CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO UV NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNTAS ADESIVAS GFRP/AÇO

Hiasmim Rohem Gualberto

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, PPEMM, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientador: DSc. Felipe do Carmo Amorim (CEFET/RJ)
Coorientador: DSc. Hector Reynaldo Meneses Costa (CEFET/RJ)

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2024

INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO UV NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNTAS ADESIVAS GFRP/AÇO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, PPEMM, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Hiasmim Rohem Gualberto

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br FELIPE DO CARMO AMORIM
Data: 22/02/2024 22:23:55-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Presidente, Professor D.Sc. Felipe do Carmo Amorim (CEFET/RJ) (Orientador)

Documento assinado digitalmente
gov.br HECTOR REYNALDO MENESES COSTA
Data: 22/02/2024 20:35:31-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professor D.Sc. Hector Reynaldo Meneses Costa (CEFET/RJ) (Coorientador)

Documento assinado digitalmente
gov.br RICARDO ALEXANDRE AMAR DE AGUIAR
Data: 22/02/2024 18:55:18-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professor D.Sc. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar (CEFET/RJ)

Documento assinado digitalmente
gov.br PEDRO MANUEL CALAS LOPES PACHECO
Data: 22/02/2024 20:20:33-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professor D.Sc. Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco (CEFET/RJ)

Documento assinado digitalmente
gov.br JOAO MARCIANO LAREDO DOS REIS
Data: 22/02/2024 22:16:45-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professor Ph.D. João Marciano Laredo dos Reis (UFF)

Documento assinado digitalmente
gov.br MONICA CALIXTO DE ANDRADE
Data: 22/02/2024 20:04:08-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professor D.Sc. Mônica Calixto de Andrade (UERJ)

Rio de Janeiro
Fevereiro, 2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

G899 Gualberto, Hiasmim Rohem
Influência da radiação UV no comportamento mecânico de juntas adesivas GFRP/aço / Hiasmim Rohem Gualberto. — 2024.
135f. : il. color. , enc.

Tese (Doutorado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2024.
Bibliografia : f. 136-145
Orientador: Felipe do Carmo Amorim
Coorientador: Jorge Carlos Ferreira Jorge

1. Juntas adesivas. 2. Radiação ultravioleta. 3. Polímeros. 4. Fibras de vidro. 5. Resistência de materiais. I. Amorim, Felipe do Carmo. (Orient.). II. Costa, Hector Reynaldo Meneses (Coorient.). III. Título.

CDD 668.3

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese: ao meu esposo Domenio, por compartilhar os momentos bons e ruins dessa trajetória. Aos meu pais, Dalmo e Deize, por sempre terem dado apoio e suporte para os estudos. E as minhas irmãs, Jessica e Andreza, por sempre estarem presentes e serem grandes incentivadoras.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por permitir que os meus sonhos pudessem se realizar, pois entendo que tudo existe e acontece se faz pela sua permissão e graça nas nossas vidas.

Agradeço ao meu esposo Domenio de Souza Faria, por ser compreensivo e paciente e por estar sempre presente apoiando e motivando a continuar.

Aos meus pais, Dalmo Martins Gualberto e Deize Rocha Rohem Gualberto e às minhas irmãs Jessica Rohem Gualberto Creton e Andreza Rohem Gualberto, e toda a minha família que sempre me apoiaram e incentivaram os estudos.

Agradeço também aos meus orientadores Prof. Dr. Felipe do Carmo Amorim e ao Prof. Dr. Hector Reynaldo Meneses Costa, por todo suporte e direcionamento que foram de suma importância para o desenvolvimento desse projeto.

Também ao Prof. Dr. João Marciano Laredo dos Reis por disponibilizar a infraestrutura do laboratório LED, que foi fundamental para o desenvolvimento experimental deste trabalho. E à Prof.ª Dr.ª Mônica Calixto de Andrade por, mesmo distante, auxiliar no desenvolvimento de algumas análises e principalmente por disponibilidade e prontidão em ajudar.

Aos demais professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, que estiveram presentes nessa trajetória e contribuíram com este trabalho de alguma forma, muito obrigada.

EPIGRÁFE

Deus faz forte ao cansado e multiplica as
forças daquele que já não tem nenhum vigor.
Os jovens se cansam e se fatigam,
e os moços de exaustos caem,
Mas os que confiam no Senhor renovam
as suas forças, sobem com asas
como águias; correm e não se cansam;
caminham e não se fatigam.

Isaías 40:29-31

RESUMO

Influência da radiação UV no comportamento mecânico de juntas adesivas GFRP/aço

Considerando o amplo campo de aplicações de juntas adesivas, tem-se que elas podem estar sujeitas a ambientes com diferentes condições de temperatura, umidade e exposição à radiação UV (ultravioleta). Uma vez que o comportamento mecânico de uma junta é fortemente influenciado por essas condições, compreender o seu comportamento em função da degradação é importante para reduzir peso e custo. Apesar dos esforços já envidados por diversos pesquisadores, os efeitos da radiação UV a longo prazo ainda precisam ser melhor investigados e sua ação combinada com outros fatores ambientais melhor compreendida. Nesta perspectiva, três estudos experimentais são propostos considerando juntas simples aço/GRFP (compósito reforçado com fibra de vidro) coladas com adesivo epóxi, materiais de grande importância em reparos estruturais. Em um primeiro estudo, avaliou-se a influência isolada da radiação UV ao longo do tempo por meio de uma câmara de exposição UV artificial. Em uma segunda proposta, são investigadas as alterações provocadas pela ação da imersão em água, destilada e salgada, em três temperaturas (4, ambiente e 40 °C), com e sem a ação da radiação UV artificial antes da imersão. Na terceira proposta experimental, é realizada a exposição das juntas em ambiente externo ao longo de um ano. As juntas foram caracterizadas mecanicamente por teste de cisalhamento e outras análises como DMA, FTIR e TGA foram adotadas para a caracterização isolada dos materiais componentes das juntas. Em comparação com as juntas em estado não degradado, as juntas apresentaram resistência médias ao cisalhamento com reduções máximas de 32,5% quando expostas 90 dias ao UV e de 59,6% quando expostas ao ambiente externo por 180 dias. Sem precedência de degradação UV, o efeito da imersão em água foi mais significativo nas temperaturas maiores, quando apresentadas as menores resistências ao cisalhamento. Todavia, quando precedida da exposição ao UV, a imersão passou a ser menos significativa na redução da resistência ao cisalhamento. De uma forma geral, notou-se alterações nos modos de falha, passando de uma falha no aderente compósito para uma falha adesiva na interface com o metal após a ação das degradações. Além das alterações mecânicas, foto-oxidação dos polímeros (mudança de cor do compósito), de Tg do adesivo e presença de micro trincas na superfície dos compósitos foram identificadas com as degradações. A partir dos resultados obtidos, evidencia-se a importância de realizar longos períodos de degradação para melhor descrever o comportamento das juntas. Além disso, a exposição ao ambiente externo, mesmo com menor incidência de radiação UV em comparação ao artificialmente produzido na câmara, foi mais agressiva, em especial por conta da maresia e umidade. Assim, este trabalho contribuiu com um estudo sobre as propriedades mecânicas de materiais de engenharia no contexto de reparo estrutural, submetidos a diferentes formas de degradação, sendo abordados pontos pouco relatados ou não bem compreendidos na literatura.

Palavras-chave: Junta adesiva simples, Junta dissimilar, GFRP, Exposição UV, Degradação

ABSTRACT

Influence of UV radiation on the mechanical behavior of GFRP/steel adhesive joints

Considering the wide range of applications of adhesive joints, they can be subject to environments with different conditions of temperature, humidity and exposure to UV (ultraviolet) radiation. Since the mechanical behavior of a joint is strongly influenced by these conditions, understanding its behavior as a function of degradation is important to reduce weight and cost. Despite the efforts already made by several researchers, the long-term effects of UV radiation still need to be better investigated and its action combined with other environmental factors better understood. From this perspective, three experimental studies are proposed considering simple steel/GFRP (glass fiber reinforced polymer) bonded joints with epoxy adhesive, materials of great importance in structural repairs. In a first study, the isolated influence of UV radiation over time was evaluated using an artificial UV exposure chamber. In a second proposal, the changes caused by the action of immersion in distilled and salt water at three temperatures (4, ambient and 40 °C) are investigated, with and without the action of artificial UV radiation before immersion. In the third experimental proposal, the joints are exposed in an external environment over the course of a year. The joints were mechanically characterized by shear testing and other analyzes such as DMA, FTIR and TGA were adopted for the isolated characterization of the joint materials. Compared to joints in an undegraded state, the joints showed average shear strength with maximum reductions of 32.5% when exposed to UV for 90 days and 59.6% when exposed to the external environment for 180 days. Without precedence of UV degradation, the effect of immersion in water was more significant at higher temperatures, when presented with the lowest shear strength. However, when preceded by UV exposure, immersion became less significant in reducing shear strength. In general, changes in failure modes were noted, going from a failure in the composite adherent to an adhesive failure at the interface with the metal after the action of degradation. In addition to mechanical changes, photo-oxidation of the polymers (change in color of the composite), Tg of the adhesive and the presence of micro cracks on the surface of the composites were identified with degradation. From the results obtained, it is evident the importance of carrying out long periods of degradation to better describe the behavior of the joints. Furthermore, exposure to the external environment, even with a lower incidence of UV radiation compared to that artificially produced in the chamber, was more aggressive, especially due to the salt air and humidity. Thus, this work contributed to a study on the mechanical properties of engineering materials in the context of structural repair, subjected to different forms of degradation, addressing points that are little reported or not well understood in the literature.

Keywords: Single lap joint, Dissimilar joint, GFRP, UV exposure, degradation.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CFRP – Compósito reforçado com fibra de carbono

CP – Corpo de Prova

CPs – Corpos de Provas

CRESESB - Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sergio de S. Brito

CTE - *Coefficient of Thermal Expansion* Coeficiente de dilatação térmica

DMA - Análise Dinâmico Mecânica

DTG - Derivada da perda de massa

DSJ - *Double Strap Joint* (Juntas de sobreposição dupla)

ECTM - Encontro de Ciência e Tecnologia dos Materiais

FRP – *Fiber Reinforced Polymers* (Polímero reforçado com fibra)

FTIR - Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier

FURG - Universidade Federal do Rio Grande

GFRP – Compósito reforçado com fibra de vidro

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

IR – *Infra-red* (Infravermelho)

LED - Laboratório para ensaios em dutos

SLJ - *Single Lap Joint* (Junta de sobreposição simples)

