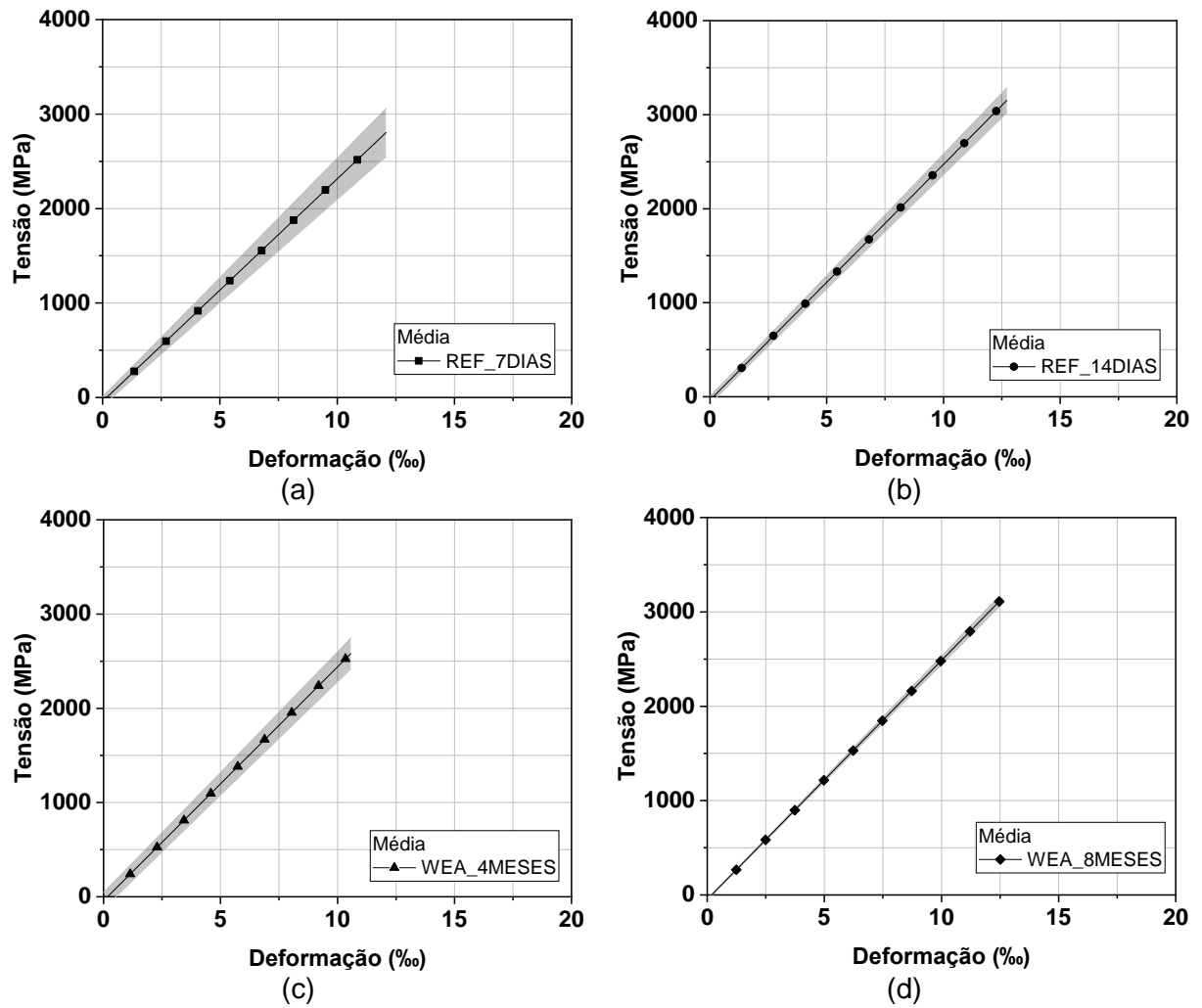
Fonte: O Autor

Figura B.5: Diagramas tensão versus deformação das resinas de laminação expostas a intempéries



Fonte: O Autor

Figura B.6: Diagramas tensão versus deformação dos compósitos de CFRP expostos às intempéries



Fonte: O Autor

APÊNDICE C – DESLOCAMENTO LATERAL DA FACE SUPERIOR DAS VIGAS NA SEÇÃO DE APOIO E DELOCAMENTO DO PERFIL METÁLICO

As Figuras C.1 a C.8 apresentam os resultados do deslocamento lateral da face superior das vigas na seção de apoio e o deslocamento do perfil metálico do dispositivo de ensaio.

V_REF_0

Figura C.1: Força versus deslocamento lateral da face superior da viga na seção de apoio

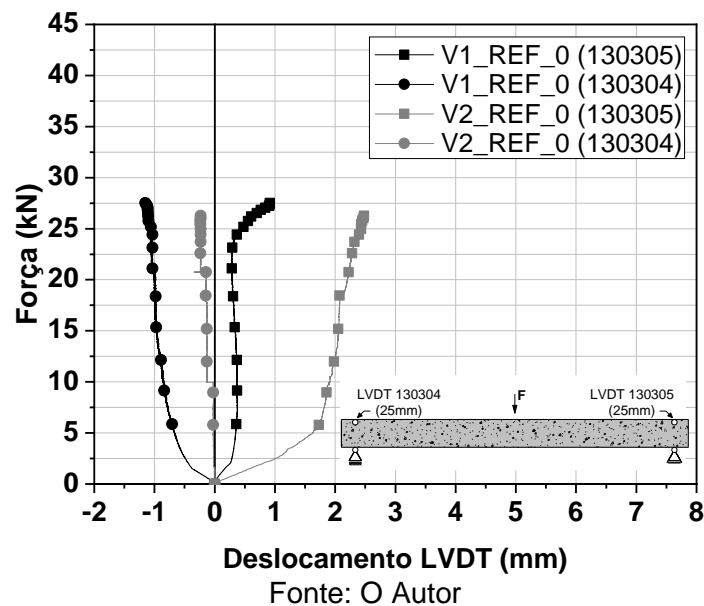
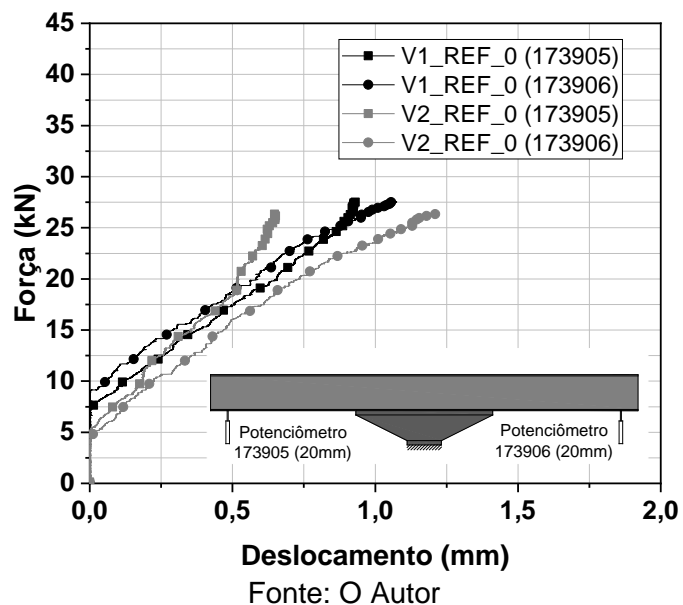