Tg – Temperatura de transição vítrea

TGA – Análise Termogravimétrica

UFF – Universidade Federal Fluminense

UV – Ultravioleta

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tipos de juntas adesivas coladas. 28
Figura 2 - Diferentes configurações de uma camada de um compósito laminado. 29
Figura 3 - Relação entre adesivos e suas propriedades. 31
Figura 4: Principais modos de falha juntas coladas metal/FRP. 38
Figura 5 - Prensa Hidráulica utilizada na produção das placas de compósito. 41
Figura 6 - Fluxograma das etapas de produção do compósito GFRP. 42
Figura 7 - Produção do material compósito, em (a) os batentes envolvendo o tecido de fibra de vidro e em (b) o compósito gerado envolto pelo batente (dimensões em cm). 43
Figura 8 - Esquema da junta simples colada produzida. 44
Figura 9 - Processo de jateamento dos aderentes metálicos. 44
Figura 10 - Montagem das juntas no molde. 45
Figura 11 - Esquema do batente para controle de espessura do adesivo. 46
Figura 12 - Processo de separação das juntas prontas: serragem (a) e limagem (b). . 46
Figura 13 - Caixa da câmara de degradação UV e suas dimensões externas. 47
Figura 14 - Esquema do posicionamento das lâmpadas e das juntas na câmara de degradação UV. 49
Figura 15 - Câmara de degradação UV, com as lâmpadas em (a) deligadas e em (b) acessas. 50
Figura 16 - Suporte de posicionamento das juntas no interior da câmara: (a) disposição das juntas no suporte e (b) suporte com juntas dentro da câmara. 51
Figura 17 – Juntas imersas em água nos ambientes de (a) 40°C e (b) temperatura ambiente. 53
Figura 18 - Juntas expostas no ambiente externo. 56
Figura 19 - Corpo de prova do teste de DMA. 60
Figura 20 - Ensaio de tração do compósito. 61
Figura 21 - Configuração do CP do ensaio de flexão do compósito. 62
Figura 22 - Configuração da máquina de ensaio de teste de cisalhamento em (a) e das juntas coladas para o ensaio em (b). 64
Figura 23 - Curvas tensão e deformação de tração dos compósitos não degradados e degradados por 30, 60, 90, 120 e 180 dias de exposição ao UV. 68
Figura 24 - Micrografias da superfície externa dos compósitos (a) sem degradar, (b) com 60, (c) 120 e (d) 180 dias de exposição ao UV ampliadas em 200 vezes. 70

Figura 25 – Curvas tensão e deformação de flexão dos compósitos não degradados e degradados por 30, 60, 90, 120 e 180 dias de exposição. 72
Figura 26 – Compósito sem degradar e exposto a radiação UV por 30, 60, 90, 120 e 180 dias. 73
Figura 27 – Espectro de FTIR não degradado (0 dias) e do compósito exposto à radiação UV por 30, 60, 90, 120 e 180 dias. 75
Figura 28 - (a) Derivada da perda de massa (DTG) (b) Termograma de perda de massa como uma função da temperatura do compósito sem degradar e expostos a radiação UV por 30, 60, 90, 120 e 180 dias. 77
Figura 29 – Média da tensão de cisalhamento das juntas expostas à radiação UV. ... 79
Figura 30 – Curvas de carregamento e deslocamento do teste de cisalhamento das juntas sem degradar e degradadas por 30, 60, 90, 120 e 180 dias de exposição ao UV. 81
Figura 31 – Modos de falha das juntas sem degradar e degradadas por 30, 60, 90, 120 e 180 dias de exposição à radiação UV. 83
Figura 32 - Juntas não degradadas e expostas a radiação UV por 30, 60, 90, 120 e 180 dias. 84
Figura 33 - Módulo de armazenamento do adesivo epóxi antes e depois de exposto a radiação UV por 30, 60, 90, 120 e 180 dias, obtido por DMA. 86
Figura 34 – Variação da Tg com o tempo de exposição à radiação UV. 86
Figura 35 – Espectro de FTIR do adesivo não degradado e exposto à radiação UV por 30, 60, 90, 120 e 180 dias. 87
Figura 36 - (a) Derivada da perda de massa (DTG) (b) Termograma de perda de massa como uma função da temperatura do adesivo epóxi sem degradar e expostos a radiação UV por 30, 60, 90, 120 e 180 dias. 89
Figura 37 – Condições climáticas registradas na estação meteorológica do INMET da cidade de Niterói: (a) Temperatura, (b) Umidade e (c) Irradiância e Precipitação. 91
Figura 38 - Espectro de FTIR do compósito não degradado e exposto ao ambiente externo por 30, 60, 90, 120, 180, 270 e 365 dias. 94
Figura 39 – Comparativo das tensões de cisalhamento das juntas degradadas com UV e no ambiente externo 96
Figura 40 - Curvas tensão e deformação das juntas de cada tempo de exposição externa. 97
Figura 41 - Comportamento da tensão de cisalhamento das juntas ao longo do tempo de exposição. 98

Figura 42 - Micrografias do adesivo na região de falha das amostras de 30 (a), 180 dias (b) e 270 dias (c) de exposição. 100
Figura 43 - Aderentes metálico e compósito das juntas ensaiadas em cisalhamento nas condições sem degradar e expostas ao ambiente externo por 30, 60, 90, 120, 180, 270 e 365 dias. 102
Figura 44 - Juntas não degradadas e degradadas por 30, 60, 90, 120, 180, 270 e 365 dias de exposição UV. 104
Figura 45 - Variação da Tg com o tempo de exposição ao ambiente externo. 105
Figura 46 - Variação de massa dos adesivos imersos em: (a) 40 °C, (b) temperatura ambiente e (c) 4 °C. 108
Figura 47 - Variação de massa dos compósitos de flexão imersos em: (a) 40 °C, (b) temperatura ambiente e (c) 4 °C. 110
Figura 48 - Variação de massa dos compósitos de tração imersos em: (a) 40 °C, (b) temperatura ambiente e (c) 4 °C. 111
Figura 49 - Variação de massa das juntas imersas em: (a) 40 °C, (b) temperatura ambiente e (c) 4 °C. 113
Figura 50 - Média da máxima tensão de tração dos compósitos imersos em água salgada e destilada, e combinados com exposição ao UV. 116
Figura 51 - Curvas tensão e deformação em tração dos compósitos imersos em: (a) 40 °C, (b) temperatura ambiente e (c) 4 °C. 117
Figura 52 - Média da tensão de flexão dos compósitos imersos em água salgada ou destilada, e expostos ao UV. 120
Figura 53 – Média da tensão de cisalhamento das juntas imersas em água salgada e destilada, combinada com exposição UV. 125
Figura 54 - Aderentes metálico e compósito das juntas ensaiadas em cisalhamento imersas em água destilada e salgada em 40 °C por 90 dias. 129
Figura 55 - Aderentes metálico e compósito das juntas ensaiadas em cisalhamento imersas em água destilada e salgada em temperatura ambiente por 90 dias. 130
Figura 56 - Aderentes metálico e compósito das juntas ensaiadas em cisalhamento imersas em água destilada e salgada em 4 °C por 90 dias. 131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades o aço SAE 1020. 39
Tabela 2 - Propriedades da Resina Epóxi MC 109. 40
Tabela 3 - Propriedades do Adesivo Epóxi Rengel SW 404. 40
Tabela 4 - Dados técnicos da lâmpada usada. 48
Tabela 5 - Tipo de degradação, tempos de exposição e número de amostras. 57
Tabela 6 - Propriedades mecânicas de tração. 66
Tabela 7: Comparação entre o resultado do teste de tração do presente estudo e pesquisas semelhantes. 67
Tabela 8 – Propriedades mecânicas de flexão do compósito. 71
Tabela 9: Propriedades mecânicas da junta e teste Tukeyt* 78
Tabela 10: Propriedades mecânicas da junta metal/GFRP não degradada e depois de 30, 60, 90, 120, 180, 270 e 365 de exposição ao ambiente externo. 95
Tabela 11- Propriedades mecânicas do compósito em tração degradado em todas as condições de imersão. 114
Tabela 12 – Limite de resistência à flexão do compósito degradado com imersão. .. 119
Tabela 13 – Módulo de elasticidade em flexão do compósito degradado com imersão. 123
Tabela 14 - Propriedades mecânicas de cisalhamento das juntas degradadas com imersão em todas as condições. 124
Tabela 15- Irradiância solar para diferentes faixas do espectro de radiação solar 146

SUMÁRIO

Introdução 16

1.1. Motivação 16

1.2. Objetivos 19

1.2.1. Objetivos específicos 19

2. Estado da arte 21

3. Revisão Bibliográfica 27

3.2. Polímeros reforçados com fibra 29

3.3. Adesivos 30

3.3.1. Adesivo Epóxi 31

3.4. Degradação ambiental 32

3.4.1. Temperatura 32

3.4.2. Umidade 34

3.4.3. Radiação ultravioleta 36

3.5. Modos de falha da junta 37

4. Materiais e Métodos 39

4.1. Materiais 39

4.2. Produção do compósito reforçado com fibra de vidro (GFRP) 41

4.3. Produção das Juntas simples dissimilares aço/GFRP 43

4.4. Projeto câmara de degradação ultravioleta 46

4.5. Degradações 51

4.5.2. Degradação hidrotérmica: Imersão em água salgada e destilada 52

4.5.3. Ação combinada das degradações provocadas pela radiação UV e pela imersão em água 54

4.5.4. Exposição externa 55

4.6. Degradação do aderente compósito 57

4.7. Caracterizações 58

4.7.1. Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) 59
4.7.2. Análise termogravimétrica (TGA) 59
4.7.3. Análise Dinâmico Mecânica (DMA) do adesivo 59
4.7.4. Ensaio de tração do compósito 60
4.7.5. Ensaio de flexão do compósito 62
4.7.6. Ensaio de cisalhamento das juntas 63
4.7.7. Microscopia Ótica 64
5. Resultados e discussões 65
5.1. Degradação UV artificial 65
5.1.1. Compósito degradado com UV 65
5.1.1.1. Teste de tração e flexão do compósito 65
5.1.1.2. Análise visual da degradação 72
5.1.1.3. Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier 74
5.1.1.4. Análise termogravimétrica 76
5.1.2. Juntas degradadas com UV 77
5.1.2.1. Teste de cisalhamento das juntas degradada com UV 78
5.1.2.2. Análise do modo de falha das juntas degradadas com UV 82
5.1.2.3. Análise da mudança de cor das juntas degradadas com UV 84
5.1.3. Adesivo degradado com UV 85
5.1.3.1. Análise dinâmico mecânica do adesivo 85
5.1.3.2. Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier 86
5.1.3.3. Análise termogravimétrica 88
5.2. Degradação Externa 90
5.2.1. FTIR do aderente compósito exposto ao ambiente externo 93
5.2.2. Teste de cisalhamento das juntas 94
5.2.3. Análise do modo de falha das juntas expostas ao ambiente externo 101
5.2.4. Análise dinâmico mecânica do adesivo exposto ao ambiente externo 105
5.3. Degradação Combinada 106

5.3.1. Variação da massa 106
5.3.1.1. Variação de massa do adesivo 107
5.3.1.2. Variação de massa dos compósitos de tração e de flexão 109
5.3.1.3. Variação de massa da junta 112
5.3.2. Propriedades mecânicas de tração do compósito imerso 114
5.3.3. Propriedades mecânicas de flexão do compósito imerso 118
5.3.4. Teste de cisalhamento das juntas degradadas por imersão 123
5.3.5. Análise do modo de falha das juntas degradadas por imersão 128
Conclusão 132
Atividades futuras 135
Referências 136
APÊNDICE A 146

Introdução

1.1. Motivação

Estruturas metálicas estão presentes em projetos de Engenharia de diversos setores da Indústria tais como: civil, automotivo, naval e aeroespacial. Com o tempo, essas estruturas se deterioram e necessitam de reparos para se manter seguras. Dutos, plataformas de petróleo, cascos de navios e pontes são exemplos de estruturas metálicas que frequentemente necessitam de reparos (ZHENG *et al.*, 2019 BATUWITAGE *et al.*, 2017; BUDHE; BANEA; DE BARROS, 2018). Dentre as possibilidades de reparos de estruturas deterioradas, como também para desenvolvimento de projetos mais leves, em especial quando o peso da estrutura é um fator determinante, tem-se os polímeros reforçados com fibras *(Fiber Reinforced Polymers* - FRP) (BAI *et al.*, 2014; SILVA; BISCAIA; RIBEIRO, 2019). Estes apresentam baixo peso específico e boas propriedades mecânicas, inclusive podendo apresentar rigidez e resistência à fadiga melhores que as dos metais mais convencionalmente utilizados em reparos de estruturas. Além dessas propriedades, se destacam por possuírem excelente resistência à corrosão e serem de boa aplicabilidade em campo. Entre as alternativas mais usadas estão os polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP) e os reforçados com fibra de vidro (GFRP), sendo os primeiros adotados quando são requeridos maiores módulos de elasticidade e o segundo quando não é exigida elevada rigidez e busca-se menor custo ao projeto (LIU *et al.*, 2020).

Quando se trata da união de materiais diferentes tem-se juntas dissimilares e métodos por soldagem podem não ser aplicáveis, como ocorre na utilização de materiais compósitos para reforço de estruturas metálicas. Nesses casos, a união de materiais por meio de adesivos, conhecida como juntas adesivas, é uma alternativa. Em comparação às uniões soldadas, aparafusadas ou rebitadas, as uniões adesivas conferem melhor distribuição de tensões e reduzem concentração de tensões, apresentando, no geral, uma junção de melhor resistência à corrosão (ZHENG *et al.*, 2019; KARATAş; GÖKKAYA, 2018; KATNAM *et al.*, 2015; REITZ *et al.*, 2017).

Tendo em vista as várias possibilidades de aplicação das estruturas metálicas, os reforços estruturais por meio de juntas adesivas poderão estar sujeitos a ambientes

de condições diversas. Em serviço, as juntas adesivas podem estar sujeitas a temperaturas elevadas ou baixas, umidade, ambientes salinos ou corrosivos e radiação ultravioleta (UV), por exemplo. Nesses casos, em se tratando de ambientes com condições agressivas ou adversas às juntas adesivas, essas podem responder com um comportamento mecânico diferente daquele que seria esperado em cenários de aplicação de menor hostilidade, inclusive daqueles mais comumente simulados em laboratório.

Uma vez que a resposta mecânica da junta adesiva é influenciada, ao longo do tempo, por fatores ambientais relativos à aplicação em questão, o projeto da junta adesiva deve ser desenvolvido levando em conta as condições impostas em uso, como temperatura, umidade, radiação UV e salinidade (L. DA ROCHA, 2021 NIU, 2023 DA SILVA *et al.*, 2009; MACHADO *et al.*, 2019 SUGIMAN *et al.*, 2016). Nessa perspectiva, os materiais aplicados, o método de processamento e os parâmetros geométricos da junta adesiva devem ser determinados (DA SILVA *et al.*, 2009 MACHADO *et al.*, 2019; SUGIMAN *et al.*, 2016). A compreensão de como os fatores ambientais influenciam o comportamento das juntas no cenário de aplicação avaliado é importante para a redução das incertezas do projeto, permitindo a redução de gasto de material e, consequentemente, de peso e custo. Para tanto, deve ser conhecido como os diversos fatores de degração interagem entre si nos materiais envolvidos e como os fenômenos envolvidos se desenvolvem ao longo do tempo (ALDERUCCI *et al.*, 2019 SOUSA *et al.*, 2019 AMORIM *et al.*, 2018 PANG *et al.*, 2019 LIU *et al.*, 2020 LIU *et al.*, 2016).

O estudo da atuação combinada dos fatores ambientais é relevante nas aplicações de juntas adesivas, pois a exposição aos raios UV, as temperaturas de trabalho e a presença de umidade e salinidade são condições que, se estudadas em laboratório de forma distinta da realidade, pode resultar em um material com propriedades divergentes, afetando a confiabilidade do projeto. Tais fatores de degradação interagem entre si ao degradar os materiais envolvidos, sendo os fenômenos físicos intensificados ou amenizados em função da interação entre os agentes (ALDERUCCI *et al.*, 2019 SOUSA *et al.*, 2019 AMORIM *et al.*, 2018 PANG *et al.*, 2019 LIU *et al.*, 2020 LIU *et al.*, 2016). Por exemplo, a exposição ao UV pode alterar a absorção de umidade nos materiais poliméricos e compósitos, podendo intensificar o efeito da presença de umidade no comportamento mecânico de juntas adesivas (BAZLI *et al.*, 2020; BREBU, 2020). Sobre essas interações entre os agentes de degradação, a contribuição de diversos autores na literatura é evidenciada por trabalhos onde se é

proposto estudar tanto ação individual quanto a ação combinada dos agentes (ALDERUCCI *et al.*, 2019 SOUSA *et al.*, 2019; AMORIM *et al.*, 2018; PANG *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2016). Apesar dos diversos estudos já conduzidos por diferentes pesquisadores, conforme destacado por Budhe *et al.* (2017), tem-se que a compreensão da atuação combinada de fatores ambientais ainda é um campo de pesquisa em aberto. Portanto, estudos mais rigorosos, envolvendo combinações de fatores de degradação, são ainda requeridos para uma melhor compreensão sobre os fenômenos físicos envolvidos, associados à ação de cada agente de degradação.

Na ação dos agentes de degradação, as alterações nas propriedades dos materiais se desenvolvem ao longo do tempo. Nesse aspecto, a exposição à radiação UV pode favorecer a pós-cura da resina matriz e, com isso, gerar melhorias na resistência mecânica. No entanto, após um certo tempo de exposição, a degradação gerada pode reduzir o desempenho da junta (VIANA *et al.*, 2017). Assim, a degradação com exposição ao UV precisa ser estudada considerando períodos longos de exposição, que sejam suficientes para que os efeitos da degradação que reduzem a resistência superem os efeitos da pós-cura gerada pela exposição ao UV. Conforme destacado por Guermazi *et al*. (2016), testes experimentais de degradação a curto prazo podem não ser suficientes para estimar o desempenho a longo prazo ou a vida útil esperada de materiais compósitos. Em laboratório, uma alternativa para prever os efeitos a longo prazo são as simulações artificiais aceleradas da exposição ao fator de degradação. Esses testes acelerados são aqueles em que são intensificados os fatores de degradação ou modificado o tamanho da amostra (como a redução da espessura) a fim de acelerar o envelhecimento do material e reduzir o tempo de estudo (NIU, 2023). Essa metodologia é relatada como útil e eficaz para investigar a durabilidade de compósitos, conforme destacado por Jiang *et al*. (JIANG *et al.*, 2014). Mas no caso de juntas, os efeitos acelerados não são plenamente compreendidos (CRUZ *et al.*, 2021), sendo os efeitos da radiação UV por exposição de longo prazo em juntas adesivas ou materiais compósitos foco de muitos estudados na literatura (DA SILVA *et al.*, 2022, STANKIEWICZ, 2022, BAZLI *et al.*, 2020; NIKAFSHAR *et al.*, 2017; BARBOSA *et al.*, 2017; L. DA ROCHA, 2021; KHALEEL *et al.*, 2019). Entretanto, apesar dos esforços envidados, ainda se trata de um campo de pesquisa também em aberto. Uma vez que as intensidades de exposição ao UV são distintas, bem como as condições de degradação ensaiadas em laboratório, estudos mais rigorosos podem elucidar o comportamento de longo prazo e suas causas diante da exposição ao UV.

1.2. Objetivos

Neste trabalho tem-se o objetivo de estudar o comportamento de juntas adesivas simples aço/GFRP expostas à radiação ultravioleta, sendo avaliados os efeitos provocados nas propriedades mecânicas, físicas e químicas por diferentes tempos de exposição. Em especial, tem-se períodos longos de exposição UV simulados, equivalendo a três anos de exposição solar no Brasil, considerando a cidade de Niterói/RJ. Além dos efeitos do tempo de exposição, busca-se avaliar e compreender os efeitos da interação da radiação UV com a degradação por imersão em água destilada e salgada, em diferentes temperaturas, no comportamento mecânico das juntas. Também objetiva-se estudar juntas expostas à degradação pela exposição ao ambiente externo, onde, além da radiação, há a interação de diversos outros fatores de degradação que podem estar presentes em um ambiente externo, como maresia, umidade e ciclos de temperatura. Paralelamente, serão estudadas as degradações conjuntas provocadas pela radiação e pela água destilada e salgada no compósito reforçado com fibra de vidro.

1.2.1. Objetivos específicos

Nesta tese, tem-se os objetivos listados a seguir.

- Caracterização mecânica por teste de cisalhamento das juntas coladas de aço/GFRP, antes e depois das ações de degradação. São impostas diferentes condições de degradação e realizam-se comparações entre os resultados obtidos para cada uma delas, além de comparações com resultados apresentados por outros autores na literatura.
- Testar por tração e flexão o compósito adotado para a fabricação das juntas adesivas, de forma isolada, antes e depois de expostos às ações de degradação.
- Realização de Análise Dinâmico Mecânica (DMA) do adesivo utilizado para unir os materiais aderentes aço/GFRP, antes e depois de expostos às ações de degradação por UV e pelos fatores ambientais naturais.

- Analisar alterações químicas e físicas geradas pelas degradações nos materiais das juntas por análise termogravimétrica (TGA), Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e microscopia ótica.
- Análise da influência da degradação UV no ganho de massa provocado pela absorção de água destilada e salgada no compósito e nas juntas adesivas.

1.3. Organização do trabalho

Esta tese está organizada conforme segue. No Capítulo 2, aborda-se o estado da arte, em que é realizada uma breve revisão das contribuições por outros autores, destacando, ao final, a contribuição do trabalho na literatura. No Capítulo 3, tem-se a revisão da bibliografia, onde são destacados os conceitos e as definições mais importantes para a compreensão desta tese. Depois, tem-se, no Capítulo 4, a descrição dos materiais e métodos adotados, definindo o processo de produção dos aderentes compósitos e da junta adesiva. No mesmo capítulo, ainda é descrita a metodologia de degradação adotada e os métodos de caracterização dos materiais. No Capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos e realizada a sua discussão, comparando com resultados da literatura. Já os Capítulos 6 e 7, são relativos a conclusão e as atividades futuras, respectivamente.

2. Estado da arte

Na literatura que trata sobre juntas adesivas coladas, os autores apresentam estudos sobre o comportamento mecânico de juntas adesivas, com diferentes configurações geométricas, formas de processamento, tipos de materiais aderentes e adesivos, modos de carregamento mecânico. Além do *design* e do tipo de carregamento, os fatores ambientais também influenciam o comportamento das juntas e por isso têm sido objeto de estudo de muitas pesquisas.

No estudo do efeito de degradação por fatores ambientais, temperatura e umidade são parâmetros frequentemente abordados, visto que estão entre os fatores mais relevantes para o efeito de degradação nas aplicações de juntas adesivas, sobretudo com relação aos materiais poliméricos (AL-SHAWAF; AL-MAHAIDI; ZHAO, 2009; AROUCHE *et al.*, 2018 AVENDAÑO *et al.*, 2016 BREWIS; COMYN; SHALASH, 1982; CHANDRATHILAKA; GAMAGE; FAWZIA, 2019; LIU *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2016; MACHADO *et al.*, 2019; NGUYEN *et al.*, 2011). Apesar da degradação provocada pela atuação combinada da presença de água e temperaturas elevadas ser muito abordada na literatura, porém, como os fenômenos envolvidos e suas causas não são ainda bem compreendidos, este é um campo de pesquisa atual, que carece de estudos rigorosos, como foi relatado por Liu *et al.* (2020). O principal ponto em questão é que a umidade e a temperatura interagem com os materiais da junta (COSTA *et al.*, 2017; AVENDAÑO *et al.*, 2016; NGUYEN *et al.*, 2012) e, por conseguinte, são dependentes dos parâmetros de projeto. Dessa forma, a tendência na literatura é a produção de estudos que buscam correlacionar os efeitos de presença de umidade e diferentes temperaturas com a configuração geométrica, os materiais adesivos e aderentes utilizados e a metodologia de processamento da junta (NGUYEN *et al.*, 2012; KUMAR; SINGH; NAKAMURA, 2002; BAZLI *et al.*, 2020).