Figura C.2: Força versus deslocamento do perfil metálico



V_REF_CFRP

Figura C.3: Força versus deslocamento lateral da face superior da viga na seção de apoio

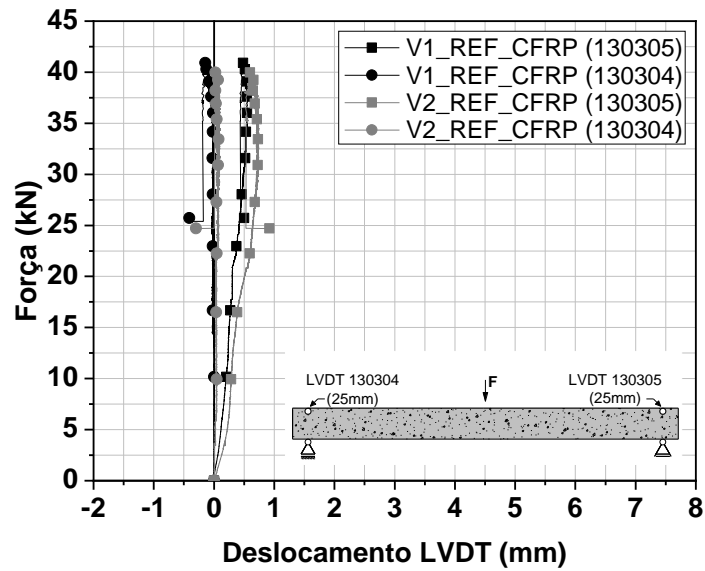
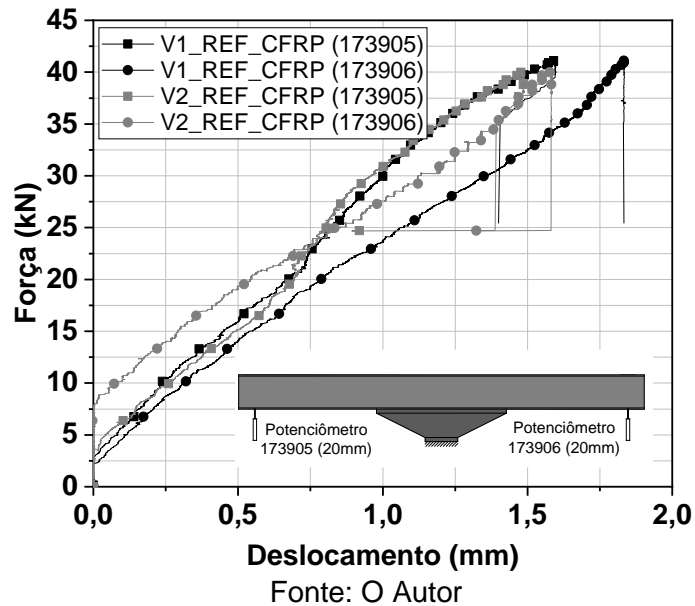


Figura C.4: Força versus deslocamento do perfil metálico



V_LAB_CFRP

Figura C.5: Força versus deslocamento lateral da face superior da viga na seção de apoio

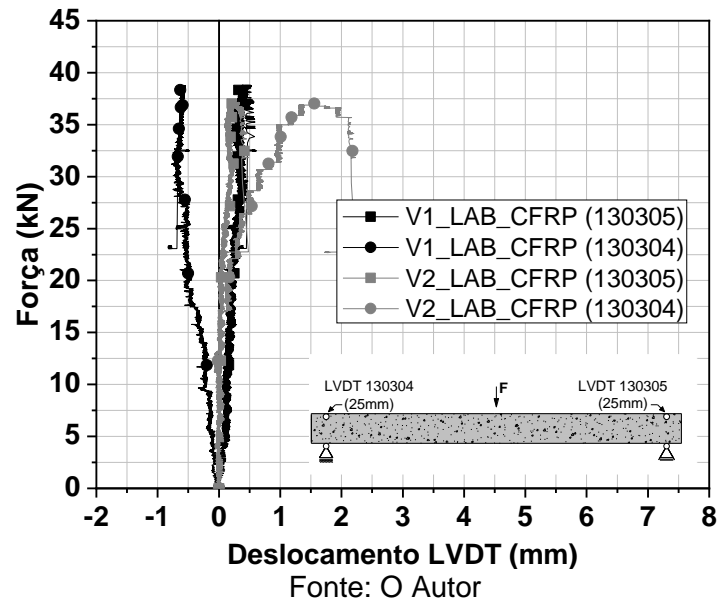
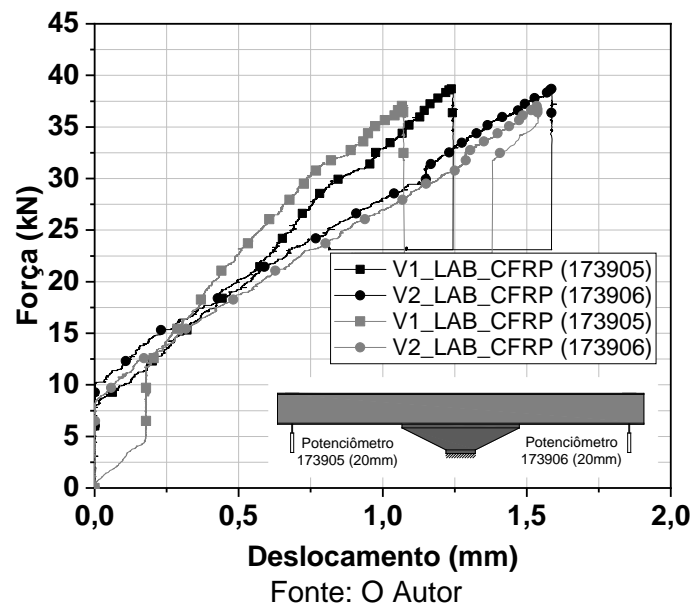


Figura C.6: Força versus deslocamento do perfil metálico



V_WEA_CFRP

Figura C.7: Força versus deslocamento lateral da face superior da viga na seção de apoio

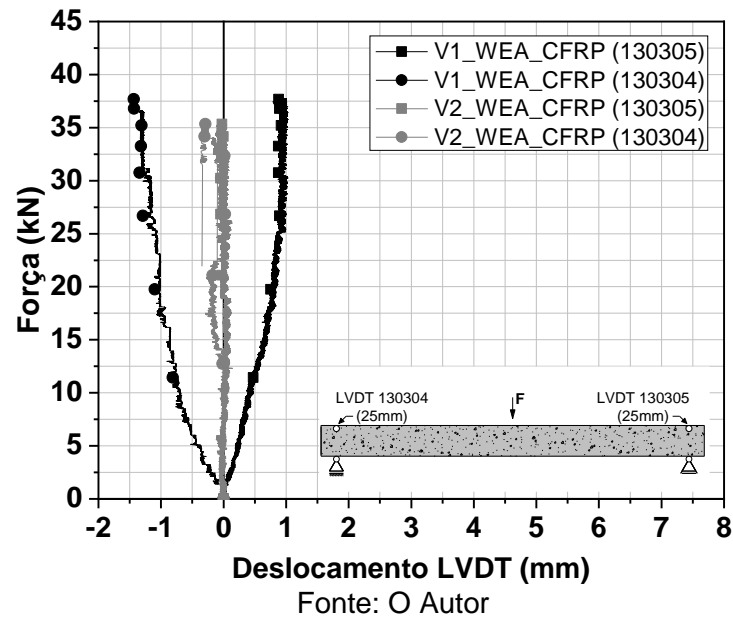
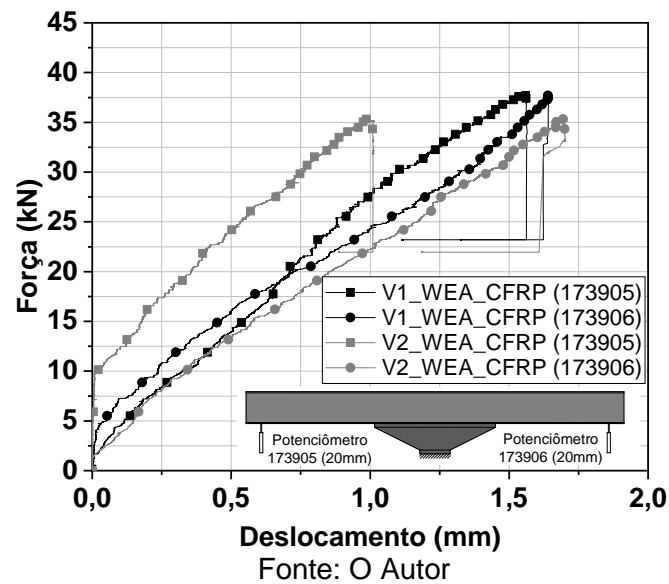


Figura C.8: Força versus deslocamento do perfil metálico



APÊNDICE D – MODELOS DE DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS

APÊNDICE D.1 – MODELO DE DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS DE REFERÊNCIA SEGUNDO AS NORMAS TÉCNICAS

Apresentam-se a seguir o modelo de dimensionamento utilizado no cálculo do momento resistente das vigas de referência. Para este dimensionamento não foram aplicados os coeficiente de minoração das propriedades dos materiais experimentalmente encontradas, sendo assim, foram utilizados os seguintes valores:

$$f_c = 28,5MPa$$

$$E_c = 31,6GPa$$

$$f_y = 547,38MPa$$

$$E_y = 196,89GPa$$

$$f_{fu} = 3153,16MPa$$

$$\varepsilon_{fu} = 1,28\%$$

$$E_f = 248,12GPa$$

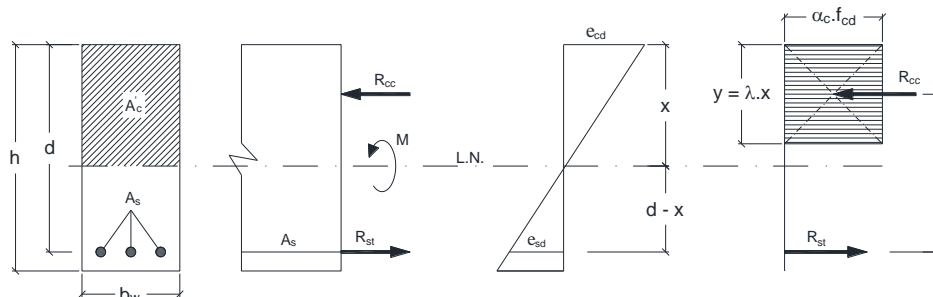
$$C_E = 1$$

Os resultados dos dimensionamentos abaixo são apresentados na Tabela 18 no item “Sem redução das propriedades”.

D.1.1 FLEXÃO SEGUNDO A ABNT NBR 6118 (2014)

A determinação da resistência à flexão das vigas de referência sem reforço foi baseada na ABNT NBR 6118 (2014), com o uso do diagrama simplificado de distribuição de tensões e deformações de uma viga de seção retangular com armadura simples (Figura C.1.1).

Figura D.1.1: Diagrama de tensão e deformação de uma viga de seção retangular



Fonte: O Autor

Para o cálculo do máximo momento resistente foram utilizadas as formulações apresentadas nas Equações 1 a 3, onde M é o momento resistente, A_s é a área da armadura longitudinal, f_y é a tensão de escoamento do aço, d é a altura útil, λ é o valor definido em 0,8 para a altura do diagrama retangular simplificado da distribuição de tensões do concreto comprimido de resistência até 50 MPa, x é a profundidade da linha neutra, α_c é igual ao valor de 0,85 da tensão máxima de compressão para concretos até 50 MPa e f_c é a resistência característica do concreto.