Outro agente de degradação ambiental é a radiação UV, que tem influência mais significativa sobre os polímeros, material usado na matriz dos FRP’s e nos adesivos. Nas últimas décadas, em muitos estudos são avaliados os comportamentos de compósitos, adesivos, resinas e juntas adesivas quando expostos à radiação UV (BAZLI *et al.*, 2020; SHOKRIEH; BAYAT, 2007; NIKAFSHAR *et al.*, 2017; PILLAY; VAIDYA; JANOWSKI, 2009; KHALEEL *et al.*, 2019; SHI *et al.*, 2022). Khaleel *et al.* (2019) investigaram os efeitos da exposição aos raios ultravioleta na vida à fadiga de

CFRP/Al SLJs (*Single Lap joints*). Pillay, Vaidya e Janowski (2009) avaliaram o efeito da umidade e da exposição aos raios ultravioleta em laminados compostos de Poliamida 6 reforçados com fibra de carbono (PILLAY; VAIDYA; JANOWSKI, 2009). Nakamura *et al.* (2006) e Mouzakis *et al.* (2008) também avaliaram a degradação ambiental dos raios UV em FRPs. Shi *et al.* (2022) investigaram o efeito da exposição UV em compósitos de fibra de carbono (CFRP) utilizando uma câmara artificial de envelhecimento UV acelerado.

A exposição à radiação UV têm sido estudada associada a outras condições adversas, como elevada temperatura e umidade (BAI *et al.*, 2014; BAZLI *et al.*, 2020; BARBOSA *et al.*, 2017; KUMAR; SINGH; NAKAMURA, 2002). Pois a degradação UV gerada na superfície dos polímeros pode facilitar a permeabilidade da água (BAZLI *et al.*, 2020; BREBU, 2020; KUMAR; SINGH; NAKAMURA, 2002) e intensificar a degradação provocada pela água/umidade, o que pode tornar sua interação com a água mais agressiva. Budhe *et al.* (2017) relataram que a ação de fatores de degradação combinada pode ser considerada um campo de pesquisa em aberto. Nessa perspectiva, na sequência, são apresentados os principais trabalhos que estudaram a combinação desses fatores ambientais no desempenho de juntas adesivas coladas, dando ênfase nas pesquisas relacionadas com GFRP. Por fim, são destacados os pontos em aberto ou que precisam de um estudo mais detalhado para consolidar o conhecimento e a aplicação das juntas em condições adversas.

No trabalho de Stazi *et al.* (2015), duas condições de degradação foram avaliadas, exposição UV e variação de temperatura e umidade em juntas simples (SLJ - *single lap joint*) e *butt joint* (junta de topo) de GFRP usando 6 diferentes tipos de adesivos. Na primeira condição, foram realizados ciclos de 16h em 40 °C e condensação contínua, depois 4h em -40 °C, seguido de 4h em 70 °C. Tal ciclo foi repetido por 2 semanas. A outra condição foi a exposição UV por cerca de 1000 h. Vale destacar que, neste trabalho, não foi avaliada a combinação das duas condições propostas. Notou-se, de maneira geral, um ligeiro aumento na capacidade de carregamento de ambas as juntas nas duas condições. Na primeira condição, tem-se uma exposição em temperatura de 40 °C, temperatura que pode proporcionar um processo de pós-cura. Já na exposição UV, mesmo não impondo uma temperatura elevada, as juntas foram aquecidas pelo processo de radiação, fato que também contribui para um processo de pós-cura e, consequentemente, melhoria das propriedades mecânicas. Amorim *et al.* (2018) também observaram que juntas adesivas simples de aço coladas com adesivo

epóxi expostas à radiação UV por 6 meses, quando submetidas a testes de cisalhamento em 115 °C, se apresentaram mais resistentes em comparação com as juntas que não sofreram exposição UV. A melhoria da carga suportada também foi relacionada ao processo pós-cura, que promove o surgimento de ligações cruzadas.

A melhoria da força mecânica após a exposição UV combinada com alta temperatura (40 °C) também foi observada por Giampaoli *et al.* (2017). Eles avaliaram o envelhecimento de amostras de aço/GFRP coladas com diferentes adesivos, aplicando condensação contínua (100% de umidade) e temperatura de 40 °C e, em outra condição, a radiação UV foi utilizada em condições de laboratório (33% de umidade e 21 °C), conforme a ASTM D904 (1999). Os ensaios de cisalhamento mostraram que, na condição de condensação contínua, houve uma maior redução da rigidez. Por sua vez, sob a radiação ultravioleta, houve um aumento na capacidade de carga da junta, devido à polimerização adicional ocorrida nos polímeros em função da exposição aos raios ultravioleta. Quando as condições de envelhecimento foram combinadas, as respostas mecânicas foram melhores do que aquelas obtidas com as condições de degradação aplicadas individualmente.

Já Alderucci *et al.* (2019) investigaram o comportamento das juntas duplas (DSJ-*double strap joint*) GFRP/vidro sob diferentes condições de exposição UV, juntamente com alta temperatura e umidade. Eles observaram a ocorrência de redução na resistência mecânica da junta. As juntas foram degradadas por radiação UV (1000 h) e condensação contínua (umidade relativa 100%) em temperatura elevada (40 °C). As ações individual e combinada desses fatores também foram avaliadas. Eles constataram que a degradação UV, em condições laboratoriais, gera uma redução relativamente pequena na carga máxima suportada, quando comparada à redução causada por condensação contínua em 40 °C. No entanto, quando as duas situações foram associadas, notou-se uma maior redução da carga suportada do que a observada na degradação provocada por ambos individualmente. Assim, a ação combinada de fatores ambientais pode intensificar significativamente a degradação causada por um fator que não é individualmente agressivo, ou em alguns casos, como na exposição UV, pode até mesmo trazer melhorias causadas pelo processo pós-cura desencadeado.

Conforme relatado por Viana *et al.* (2017), no início da exposição aos raios ultravioleta, pode haver uma melhora nas propriedades da junta adesiva devido aos efeitos de pós-cura. No entanto, após um certo período, o desempenho pode diminuir, em função de outros mecanismo de degradações, como perda de massa, foto-oxidação

e quebra de ligações, que também são favorecidas pela exposição à radiação UV. Neste ponto, nota-se que o tempo de exposição é fundamental para compreender o real efeito da exposição UV, a longo prazo, sobre as juntas coladas.

Souza *et al.* (2019) propuseram um estudo da degradação de diversas condições ambientais em juntas simples coladas de GFRP por um período prolongado. Entre as condições de degradação estudadas, houve imersão em água destilada e água salgada nas temperaturas de 20 e 40 °C, névoa salina em 35 °C e condensação continua em 40 °C. Além do envelhecimento artificial, também foi avaliado o efeito do intemperismo ambiental externo de Lisboa (Portugal), onde se tem chuva, sol e variação de temperatura e umidade. Em todos os casos, as exposições ocorreram por 730 dias, exceto para a condensação continua, que foi por 365 dias. No geral, observou -se uma redução na tensão de ruptura do compósito bem expressiva nos primeiros 120 dias de exposição. Nos tempos seguintes, a redução foi relativamente pequena. Porém, em algumas condições, notou-se melhoria na resistência após longos períodos de exposição, associados a processos de pós-cura. Em relação às juntas, essas foram testadas após 570 e 730 dias de exposição. Notou-se uma melhoria na resistência ao cisalhamento das juntas em 570 dias e uma redução após 730 dias de exposição, para a maioria dos tipos de degradação propostos. Apesar deste trabalho apresentar um elevado número de condições de degradação, o efeito combinado foi observado apenas na associação da temperatura com a água e no caso da exposição externa.

Teste de degradação usando exposição externa por longos períodos, também, foi conduzida por Hunter-Alarcón *et al.* (2018). No seu trabalho, juntas simples de GFRP foram expostas ao ambiente externo no Chile por períodos de 9 a 12 meses. Foi observada uma redução de mais de 40% da carga máxima suportada pelas juntas quando expostas ao ambiente externo. Apesar disso, não foi notada nenhuma mudança no modo de falha das juntas simples, permanecendo a falha nas primeiras camadas do aderente.

Sugiman *et al.* (2019) estudaram como o efeito da degradação causada pela exposição em água influencia o comportamento de juntas adesivas simples de aço/GFRP. Nesse estudo, um grupo de amostras foi exposto em água destilada e outro em água salgada, ambas as condições em 45 °C e imersão contínua. Além da imersão contínua, essas mesmas condições foram feitas alternando ciclos de 4 dias imersos e 3 dias secando em temperatura ambiente. As amostras foram avaliadas considerando diferentes tempos de exposição, 14, 28, 56 e 90 dias. Individualmente, o adesivo epóxi

e o GFRP tiveram uma redução de resistência à tração de cerca de 50% em relação às amostras secas, tanto para a água destilada quanto para a água salgada, considerando 30 dias de imersão contínua em água. Já quando foram adotados os ciclos alternados de imersão e de secagem, foi observada uma redução ligeiramente maior. Em relação ao desempenho das juntas ao cisalhamento, observou-se a redução de resistência ao cisalhamento nos primeiros 14 dias de exposição, havendo uma mistura de falha interfacial e coesiva no adesivo. Mas, com o aumento do tempo de exposição, o mecanismo de falha passa a ser interfacial, entre o adesivo e o aderente de aço. No início, a redução de resistência pode ser relacionada à plastificação do adesivo. Após 28 dias, a redução adicional é relacionada à corrosão que proporciona desprendimento do adesivo do aço. Destaca-se um processo de corrosão mais severo na condição de degradação com água salgada alternada, pois é uma condição que favorece o processo corrosivo. Portanto, percebe-se que a forma alternada de ciclos molhado e seco favorece um outro fenômeno de degradação que não é observado em condensação ou imersão contínua.

Conforme é verificado a partir de uma revisão da literatura, como apresentado nesse estado da arte, contribuições adicionais podem ser realizadas sobre a ação de fatores de degradação ambientais. Verifica-se que é consenso entre os pesquisadores que a ação combinada dos fatores ambientais modifica a forma como cada fator degrada os materiais e que as correlações entre causa e efeito são um campo de pesquisa atual e de interesse na comunidade científica. De forma mais específica, contribuições podem ser realizadas sobre o efeito da degradação UV, considerando sua ação em longo prazo, isolada e combinada com outros fatores de degradação ambientais. Nota-se que a degradação UV vem sendo mais abordada recentemente e há uma lacuna de conhecimento quando se trata da exposição UV combinada com outros fatores, principalmente considerando longos períodos de exposição em juntas coladas, devendo novos estudos não serem limitados apenas às degradações nos materiais adesivos e aderentes de forma isolada.

Neste panorama, esta tese tem como objetivo o estudo de juntas simples dissimilares usando GFRP e aço, expostas à radiação UV ao longo do tempo, alcançando períodos longos, superiores a 1000 h. Justifica-se o uso do GFRP, um compósito menos abordado que o CFRP na literatura especializada, uma vez que, apesar de possuir um menor módulo de elasticidade, é uma ótima alternativa para redução de custos quando comparado ao CFRP. Com a combinação da exposição UV

com imersão em água destilada e salgada em diferentes temperaturas, busca-se compreender os efeitos da associação de temperatura, umidade e UV no comportamento de juntas. Inerente aos objetivos nesta tese, os efeitos da degradação ambiental também são estudados, exposição em que se tem de umidade, salinidade e temperatura, combinados com exposição a raios UV. Os comportamentos mecânicos das juntas e, de forma isolada, dos materiais adesivo e aderentes são avaliados considerando a ação de cada fator ambiental nos diversos cenários propostos nos experimentos, em especial o efeito da exposição UV.

Diante da motivação e dos objetivos dessa tese, são evidenciadas as contribuições deste trabalho conforme segue.

- Complementar a literatura no que diz respeito a degradação UV em juntas adesivas aço/GFRP a longo prazo e ação combinada da degradação UV.
- Estudar uma degradação externa por um ano em um ambiente com proximidade ao mar que favorece a corrosão. Fenômeno relatado na literatura como relevante para juntas com aderentes metálicos e pouco explorado em estudos que realizam degradação em ambientes externo.
- Correlacionar a ação de diferentes agentes de degradação por diferentes cenários, combinando exposição à radiação UV a, posteriormente, imersão em água salgada e destilada em diferentes temperaturas. Complementando o estudo da degradação UV, associando essa degradação com diferentes cenários de imersão em água.

3. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, são revisados os conceitos mais importantes aplicados no desenvolvimento desta tese. Primeiramente, são discutidos brevemente as juntas coladas, dando-se ênfase nas juntas simples e dissimilares, que são os tipos de juntas estudados nesse trabalho. As seções seguintes tratam especificamente dos materiais que foram usados na construção das juntas, compósitos e adesivos, mais especificamente compósitos GFRP e adesivos epóxis. São abordados ainda os diversos fatores de degradação ambiental que podem influenciar as propriedades mecânicas e a vida útil de juntas coladas, com destaque para fatores como umidade, temperatura e radiação ultravioleta.

3.1. Juntas Adesivas Coladas

Existem diversas formas de realizar uma união de materiais, podendo ocorrer, por exemplo, por meio de solda, parafuso ou colagem. Em se tratando de colagem, tem-se a metodologia de juntas adesivas coladas, em que materiais são unidos aplicando um material adesivo entre os materiais a serem unidos. Esse tipo de junta, em diversas aplicações, pode ser mais vantajoso que as conexões tradicionais, como as soldadas e as parafusadas (ZHENG *et al.*, 2019). Dentre as vantagens perante as demais alternativas de união de materiais, tem-se o fato delas evitarem, em relação ao processo de soldagem, a criação de zona termicamente afetada e, em relação ao uso de parafusos ou rebites, a criação de concentradores de tensões (REITZ *et al.*, 2017). A união de materiais por juntas adesivas coladas apresenta, no geral, uma melhor distribuição de tensões e pode ser preferida para a obtenção de sistemas mais leves, resistentes a corrosão e com melhor resistência a fadiga (REITZ *et al.*, 2017; KATNAM *et al.*, 2015; OSANAI K, 2012).

Na realização de uma junta adesiva colada, diferentes configurações de colagem podem ser adotadas, como as apresentadas na Figura 1, em que se tem juntas do tipo junta de sobre posição simples (*single lap joint*)*, junta de sobreposição dupla* (*double lap joint*)*,* junta de chanfro interior (*scarf joint*)*,* junta de topo *(butt joint*)*,* cobre

junta simples (*strap joint*), cobre junta supla (*double strap joint*). Cada configuração de junta possui perfis específicos de distribuição de tensões e, portanto, vantagens e desvantagens de acordo com o tipo de carregamento mecânico a ser suportado, bem como com relação a sua aplicabilidade em campo. Para o estudo de juntas adesivas coladas, verifica-se na literatura uma tendência de adoção da configuração *single lap joint* (SLJ), ou junta simples colada. Segundo Neto (2016), elas são de fácil fabricação e possuem menor custo de produção, sendo mais comumente adotadas, apesar da assimetria em relação à linha de carregamento. Para cada configuração de colagem, existem os parâmetros geométricos associados de espessura e largura do aderente (substrato), espessura da camada adesiva e comprimento da sobreposição (REBURN, 2016).

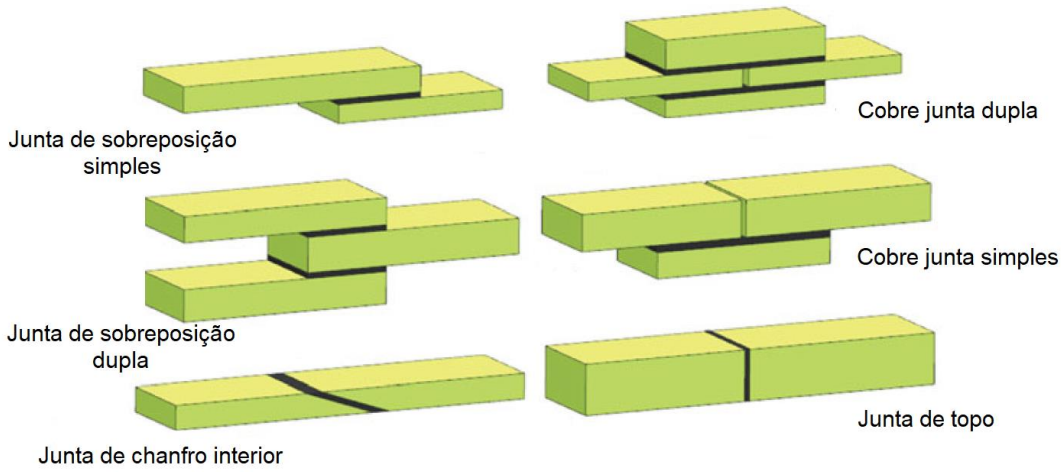


Figura 1 - Tipos de juntas adesivas coladas.

Fonte: Adaptado de Jeevi, Nayak e Kader, *2019*.

Considerando as vantagens das uniões coladas, elas ainda são opções adequadas para a união de diversos materiais, servindo não só para unir metais. Aderentes compósitos têm sido bastante adotados combinados com metais em juntas coladas, pois a combinação de FRPs com outros materiais, como os metais, permite obter um sistema multimaterial melhorado, com propriedades mecânicas e de massa otimizadas (REITZ *et al*., 2017). No caso em que os materiais aderentes são diferentes, como, por exemplo, quando um é FRP e o outro um metal, unidos em uma junta colada, configuram-se as juntas adesivas do tipo dissimilares.

3.2. Polímeros reforçados com fibra

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras combinam baixo peso específico e excelentes propriedades mecânicas (REITZ *et al.*, 2017 BAI *et al.*, 2014). Desse modo, vêm sendo uma ótima alternativa para substituir os metais em aplicações de reforço estrutural. Além disso, os polímeros reforçados com fibras (FRP), como os reforçados com fibras de vidro, apresentam excelente resistência à corrosão (BAI *et al.*, 2014; SILVA; BISCAIA; RIBEIRO, 2019; HEGDE; SHENOY; CHETHAN, 2019), facilidade e versatilidade de aplicação em campo (BATUWITAGE *et al.*, 2017) e podem apresentar melhor rigidez e resistência à fadiga do que os metais (HEGDE; SHENOY; CHETHAN, 2019).

Os FRP geralmente possuem uma matriz polimérica termorígida, como as resinas epóxi, vinil-éster e poliéster insaturado. O reforço é feito com fibras, como as fibras de vidro, carbono e aramida ou, ainda, fibras naturais como a juta e o sisal. Tais fibras podem ser usadas de forma contínua ou descontínua, sendo que as primeiras, no geral, apresentam maiores resistências e as segundas baixo custo (JEEVI; NAYAK; ABDUL KADER, 2019). Compósitos que possuem várias camadas de fibras unidas por uma resina polimérica são conhecidos como compósitos laminados.

A configuração adotada das camadas influencia as propriedades mecânicas obtidas pelo compósito laminado produzido. Na Figura 2, tem-se exemplos de configuração das camadas, em que em (a) tem-se uma camada com fibras curtas randômicas, em (b) fibras curtas orientadas, em (c) fibras contínuas unidirecionais e em (d) fibras continuas bidirecionais (GÜRDAL; HAFTKA; HAJELA, 1999).

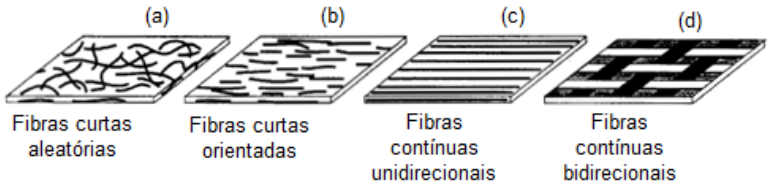


Figura 2 - Diferentes configurações de uma camada de um compósito laminado.

Fonte: Adaptado de Gürdal, Haftka e Hajela, *1999*.

Um tipo de compósito reforçado com fibra, muito utilizado, são os compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro (*Glass Fiber reinforced Polymer* - GFRP), pois se destacam como reforços estruturais e por serem mais acessíveis em relação às demais fibras sintéticas (MAFALDA; VENTURA, 2009). GFRP apresentam elevada razão entre resistência e peso, boa estabilidade dimensional, boa resistência ao calor, à umidade e à corrosão, além de boas propriedades de isolamento elétrico, facilidade de fabricação e custo relativamente baixo (MAFALDA; VENTURA, 2009).

3.3. Adesivos

Adesivos são materiais poliméricos, usados para unir materiais, sendo aplicada uma camada de adesivo para fazer a união entre os aderentes. Conforme já mencionado, há diversas configurações geométricas de colagem de juntas. Por outro lado, também existem diversos tipos de adesivos que atendem muitas aplicações. Por exemplo, em aplicações destinadas para suportar altas cargas, são selecionados adesivo do tipo estrutural. Nessa classe de adesivos pode-se destacar, os adesivos do tipo epóxi, acrílico, uretano, cianoacrilato, resinas anaeróbicas e curáveis por UV (JEEVI; NAYAK; ABDUL KADER, 2019).

Tendo em vista a natureza polimérica dos adesivos, o processo de cura é um fator importante para o desempenho não só do adesivo, mas também da junta (CARBAS *et al.*, 2014). Os parâmetros de cura, como o tempo e a temperatura, alteram as características do adesivo, como a Tg (temperatura de transição vítrea). O conhecimento da Tg é muito importante para determinar a temperatura de operação do adesivo, pois acima da temperatura de transição vítrea, o material passa de um estado vítreo para um estado borrachoso. Considerando a relevante importância da escolha adequada do adesivo, a Figura 3 contém um diagrama mostrando algumas classes de adesivos mais utilizadas em juntas coladas e suas características, que devem ser observadas na escolha do adesivo.

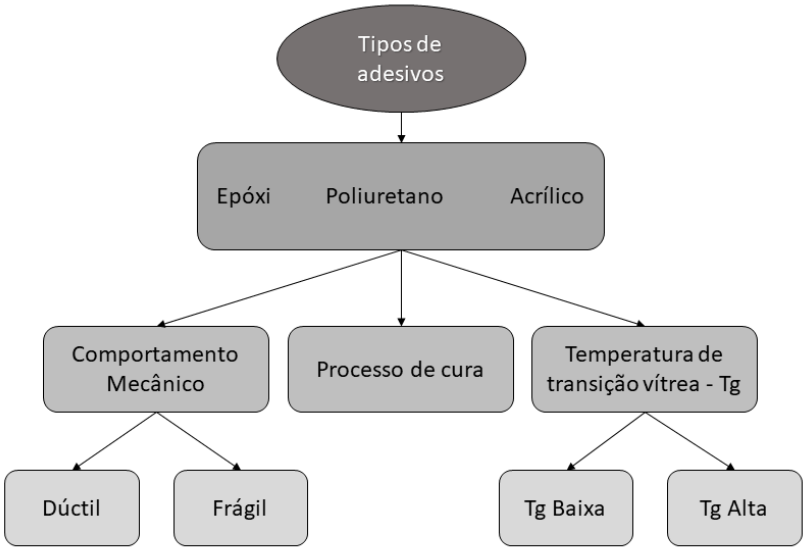


Figura 3 - Relação entre adesivos e suas propriedades.