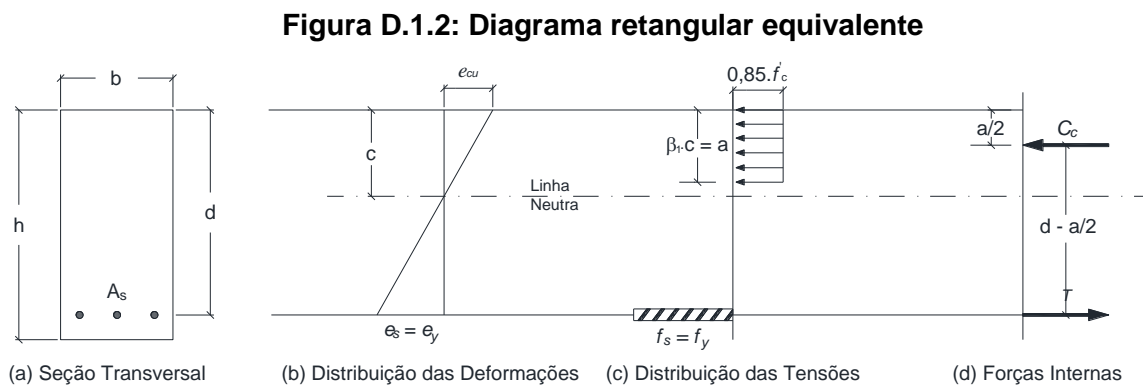
$$M = A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right) = 1,57.54,73 \cdot \left(0,175 - \left(\frac{0,8 \cdot 0,036}{2} \right) \right) = 13,77 \text{ kN.m} \quad (1)$$

$$M = \alpha_c \cdot \lambda \cdot b_w \cdot f_c \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right) = 0,85 \cdot 0,8 \cdot 0,12 \cdot 28500 \cdot \left(0,175 - \left(\frac{0,8 \cdot 0,036}{2} \right) \right) = 13,77 \text{ kN.m} \quad (2)$$

$$x = \frac{A_s \cdot f_y}{\alpha_c \cdot \lambda \cdot b_w \cdot f_c} = \frac{1,57.54,73}{0,85 \cdot 0,8 \cdot 0,12 \cdot 28500} = 0,036 \text{ m} \quad (3)$$

D.1.2 FLEXÃO SEGUNDO A ACI 318 (2014)

Com relação ao dimensionamento segundo o ACI 318 (2014), esta recomendação também permite como simplificação o uso de um diagrama retangular equivalente para tensão no concreto, tal como apresenta a Figura D.1.2.



Fonte: O Autor

Os valores de β_1 variam de acordo com a classe de resistência a compressão do concreto (f'_c) e possuem os valores apresentados na Equação 4.

$$\beta_1 \begin{cases} 0,85 & \text{para } f'_c < 28MPa \\ 0,85 - \frac{0,05 \cdot (f'_c - 28)}{7} & \text{para } 28 < f'_c < 55MPa \\ 0,65 & \text{para } f'_c > 55MPa \end{cases} \quad (4)$$

Logo, por intermédio da Equação 5, calcula-se a profundidade do bloco retangular equivalente (a), onde f'_c é a resistência característica à compressão do concreto, A_s é área de armadura tracionada, f_y é a tensão de escoamento do aço e b é a largura da seção transversal do elemento analisado.

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} = \frac{157.547,38}{0,85 \cdot 28 \cdot 5.120} = 29,58mm \quad (5)$$

A linha neutra (c) é calculada por meio da Equação 6.

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{29,58}{0,846} = 34,96mm = 3,49cm \quad (6)$$

A altura útil (d) é obtida por intermediário da Equação 7, onde (h) é a altura da seção transversal, (c) é o cobrimento, \varnothing_{estr} é o diâmetro do estribo e \varnothing_{long} é o diâmetro da armadura longitudinal tracionada. Portanto,

$$d = h - c - \varnothing_{estr} - \frac{\varnothing_{long}}{2} = 0,2 - 0,015 - 0,005 - \frac{0,01}{2} = 0,175m \quad (7)$$

A deformação do aço (ε_s) é obtida a partir da compatibilidade de deformações apresentada na Equação 8. A norma ACI 318 (2014) considera que a deformação última no concreto (ε_{cu}) possui valor de 3‰. Assim:

$$\varepsilon_s = \left(\frac{d-c}{c} \right) \varepsilon_{cu} = \left(\frac{0,175-0,0349}{0,0349} \right) \cdot 0,003 = 0,012 \quad (8)$$

Desta forma, quando o aço está escoando (ou seja, $\varepsilon_s > \varepsilon_{sy}$, equação 9), obtém-se o momento resistido pela seção (M) por intermédio da Equação 10.

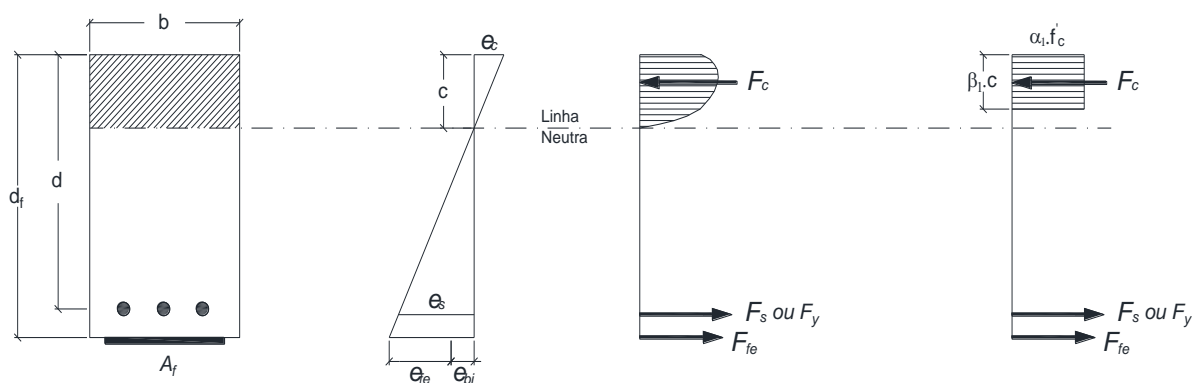
$$\varepsilon_{sy} = \frac{f_y}{E} = \frac{547,38}{196890} = 0,00278 \quad (9)$$

$$M = A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) = 157.547,38 \cdot \left(175 - \frac{29,58}{2} \right) = 13770000 \text{ N}\cdot\text{mm} = 13,77 \text{ kN}\cdot\text{m} \quad (10)$$

D.1.3 RESISTÊNCIA TEÓRICA APÓS A APLICAÇÃO DO REFORÇO (VIGAS DE REFERÊNCIA REFORÇADAS)

Para o cálculo da resistência teórica das vigas de referência após a aplicação do sistema de reforço CFRP EBR foram consideradas as recomendações da ACI 440.2R (2017). A esquematização do equilíbrio de forças de uma viga de concreto armado reforçada com mantas de CFRP segundo a técnica EBR pode ser verificada na Figura D.1.3.