Fonte: Adaptado de Gualberto, Amorim e Costa, 2021.

3.3.1. Adesivo Epóxi

Adesivos epóxis são adesivos estruturais bastante utilizados, pois permitem unir uma ampla gama de materiais, como metais, cerâmicas e polímeros. Além disso, produzem poucas substâncias voláteis e apresentam baixos valores de retração. Podem ser produzidas juntas bem projetadas, com ligações extremamente fortes e duráveis com a maioria dos materiais (DILLARD, 2010). Logo, é um adesivo adequado para utilização em juntas dissimilares.

Quando em sistemas de duas partes, o mecanismo de cura depende da mistura completa e de quantidades precisas de resina e endurecedor. A mistura completa e a quantidade de resina e endurecedor afetam o processo de cura e, consequentemente, as propriedades mecânicas, podendo apresentar redução de resistência e rigidez, por exemplo (DILLARD, 2010).

No caso de adesivos epóxi de duas partes, assim que são misturados, eles começam a reagir em condições ambientais, por isso são considerados como adesivos de cura em temperatura ambiente. A temperatura tem forte influência na velocidade das reações. Maiores temperaturas que a ambiente aceleram a velocidade da reação e

temperaturas menores tendem a aumentar o tempo de cura, podendo até inviabilizá-la (DILLARD, 2010).

3.4. Degradação ambiental

As condições ambientais a que as juntas serão submetidas quando em serviço podem modificar suas propriedades mecânicas ao longo do tempo e reduzir a sua vida útil. Portanto, em muitos trabalhos é estudada a influência dos fenômenos ambientais nas juntas adesivas (VIANA *et al.*, 2017; DA SILVA *et al.*, 2017; NA *et al.*, 2019; BARBOSA *et al.*, 2017; AMORIM *et al.*, 2018; ZHANG; CAO; TAO, 2019). Entre esses fatores, estão a temperatura de operação, a umidade e a imersão em água, a névoa salina, a corrosão e a exposição aos raios UV. Além disso, a combinação simultânea ou cíclica (alternância na atuação de fatores de degradação) desses fatores pode intensificar as alterações causadas nas juntas. Nas próximas seções, os principais fatores ambientais, a saber, temperatura, umidade e radiação UV serão discutidos em detalhes.

3.4.1. Temperatura

A temperatura de operação é um parâmetro que deve ser observado no projeto de uma junta. A resistência das juntas coladas, em função da temperatura, pode ser influenciada pela diferença de coeficientes de dilatação térmica (CTE - *Coefficient of Thermal Expansion*) dos materiais da junta, pelos efeitos de retração de cura do adesivo e pelas propriedades do adesivo e do aderente, que, quando construídos de materiais poliméricos, são altamente influenciados pela temperatura (BUDHE; BANEA; DE BARROS, 2018).

Considerando os materiais adesivos, tem-se que as propriedades viscoelásticas dependem da temperatura (HUNTER-ALARCÓN *et al.*, 2018). Em temperaturas próximas ou acima da Tg, a capacidade do adesivo de transferir tensão é reduzida. Acima da Tg, o adesivo muda de um estado vítreo para um estado de borrachoso, o que reduz sua resistência (LI *et al.*, 2016; HE; XIAN; ZHANG, 2020; MARQUES *et al.*, 2015). Para a maioria dos adesivos poliméricos, temperaturas mais altas aumentam a

mobilidade molecular, o que reduz a resistência. A temperatura de aplicação adequada para um determinado adesivo polimérico depende do seu valor de Tg. Acima disso, a resposta viscoelástica torna-se não linear, o que dificulta a previsão do comportamento do material (VIANA *et al.*, 2017; MARQUES *et al.*, 2015). Adesivos com alta Tg devem ser usados em aplicações de alta temperatura e adesivos com baixa Tg devem ser adotados em condições de baixa temperatura (VIANA *et al.*, 2017; MARQUES *et al.*, 2015). Por esta razão, a temperatura na qual o polímero é aplicado e sua Tg são os fatores importantes a serem considerados ao projetar uma junta adesiva. Tal observação foi evidenciada no diagrama apresentado na Figura 3, em que a escolha do adesivo é condicionada à relação Tg e temperatura de operação.

Similarmente ao que ocorre para os materiais adesivos poliméricos, a resistência dos compósitos geralmente diminui com o aumento da temperatura. Isso está relacionado ao fato de a matriz ser uma resina polimérica, que amolece quando a temperatura se aproxima de sua Tg. Além disso, os compósitos são feitos de diferentes materiais, fibra e matriz, que possuem diferentes coeficientes de expansão térmica (CTE). Este fato pode reduzir a resistência dos compósitos em altas temperaturas (KULKARNI; OCHOA, 2006; BUDHE; BANEA; DE BARROS, 2018). Assim, é importante que a resina e a fibra tenham valores de CTE semelhantes.

Como já mencionado, as variações de temperatura podem gerar tensões, uma vez que os diferentes componentes da junta adesiva possuem valores de CTE distintos (HAN *et al.*, 2018 ZHANG; VASSILOPOULOS; KELLER, 2010; SOUSA *et al.*, 2018; VIANA G *et al.*, 2017; BANEA *et al.*, 2011). Este fato é mais pronunciado em juntas dissimilares, conforme apresentado por da Silva e Adams (2007) em seu estudo de DSJs de titânio/GFRP. Isso significa que a temperatura afeta cada componente da junta de maneira diferente, criando tensões entre as interfaces dos materiais distintos.

A forma como o calor atua nas juntas também tem sido objeto de pesquisa. Segundo Viana *et al.* (2017), a resistência das juntas coladas adesivas está relacionada com a degradação das propriedades mecânicas do adesivo e com as tensões residuais induzidas pelos diferentes coeficientes de dilatação térmica. Portanto, é importante estudar o comportamento mecânico e térmico de toda a junta adesiva e não apenas o desempenho individual de cada componente. Outra observação relevante é a forma como a temperatura atua na junta, seja uma combinação de diferentes temperaturas, ou exposição em ciclos.

Além de alterar o comportamento mecânico dos materiais, a temperatura também influencia outros fenômenos, como a difusão da água. Na próxima seção, discute-se a degradação causada pela água e/ou umidade, incluindo como essa ação ocorre em diferentes temperaturas.

3.4.2. Umidade

A presença de água, por umidade ou imersão, tem influência no comportamento de adesivos e aderentes, principalmente na matriz de aderentes compósitos. Assim, a água é uma substância chave quanto à durabilidade, sobretudo de juntas adesivas dissimilares (HESHMATI; HAGHANI; AL-EMRANI, 2016). A forma como ocorre a absorção de água nos materiais depende de vários fatores além da temperatura, que podem intensificar a sua difusão. No caso de uma junta adesiva colada, tem-se as propriedades de absorção de umidade dos materiais adesivo e aderentes, a condição e o tempo de exposição com a água/umidade, por exemplo (BUDHE; BANEA; DE BARROS, 2018; BUDHE *et al.*, 2017).

Nas juntas adesivas, a permeabilidade da água pode ocorrer de três formas: difusão na camada adesiva, através da interface entre o adesivo e os aderentes, ou absorção pelos poros do aderente (compósito) (HESHMATI; HAGHANI; AL-EMRANI, 2016; HESHMATI; HAGHANI; AL-EMRANI, 2017). A absorção de água reduz a Tg e causa plastificação e inchamento do adesivo. Esses fenômenos geram distorções e microfissuras que reduzem a resistência mecânica da junta (PANG *et al.*, 2019; NGUYEN *et al.*, 2012; HEGDE; SHENOY; CHETHAN, 2019; GHOLAMI *et al.*, 2013). A presença de diferentes coeficientes de expansão higroscópica entre adesivo e aderentes tende a intensificar os efeitos do inchamento (HAN *et al.*, 2018).

No caso de adesivos, os pesquisadores reportam que a umidade geralmente causa uma redução na resistência (VIANA G *et al.*, 2017; BANEA *et al.*, 2011; DA SILVA L, 2007; GU *et al.*, 2021; KADIOGLU; PUSKUL, 2016). Quando a umidade absorvida pelo adesivo aumenta, a resistência à tração do adesivo diminui. Esse comportamento provavelmente está relacionado à redução da Tg e ao amolecimento do adesivo, o que aumenta a ductilidade do material, além do inchamento, que pode causar tensões e microtrincas (BUDHE; BANEA; DE BARROS, 2018; BORGES *et al.*, 2020). A taxa em

que a absorção ocorre depende de outros fatores relacionados à exposição à umidade, como tempo, temperatura e outras condições ambientais.

A Tg é uma propriedade do material muito importante para os projetistas, pois indica a temperatura na qual o material pode ser aplicado. Como já visto, a interação com a água altera a Tg de várias maneiras. Geralmente, a absorção de água tende a reduzir a Tg (BORGES *et al.*, 2020; DE'NE`VE; SHANAHAN, 1993; ELLIS; KARASZ, 1984; ZHANG; ADAMS; DA SILVA, 2014).

Em relação aos aderentes compósitos, além dos fenômenos que a umidade provoca nos polímeros, como plastificação e redução de Tg, a absorção de água enfraquece a interação entre a resina e a fibra (GHOLAMI *et al.*, 2013). Além disso, como a matriz e as fibras são compostas por materiais diferentes, o inchamento também é relevante para o comportamento dos aderentes compósitos. Em compósitos, a forma como a água é absorvida depende da porcentagem de fração fibra/resina e da orientação das fibras (RAY; RATHORE, 2015).

O aparecimento de microfissuras causadas pelo inchamento torna-se mais acentuado quando ocorrem ciclos de absorção e dessorção de água, uma vez que as microfissuras atuam como vias para a difusão da água, intensificando a absorção de umidade do material e, consequentemente, aumentando a degradação. Sob exposição cíclica de umidade e de secagem, a ductilidade obtida pela absorção de água pode ser perdida (BUDHE; BANEA; DE BARROS, 2018 MUBASHAR, 2011). Esta é mais uma razão para a necessidade de determinar o comportamento de adesivos e resinas com base no histórico de absorção e dessorção.

Segundo Hunter-Alarcón *et al.* (2018), outro fenômeno, causado pela ação da água, é a ocorrência de uma falha da junta provocada pela delaminação do compósito nas primeiras camadas. A delaminação observada passa para as camadas mais interiores com o aumento do tempo de exposição das juntas ao ambiente externo. Esta observação é um indício de que a degradação da absorção de água nas juntas é mais pronunciada no compósito. A porcentagem de umidade absorvida também está relacionada ao modo de falha, tendendo a alterar o modo de falha de adesiva para coesiva (BUDHE *et al.*, 2017). Assim, entender a influência da absorção de água nas juntas adesivas permite prever os modos de falha.