Figura D.1.3: Equilíbrio de forças da seção reforçada



Fonte: ACI 440.2R (2017)

No cálculo do máximo momento resistente da viga reforçada foram utilizadas as formulações apresentadas nas Equações 11 a 22. Por meio da Equação 11 foi calculado a deformação máxima permitida para o CFRP (ε_{fd}), onde f'_c é a resistência característica do concreto, n é o número de camadas de CFRP, E_f é o módulo de elasticidade da fibra de carbono, t_f é a espessura e ε_{fu} é a deformação do CFRP.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{fd} &= 0,41 \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{28,50}{1.248120,0,176}} = 0,01047 \\ \varepsilon_{fd} &= 0,9 \cdot \varepsilon_{fu} = 0,9 \cdot 0,0128 = 0,0115 \\ \therefore \varepsilon_{fd} &= 0,01047\end{aligned}\tag{11}$$

Logo, arbitra-se uma posição inicial para a posição da linha neutra (c) para se encontrar a deformação efetiva (ε_{fe}) e a tensão de ruptura do CFRP (f_{fe}), cujos valores são obtidos por intermédio das Equações 12 e 13. Note-se que ε_{cu} é a deformação última do concreto (3‰), d_f é a altura útil do reforço a flexão e ε_{bi} é a deformação pré-existente no concreto no momento da instalação do reforço.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} = 0,003 \cdot \left(\frac{20 - 5,34}{5,34} \right) - 0,000069 = 0,0081\tag{12}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{fe} &\leq \varepsilon_{fd} \\ \therefore \varepsilon_{fe} &= 0,0081\end{aligned}$$

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} = 248120,0,0081 = 2023,14MPa\tag{13}$$

Assim, a deformação (ε_s) e a tensão (f_s) na armadura longitudinal, assim como a deformação no concreto (ε_c), foram determinados na sequência com o uso das Equações 14 a 16.

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d-c}{d_f-c} \right) = (0,0081 + 0,000069) \cdot \left(\frac{17,5-5,34}{20-5,34} \right) = 0,0068 \quad (14)$$

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s = 196890 \cdot 0,0068 = 1342,79 \leq f_y = 547,38 \quad (15)$$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{c}{d_f-c} \right) = (0,0081 + 0,000069) \cdot \left(\frac{5,34}{20-5,34} \right) = 0,003 \quad (16)$$

Uma vez que os níveis de tensão e deformação no CFRP e na armadura longitudinal foram determinados, o equilíbrio interno da seção foi encontrado com o uso das Equações 17 a 20 onde ε_c' é a deformação máxima do concreto não confinado, E_c é o módulo de elasticidade do concreto, β_1 é razão de profundidade do bloco retangular das tensões de compressão, α_1 é um parâmetro definido para seção retangular de blocos de concreto a compressão, A_s é a área de aço da seção, A_f é a área da seção transversal da fibra de carbono, f_s é a tensão de escoamento do aço e f_{fe} é a tensão na fibra de carbono.

$$\varepsilon_c' = \frac{1,71 \cdot f_c'}{E_c} = \frac{1,71 \cdot 28,5}{31570} = 0,00154 \quad (17)$$

$$\beta_1 = \frac{4 \cdot \varepsilon_c' - \varepsilon_c}{6 \cdot \varepsilon_c' - 2 \cdot \varepsilon_c} = \frac{4 \cdot 0,00154 - 0,003}{6 \cdot 0,00154 - 2 \cdot 0,003} = 0,97 \quad (18)$$

$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot \varepsilon_c' \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 \cdot \beta_1 \cdot \varepsilon_c'^2} = \frac{3 \cdot 0,00154 \cdot 0,003 - 0,003^2}{3 \cdot 0,97 \cdot 0,00154^2} = 0,70 \quad (19)$$

$$c = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\alpha_1 \cdot f_c' \cdot \beta_1 \cdot b} = \frac{157 \cdot 547,38 + 19,3 \cdot 2023,14}{0,70 \cdot 28,5 \cdot 0,97 \cdot 120} = 53,46 \text{ mm} \quad (20)$$

Por fim, após a posição da linha neutra (c) atender simultaneamente as Equações 13 a 16 e 20, o momento resistente (M) do elemento reforçado pode ser encontrado com o uso da

Equação 21, onde F_s é a força resultante da armadura tracionada, ψ_f é o fator de redução (0,85) baseado em análises de confiabilidade de elementos reforçados a flexão e F_f é a força resultante da fibra de carbono tracionada.

$$M_s = F_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) = 85982,45 \cdot \left(175 - \frac{0,97 \cdot 53,4}{2} \right) = 12810083,5 N \cdot mm = 12,81 kN \cdot m$$

$$M_f = \Psi_f \cdot F_f \cdot \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) = 0,85 \cdot 39167,99 \cdot \left(200 - \frac{0,97 \cdot 53,4}{2} \right) = 5792442,4 N \cdot mm = 5,79 kN \cdot m \quad (21)$$

$$M = M_s + M_f = 12,81 + 5,79 = 18,60 kN \cdot m$$

APÊNDICE D.2 – MODELO DE DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS REFORÇADAS EXPOSTAS EM AMBIENTE LABORATORIAL

Apresentam-se a seguir o modelo de dimensionamento utilizado no cálculo do momento resistente das vigas reforçadas expostas em ambiente laboratorial. Para este dimensionamento também não foram aplicados os coeficiente de minoração das propriedades dos materiais experimentalmente encontradas apenas o coeficiente de redução ambiente (C_E), sendo assim, foram utilizados os seguintes valores:

$$f_c = 27,4 MPa$$

$$E_c = 25,2 GPa$$

$$f_y = 547,38 MPa$$

$$E_y = 196,89 GPa$$

$$f_{fu} = 2995,502 MPa$$

$$\varepsilon_{fu} = 1,216\%$$

$$E_f = 248,12 GPa$$

$$C_E = 0,95$$

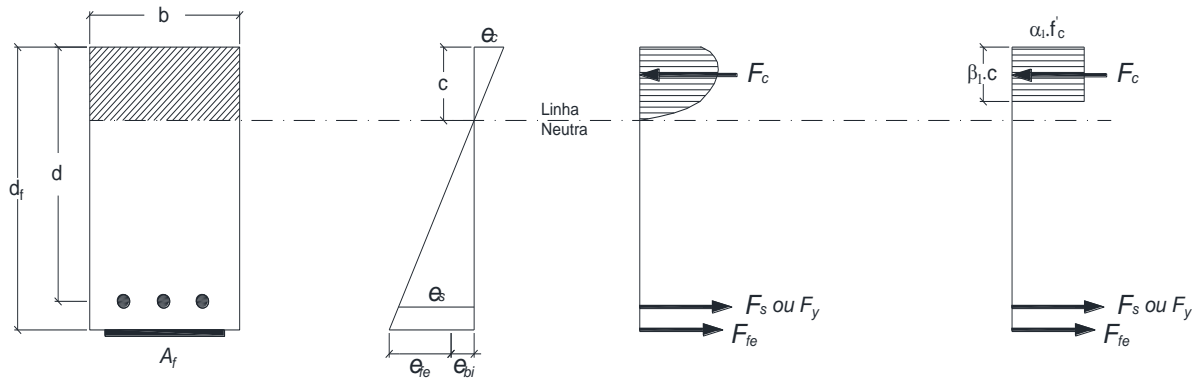
Os resultados dos dimensionamentos abaixo são apresentados na Tabela 20 no item “Sem redução das propriedades”.

D.2.1 RESISTÊNCIA TEÓRICA APÓS A APLICAÇÃO DO REFORÇO (VIGAS REFORÇADAS EXPOSTAS EM AMBIENTE LABORATORIAL)

Para o cálculo da resistência teórica das vigas reforçadas expostas em ambiente laboratorial também foram consideradas as recomendações da ACI 440.2R (2017). A esquematização

do equilíbrio de forças de uma viga de concreto armado reforçada com mantas de CFRP segundo a técnica EBR pode ser verificada na Figura D.2.1.

Figura D.2.1: Equilíbrio de forças da seção reforçada



Fonte: ACI 440.2R (2017)

No cálculo do máximo momento resistente da viga reforçada foram utilizadas as formulações apresentadas nas Equações 11 a 22. Por meio da Equação 11 foi calculado a deformação máxima permitida para o CFRP (ε_{fd}).

$$\begin{aligned}\varepsilon_{fd} &= 0,41 \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{27,40}{1.248120 \cdot 0,176}} = 0,01027 \\ \varepsilon_{fd} &= 0,9 \cdot \varepsilon_{fu} = 0,9 \cdot 0,01216 = 0,0109 \\ \therefore \varepsilon_{fd} &= 0,01027\end{aligned}\tag{11}$$

Logo, arbitra-se uma posição inicial para a posição da linha neutra (c) para se encontrar a deformação efetiva (ε_{fe}) e a tensão de ruptura do CFRP (f_{fe}), cujos valores são obtidos por intermédio das Equações 12 e 13.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{fe} &= \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} = 0,003 \cdot \left(\frac{20 - 5,59}{5,59} \right) - 0,000069 = 0,0076 \\ \varepsilon_{fe} &\leq \varepsilon_{fd} \\ \therefore \varepsilon_{fe} &= 0,0076\end{aligned}\tag{12}$$

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} = 248120 \cdot 0,0076 = 1899,79 \text{ MPa}\tag{13}$$

Assim, a deformação (ε_s) e a tensão (f_s) na armadura longitudinal, assim como a deformação no concreto (ε_c), foram determinados na sequência com o uso das Equações 14 a 16.

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right) = (0,0076 + 0,000069) \cdot \left(\frac{17,5 - 5,59}{20 - 5,59} \right) = 0,0063 \quad (14)$$

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s = 196890 \cdot 0,0063 = 1257,14 \leq f_y = 547,38 \quad (15)$$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{c}{d_f - c} \right) = (0,0076 + 0,000069) \cdot \left(\frac{5,59}{20 - 5,59} \right) = 0,003 \quad (16)$$

Uma vez que os níveis de tensão e deformação no CFRP e na armadura longitudinal foram determinados, o equilíbrio interno da seção foi encontrado com o uso das Equações 17 a 20.

$$\varepsilon_c' = \frac{1,71 \cdot f_c'}{E_c} = \frac{1,71 \cdot 27,4}{31200} = 0,00150 \quad (17)$$

$$\beta_1 = \frac{4 \cdot \varepsilon_c' - \varepsilon_c}{6 \cdot \varepsilon_c' - 2 \cdot \varepsilon_c} = \frac{4 \cdot 0,00150 - 0,003}{6 \cdot 0,00150 - 2 \cdot 0,003} = 1,00 \quad (18)$$

$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot \varepsilon_c' \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 \cdot \beta_1 \cdot \varepsilon_c^2} = \frac{3 \cdot 0,00150 \cdot 0,003 - 0,003^2}{3 \cdot 0,97 \cdot 0,00150^2} = 0,67 \quad (19)$$

$$c = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\alpha_1 \cdot f_c' \cdot \beta_1 \cdot b} = \frac{157 \cdot 547,38 + 19,3 \cdot 1899,79}{0,67 \cdot 27,4 \cdot 1,00 \cdot 120} = 54,94 \text{ mm} \quad (20)$$

Por fim, após a posição da linha neutra (c) atender simultaneamente as Equações 13 a 16 e 20, o momento resistente (M) do elemento reforçado pode ser encontrado com o uso da Equação 21.

$$M_s = F_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) = 85982,45 \cdot \left(175 - \frac{1,00 \cdot 55,9}{2} \right) = 12644723,0 N \cdot mm = 12,64 kN \cdot m$$

$$M_f = \Psi_f \cdot F_f \cdot \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) = 0,85 \cdot 36779,93 \cdot \left(200 - \frac{1,00 \cdot 55,9}{2} \right) = 5379153,7 N \cdot mm = 5,37 kN \cdot m \quad (21)$$

$$M = M_s + M_f = 12,64 + 5,37 = 18,01 kN \cdot m$$

APÊNDICE D.3 – MODELO DE DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS REFORÇADAS EXPOSTAS ÀS INTEMPÉRIES

Apresentam-se a seguir o modelo de dimensionamento utilizado no cálculo do momento resistente das vigas reforçadas expostas às intempéries. Para este dimensionamento também não foram aplicados os coeficiente de minoração das propriedades dos materiais experimentalmente encontradas apenas o coeficiente de redução ambiente (C_E), sendo assim, foram utilizados os seguintes valores:

$$f_c = 25,2 MPa$$

$$E_c = 28,5 GPa$$

$$f_y = 547,38 MPa$$

$$E_y = 196,89 GPa$$

$$f_{fu} = 2680,18 MPa$$

$$\varepsilon_{fu} = 1,088\%$$

$$E_f = 248,12 GPa$$

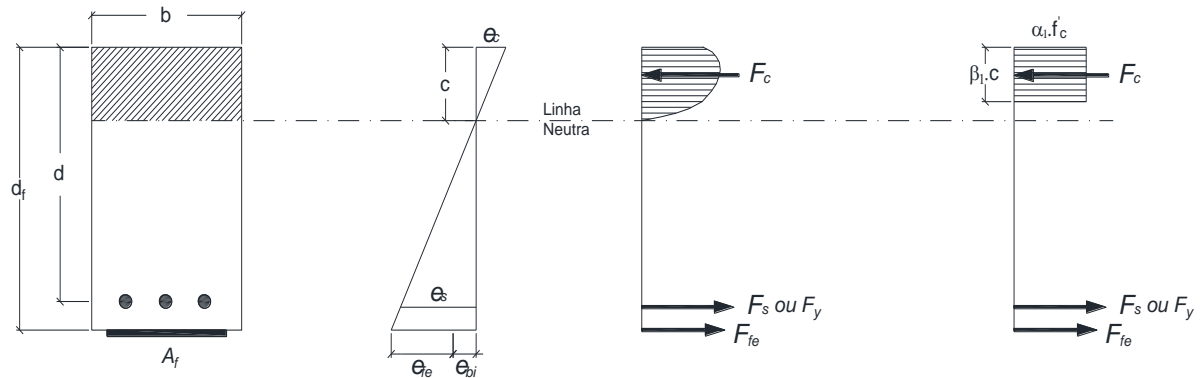
$$C_E = 0,85$$

Os resultados dos dimensionamentos abaixo são apresentados na Tabela 20 no item “Sem redução das propriedades”.

D.3.1 RESISTÊNCIA TEÓRICA APÓS A APLICAÇÃO DO REFORÇO (VIGAS REFORÇADAS EXPOSTAS ÀS INTEMPÉRIES)

Para o cálculo da resistência teórica das vigas reforçadas expostas às intempéries também foram consideradas as recomendações da ACI 440.2R (2017). A esquematização do equilíbrio de forças de uma viga de concreto armado reforçada com mantas de CFRP segundo a técnica EBR pode ser verificada na Figura D.3.1.

Figura D.3.1: Equilíbrio de forças da seção reforçada



Fonte: ACI 440.2R (2017)

No cálculo do máximo momento resistente da viga reforçada foram utilizadas as formulações apresentadas nas Equações 11 a 22. Por meio da Equação 11 foi calculado a deformação máxima permitida para o CFRP (ε_{fd}).

$$\begin{aligned}\varepsilon_{fd} &= 0,41 \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{25,2}{1.248120,0 \cdot 176}} = 0,00985 \\ \varepsilon_{fd} &= 0,9 \cdot \varepsilon_{fu} = 0,9 \cdot 0,01088 = 0,00979 \\ \therefore \varepsilon_{fd} &= 0,00979\end{aligned}\tag{11}$$

Logo, arbitra-se uma posição inicial para a posição da linha neutra (c) para se encontrar a deformação efetiva (ε_{fe}) e a tensão de ruptura do CFRP (f_{fe}), cujos valores são obtidos por intermédio das Equações 12 e 13.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{fe} &= \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{d_f - c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} = 0,003 \cdot \left(\frac{20 - 5,90}{5,90}\right) - 0,000069 = 0,00709 \\ \varepsilon_{fe} &\leq \varepsilon_{fd} \\ \therefore \varepsilon_{fe} &= 0,00709\end{aligned}\tag{12}$$

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} = 248120,0 \cdot 0,00709 = 1758,53 \text{ MPa}\tag{13}$$

Assim, a deformação (ε_s) e a tensão (f_s) na armadura longitudinal, assim como a deformação no concreto (ε_c), foram determinados na sequência com o uso das Equações 14 a 16.

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d-c}{d_f-c} \right) = (0,00709 + 0,000069) \cdot \left(\frac{17,5-5,90}{20-5,90} \right) = 0,0058 \quad (14)$$

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s = 196890 \cdot 0,0058 = 1159,06 \leq f_y = 547,38 \quad (15)$$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{c}{d_f-c} \right) = (0,00709 + 0,000069) \cdot \left(\frac{5,90}{20-5,90} \right) = 0,003 \quad (16)$$

Uma vez que os níveis de tensão e deformação no CFRP e na armadura longitudinal foram determinados, o equilíbrio interno da seção foi encontrado com o uso das Equações 17 a 20.

$$\varepsilon'_c = \frac{1,71 \cdot f'_c}{E_c} = \frac{1,71 \cdot 25,2}{31200} = 0,00151 \quad (17)$$

$$\beta_1 = \frac{4 \cdot \varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6 \cdot \varepsilon'_c - 2 \cdot \varepsilon_c} = \frac{4 \cdot 0,00151 - 0,003}{6 \cdot 0,00151 - 2 \cdot 0,003} = 0,99 \quad (18)$$

$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot \varepsilon'_c \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 \cdot \beta_1 \cdot \varepsilon_c'^2} = \frac{3 \cdot 0,00151 \cdot 0,003 - 0,003^2}{3 \cdot 0,99 \cdot 0,00151^2} = 0,68 \quad (19)$$

$$c = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot b} = \frac{157 \cdot 547,38 + 19 \cdot 3.1758,53}{0,67 \cdot 25,2 \cdot 0,99 \cdot 120} = 59,08 \text{mm} \quad (20)$$

Por fim, após a posição da linha neutra (c) atender simultaneamente as Equações 13 a 16 e 20, o momento resistente (M) do elemento reforçado pode ser encontrado com o uso da Equação 21.

$$M_s = F_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) = 85982,45 \cdot \left(175 - \frac{0,99 \cdot 59,0}{2} \right) = 12526992,7 \text{ N.mm} = 12,52 \text{ kN.m}$$

$$M_f = \Psi_f \cdot F_f \cdot \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) = 0,85 \cdot 34045,14 \cdot \left(200 - \frac{0,99 \cdot 59,0}{2} \right) = 4939567,7 \text{ N.mm} = 4,93 \text{ kN.m} \quad (21)$$

$$M = M_s + M_f = 12,52 + 4,93 = 17,45 \text{ kN.m}$$

APÊNDICE E – DEFORMAÇÃO NOS SG 3 E 5 DO COMPÓSITO DE CFRP

As Figuras E.1 a E.3 apresentam as deformações verificadas nos extensômetros elétricos, SG3 e SG5, aplicados no compósito de CFRP das vigas de reforçadas de referência e expostas em ambiente laboratorial e intempéries, respectivamente.