A dinâmica da absorção de água pelos materiais adesivos e aderentes pode ser afetada pelas condições em serviço da junta adesiva colada (COSTA *et al.*, 2017;

HESHMATI; HAGHANI; AL-EMRANI, 2017; GÁLVEZ *et al.*, 2020; BORDES *et al.*, 2009). Heshmati, Haghani e Al-Emrani (2017) analisaram os efeitos da água no desempenho a longo prazo de juntas dissimilares FRP/aço usadas em pontes, tanto CFRP quanto GFRP, sob quatro condições: usando imersão em água destilada, em água salgada, com a presença de umidade e, por fim, a combinação destas com diferentes temperaturas. Além desses, outros fatores, como a exposição aos raios UV, têm sido associados à degradação provocada pela umidade, como será visto na próxima seção.

3.4.3. Radiação ultravioleta

Em condições de serviço, as juntas adesivas são frequentemente expostas à radiação UV. Os raios UV têm efeitos nocivos sobre os polímeros, modificando sua cor, quebrando suas cadeias e reticulando moléculas, alterando suas propriedades físicas, mecânicas e químicas, como o peso e o grau de cristalinidade (BARBOSA *et al.*, 2017; BREBU, 2020). O comprimento de onda dos raios UV está entre 290 nm e 400 nm, uma faixa com potencial para quebrar as ligações químicas dos polímeros (CHENNAREDDY *et al.*, 2019; SHOKRIEH; BAYAT, 2007). A radiação UV também pode causar degradação fotoquímica, devido à interação dos fótons de luz com as cadeias poliméricas (BAZLI *et al.*, 2020).

Como os compósitos e adesivos são compostos de materiais poliméricos, as juntas adesivas de FRP são severamente degradadas pela exposição à radiação UV. No caso das resinas epóxi, que são encontradas em muitas aplicações, seu desempenho é drasticamente reduzido quando exposto à luz solar. Isso ocorre porque seus grupos aromáticos são fortes absorvedores de radiação na faixa do UV, o que torna os epóxis muito suscetíveis à degradação por UV (NIKAFSHAR *et al.*, 2017).

Nas últimas décadas, muitos estudos avaliaram o comportamento de compósitos, adesivos, resinas e juntas adesivas quando expostos à radiação UV (BAZLI *et al.*, 2020; SHOKRIEH; BAYAT, 2007; NIKAFSHAR *et al.*, 2017; PILLAY; VAIDYA; JANOWSKI, 2009; KHALEEL *et al.*, 2018; KUMAR; SINGH; NAKAMURA, 2002). Khaleel *et al.* (2018) investigaram os efeitos da exposição UV na vida de fadiga de SLJs de CFRP/Al. Pillay, Vaidya e Janowski (2009) avaliaram o efeito da umidade e da exposição UV em laminados de compósitos de poliamida 6 reforçados com tecido de

carbono. Nakamura *et al.* (2006) e Mouzakis *et al.* (2008) avaliaram a degradação ambiental, onde a exposição UV de FRPs foi considerada.

Em alguns estudos, além da degradação UV, outros fatores ambientais também foram associados à exposição UV, como umidade e temperatura. Como a degradação UV na superfície dos polímeros pode facilitar a permeabilidade à água (BARBOSA *et al.*, 2017; BREBU, 2020; KUMAR; SINGH; NAKAMURA, 2002), os efeitos da combinação da radiação UV com a umidade têm sido investigados (BAI *et al.*, 2014; BARBOSA *et al.*, 2017; BAZLI *et al.*, 2020; KUMAR; SINGH; NAKAMURA, 2002). Portanto, a combinação de fatores ambientais pode gerar resultados diferentes daqueles observados para cada condição individualmente.

Deste modo, além da alteração na aparência e nas propriedades mecânicas causadas aos polímeros, a radiação UV, quando combinada com outros fatores ambientais, como umidade e alta temperatura, tende a aumentar os efeitos desses fatores, causando maior degradação e, consequentemente, comportamento mecânico inesperado das juntas em condições anormais. Apesar disso, a degradação por UV ainda é um campo em aberto, pois, além da degradação combinada com umidade, existem outros fatores ambientais que possuem sua degradação influenciada pela radiação UV. Em outras palavras, apesar dos esforços envidados por diferentes pesquisadores, mais detalhes relacionados à degradação UV precisam ser investigados para consolidar a aplicação externa de reparos com juntas adesivas com aplicações em longo prazo.

3.5. Modos de falha da junta

As juntas podem falhar de diversos modos, seja a falha no aderente ou no adesivo. Buscando facilitar o entendimento das possíveis falhas que podem ocorrer em uma junta colada metal/FRP, Zhao e Zhang (2007) resumiram os modos de falhas em 6 tipos, que são exemplificados na Figura 4: (a) descolamento na interface aço e adesivo; (b) falha coesiva; (c) descolamento na interface adesivo e FRP; (d) delaminação de FRP; (e) falha do PRF; e (f) escoamento do aço (NGUYEN *et al.*, 2011). Esses modos de falha podem ocorrer de forma individual ou mista, quando dois ou mais modos de falha são apresentados na mesma junta.

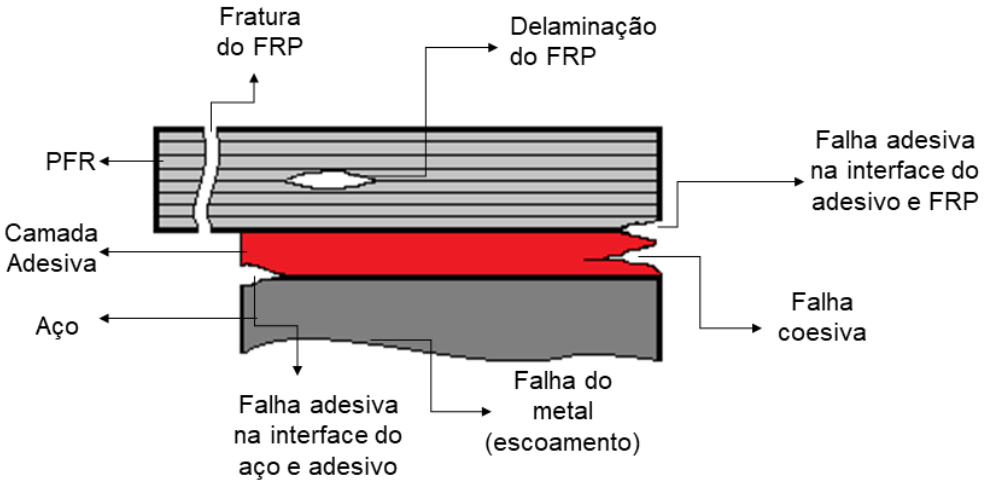


Figura 4: Principais modos de falha juntas coladas metal/FRP.

Fonte: Adaptado de Gualberto, Amorim e Costa, 2021.

4. Materiais e Métodos

Neste capítulo, serão descritos os materiais e os métodos utilizados neste trabalho. Os materiais usados nas juntas, juntamente com as suas propriedades, e os procedimentos para a produção do material compósito GFRP e para a fabricação das juntas coladas são descritos nas primeiras seções deste capítulo. Depois, são apresentados os procedimentos adotados para cada processo de degradação proposto. Além disso, é apresentado o projeto elaborado da câmara para degradação UV. Por fim são descritos os ensaios mecânicos e as caracterizações realizadas.

4.1. Materiais

Neste trabalho, foram usadas juntas simples dissimilares metal/compósito coladas com adesivo epóxi. Na sequência, são descritos os materiais usados nos aderentes e no adesivo.

Para o aderente metálico, foram usadas barras chatas de aço SAE 1020 com espessura de 3,4 mm e largura de 25,4 mm, aproximadamente. Na Tabela 1, são descritas as principais características e propriedades deste aço. No aderente compósito reforçado com fibra de vidro, foram utilizadas uma malha bidirecional de fibra de vidro com 200g/m² (E-Composites Comércio de Materiais Compósitos LTDA, Brasil) e a resina Epóxi MC 109 com endurecedor FD 131 (EpoxyFiber, Brasil), sendo a relação de 1000 g da resina para 200 g do endurecedor. As principais propriedades da resina são apresentadas na Tabela 2, conforme os dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 1 - Propriedades o aço SAE 1020.

Propriedade	Valores (unidade)
Limite de Resistência à Tração	380 MPa
Limite de Escoamento	210 MPa
Módulo de Elasticidade	205 GPa
Dureza	111 HB

Fonte: Budynas; Nisbett, 2016.

Tabela 2 - Propriedades da Resina Epóxi MC 109.

Propriedade	Valores (unidade)
Viscosidade a 25 °C	12000-13000 μ(cP)
Massa específica	1160 Kg/m³
Módulo de elasticidade	2,4-5,0 GPa
Resistência à flexão	60 MPa
Resistência à tração	73 MPa

Fonte: Luca, 2021.

Para a união dos aderentes foi utilizada a resina Epóxi MC 404 A/B (EpoxiFiber, Brasil), oriunda da reação de epicloridina com bisfenol A, cuja relação resina e endurecedor é de 1000 g para 90 g, respectivamente. O endurecedor é a base de uma amina alifática. Segundo o fabricante, é um sistema epóxi que forma uma camada dura, resistente a abrasão e com excelente resistência mecânica (LUCA, 2021). Além disso, ele pode ser usado como uma camada de superfície, mas também pode ser utilizado em diferentes aplicações como elemento de ligação (LUCA, 2021). Sendo assim, se adequa para fazer a união eficiente entre aderentes metálicos e compósitos.

Tabela 3 - Propriedades do Adesivo Epóxi Rengel SW 404.

Propriedade	Valores (unidade)
Viscosidade a 25 °C	40.000 - 60.000 μ(cP)
Massa específica	1,85 – 1,95 g/cm³
Resistência à tração	49 – 59 MPa
Resistência à flexão	108 -137 MPa
Resistência à pressão	128 -147 MPa
Resistência ao impacto	7,50-9,50 kJ/m²
Massa específica	1,80-1,90 g/cm³
Coeficiente de dilatação	35-40 10-6 °C
Condutividade térmica	0,70 kcal/MH°C
Módulo de elasticidade	8,83 - 9,81 GPa
Dureza Shore	85-90

Fonte: Luca, 2021.

O adesivo MC 404 é similar ao Rengel SW 404 (MaxEpóxi, Brasil), cujas principais propriedades são listadas na Tabela 3. Ele possui tempo de utilização de 15 a 20 min e cura completa em 7 dias, ambos em 25°C.

Vale destacar que o adesivo e a resina do compósito foram escolhidos, pois, segundo pesquisas já desenvolvidas no laboratório LED (Laboratório Para Ensaios Em Dutos) da UFF, esses materiais já têm sido usados como alternativas para reparos. Sendo a pesquisa com degradação destes materiais uma contribuição para suas aplicações.

4.2. Produção do compósito reforçado com fibra de vidro (GFRP)

Os compósitos reforçados com fibra de vidro foram produzidos por laminação manual de camadas por camadas, comprimidas utilizando uma prensa hidráulica com aquecimento (SL-12/20, SOLAB, Brasil) em molde metálico. Na Figura 5, tem-se a prensa usada com a configuração adotada para o processo de cura das placas de compósito.



Figura 5 - Prensa Hidráulica utilizada na produção das placas de compósito.