Nota-se que os gráficos de força *versus* deformação do compósito de CFRP para a viga V1_LAB_CFRP não foram apresentados devido a falha mecânica no extensômetro elétrico.

Figura E.1: Força *versus* deformação ao longo do compósito de CFRP das vigas de referência reforçadas

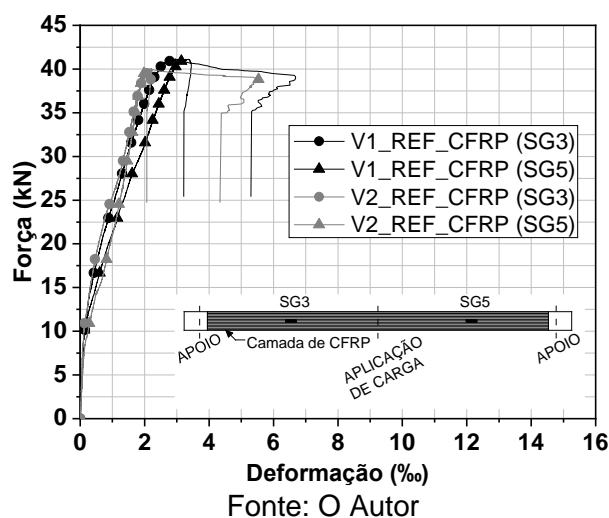


Figura E.2: Força *versus* deformação ao longo do compósito de CFRP das vigas reforçadas expostas em ambiente laboratorial

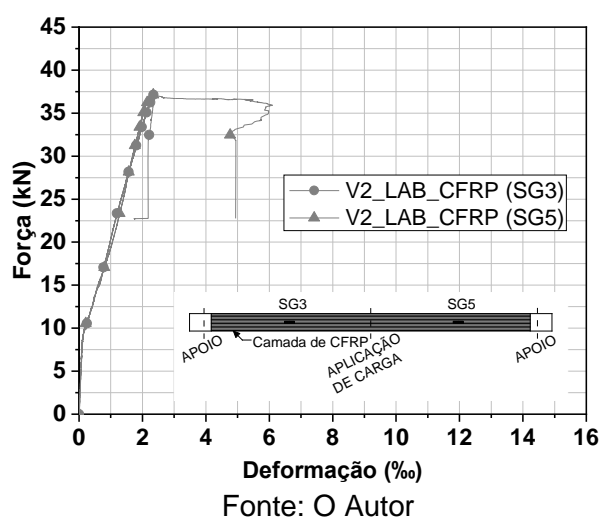
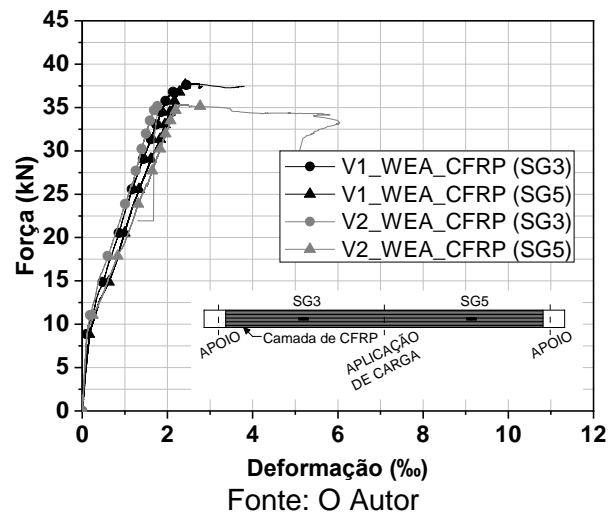


Figura E.3: Força versus deformação ao longo do compósito de CFRP das vigas reforçadas expostas a intempéries



ANEXO

ANEXO A – CATÁLOGO DO FABRICANTE DA FIBRA DE CARBONO

**S&P C-Sheet 240**

Mantas de fibra de carbono para dry e wet lay up

11/04

Dados técnicos (unidireccional)	200 g/m²	300 g/m²	400 g/m²
Módulo elástico [kN/mm ²]	240	240	240
Resistência à tracção [N/mm ²]	3800	3800	3800
Gramagem da fibra [g/m²] (direcção principal)	200	300	400
Gramagem por unidade de área de manta [g/m ²]	230	330	430
Densidade [g/cm ³]	1.7	1.7	1.7
Extensão de rotura [%]	1.55	1.55	1.55
Espessura para o cálculo (Gramagem da fibra/densidade) [mm]	0.117	0.176	0.234
Secção transversal teórica de calculo por 1000 mm largura [mm ²]	117	176	234
Factor de redução para calculo (Laminação manual/ UD)	1.2 (recomendado por S&P)	1.2 (recomendado por S&P)	1.2 (recomendado por S&P)
Força de tracção ultima 1000 mm de largura [kN]	$\frac{117 \times 3800}{1.2} = \underline{370.5}$	$\frac{176 \times 3800}{1.2} = \underline{557.3}$	$\frac{234 \times 3800}{1.2} = \underline{744.0}$
Força de tracção para 1000 mm largura a 0.6% ε para o cálculo [kN]	140	211	282
Embalagens: (Mantas especiais sob pedido)	largura: 300 ou 600 mm comprimento : 150 m	largura: 300 ou 600 mm comprimento: 150 m	largura: 300 ou 600 mm comprimento: 100 m
Aplicação :	<ul style="list-style-type: none"> • Reforço à flexão • Reforço de carga axial em pilares • Reposição de cintas em pilares 		

Nota: Outras gramagens de fibra S&P C-Sheet 240 podem ser fabricadas sob pedido.



Germany:
S&P Reinforcement GmbH
Beyerbachstrasse 5, D-65830 Kriftel
Tel.: +49 6192 96128-30
Fax: +49 6192 96128-29
info@sp-reinforcement.de
www.sp-reinforcement.de

Switzerland:
S&P Clever Reinforcement Company AG
Dammstrasse 2, CH-6440 Brunnen
Tel.: +41 41 825 00 70
Fax: +41 41 825 00 75
info@sp-reinforcement.ch
www.reinforcement.ch

Portugal e España:
Clever Reinforcement Iberica Lda
Quinta Santa Sofia, 2845-263 Seixal
Tel.: +351 21 225 33 71
Fax: +351 21 225 24 36
info@sp-reinforcement.pt
www.frp.ch