O processo de produção dos compósitos seguiu as etapas listadas na Figura 6, iniciando com o processo de corte do tecido de fibra de vidro e finalizando após 8 h em pressão e temperatura, 5 Ton e 60 °C, respectivamente. Foram usadas 22 camadas do tecido de fibra de vidro, cerca de 125 g, embebecidas com 100 g da resina MC 109 e 20 g do endurecedor. Ou seja, uma proporção de 5/1 para a resina e endurecedor e a relação fibra e resina foi de, aproximadamente, 1/1. A resina foi misturada e homogeneizada manualmente por cerca de 1 minuto antes de ser aplicada. Visto que a resina aumentava sua viscosidade rapidamente, foi preciso laminar o compósito a cada 3 camadas da malha de fibra de vidro para agilizar o processo. Um rolo foi usado para espalhar e distribuir uniformemente a resina sobre cada grupo de camadas da malha aplicada. As camadas foram empilhadas sobre um dos lados do molde metálico, em que foi aplicado desmoldante para facilitar a remoção do compósito. Depois de laminadas, o batente foi colocado entorno do material laminado e o molde fechado. O molde foi colocado na prensa com pressão de 5 ton e temperatura de 60 °C, que se mantiveram durante 8 h para o processo de cura. Diferentemente do realizado por Castro *et al.* (2020), o processo de cura foi realizado acima da temperatura ambiente, em 60 °C.

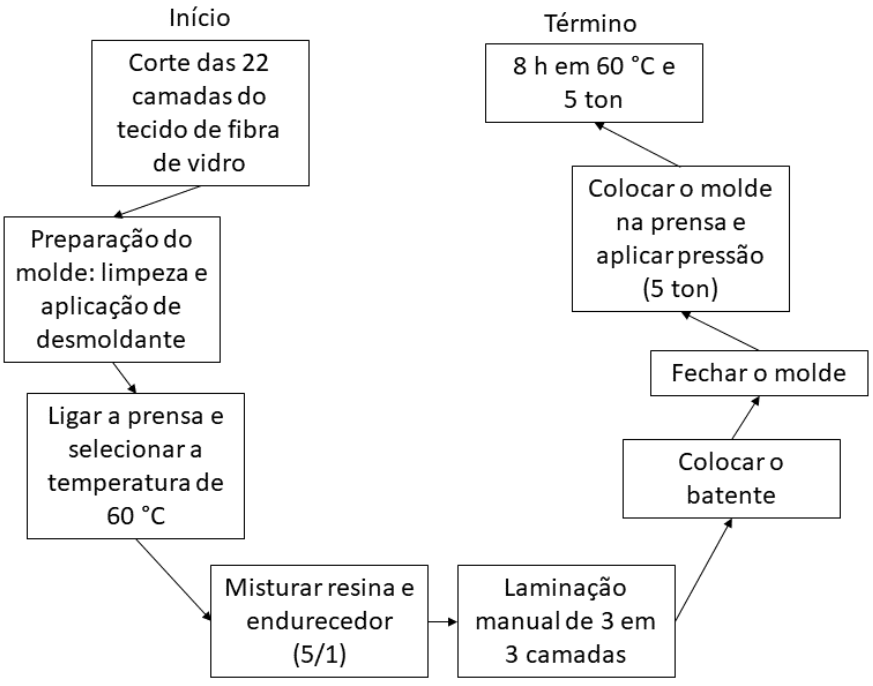


Figura 6 - Fluxograma das etapas de produção do compósito GFRP.

Na Figura 7, tem-se, na figura (a), o batente feito com as barras metálicas e em (b) a placa de compósito depois de curado, ainda envolto pelo batente. Cabe destacar que as placas de compósito produzidas eram de dimensões de aproximadamente 22 cm de altura por 16 cm de largura e espessura média de 3,8 mm.



(a) (b)

Figura 7 - Produção do material compósito, em (a) os batentes envolvendo o tecido de fibra de vidro e em (b) o compósito gerado envolto pelo batente (dimensões em cm).

4.3. Produção das Juntas simples dissimilares aço/GFRP

As juntas simples foram produzidas para o ensaio de cisalhamento segundo a norma da ASTM D5868 (2014), indicada para juntas com aderentes compósitos e a norma da ASTM D1002 (2010), indicada para juntas de aderentes metálicos. As duas normas são consideradas, pois as juntas desta tese são dissimilares, ou seja, possuem aderentes de materiais distintos, metal e compósito. Ambos os aderentes da junta possuem 100 mm de comprimento por 25,4 mm de largura. Foi adotado o comprimento de sobreposição de 25,4 mm, conforme recomendação da norma. Na Figura 8, tem-se um esquema da junta produzida com as dimensões anteriormente citadas e as espessuras dos aderentes compósitos e metálicos, 3,8 mm e 3,4 mm, respectivamente. Essa configuração é semelhante à adotada por Giampaoli *et al.* (2017), que estudaram juntas simples aço/GFRP adotando diferentes tipos de adesivos.

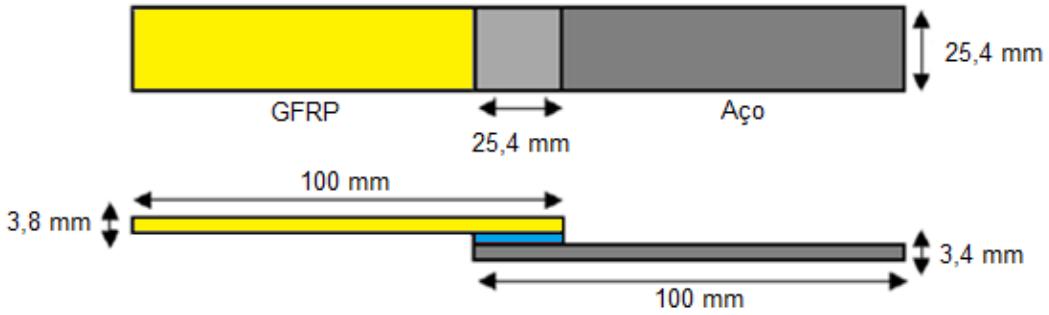


Figura 8 - Esquema da junta simples colada produzida.

Os aderentes metálicos foram jateados com granalha angular de aço carbono G40B (Garuva Abrasivos, Brasil), que possui faixa de tamanho de grão de 420 a 840 µm e rugosidade do tipo SAE G-40. O jeteamento buscou melhorar a aderência do adesivo neste aderente. Após serem jateados, os aderentes foram limpos com acetona. Para facilitar o jateamento, vários aderentes metálicos foram presos em um suporte, conforme pode ser observado na Figura 9. Já os aderentes compósitos foram lixados com lixa de madeira de 150 gr e depois limpos com acetona.

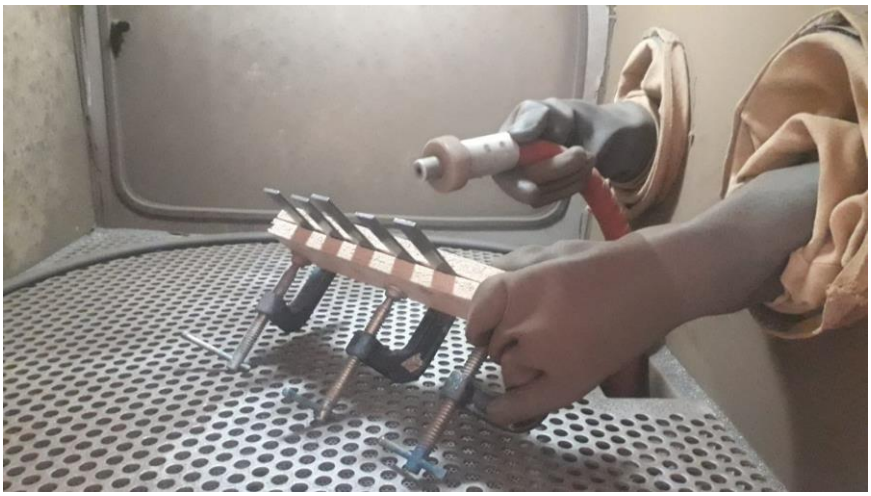


Figura 9 - Processo de jateamento dos aderentes metálicos.

Uma camada de adesivo foi colocada na região a ser colada e as juntas foram montadas em um molde para manter o alinhamento. O molde com a montagem das juntas é apresentado na Figura 10. Como pode ser observado, foram usados dois sargentos, fixados pressionando uma barra sobre o aderente compósito, pouco acima da região colada. Esse processo foi realizado com o objetivo de pressionar o aderente compósito sobre o aderente metálico e expulsar o excesso de adesivo ajudando a controlar a espessura do adesivo.



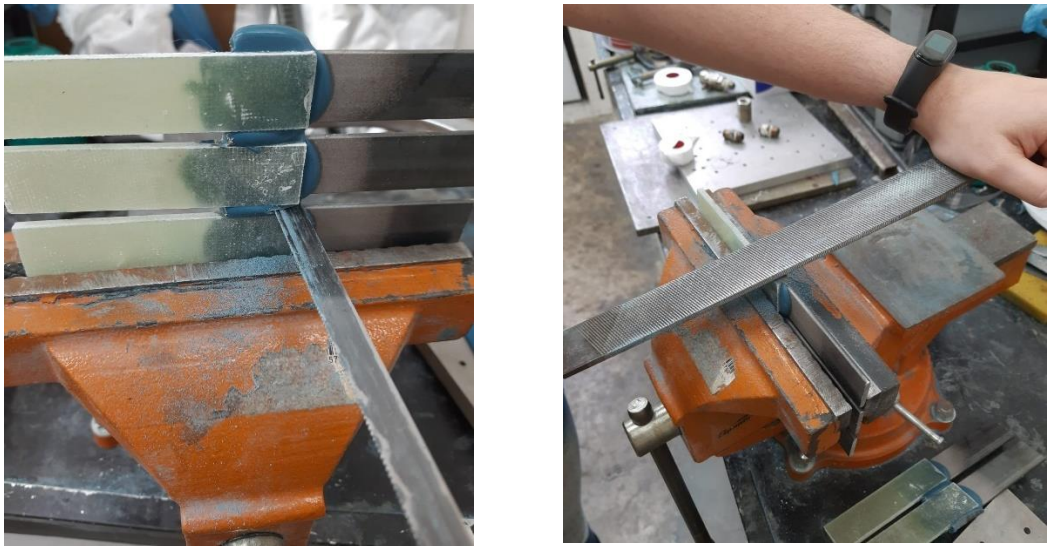
Figura 10 - Montagem das juntas no molde.

A espessura de adesivo adotada foi de 0,2 mm. Luca (2021) identificou que as juntas com espessura de 0,2 mm desse adesivo apresentam maior força de ruptura entre as espessuras por ela avaliadas. Para controle dessa espessura, foram usados batentes de 3,6 mm de espessura embaixo dos aderentes compósitos, ou seja, 0,2 mm maior que a espessura dos aderentes metálicos, que é de 3,4 mm, garantindo assim, a espessura do adesivo de 0,2 mm. Na Figura 11, tem-se o esquema do batente utilizado para controlar a espessura do adesivo da junta.



Figura 11 - Esquema do batente para controle de espessura do adesivo.

Após o processo de montagem das juntas, elas foram retiradas do molde depois de enrijecerem e deixadas para finalização da cura do adesivo por 7 dias em temperatura ambiente, conforme indicação do fabricante do adesivo. Depois de curadas, as juntas foram separadas com o auxílio de uma serra, como pode ser observado na Figura 12(a). O excesso de adesivo foi removido por meio de um processo de limagem, como na Figura 12(b).



(a) (b)

Figura 12 - Processo de separação das juntas prontas: serragem (a) e limagem (b).

4.4. Projeto câmara de degradação ultravioleta

A câmara de degradação UV foi projetada para expor as juntas conforme a norma ASTM D904 (1999) à radiação ultravioleta artificial, usando lâmpadas fluorescentes (método de exposição A da norma).

As dimensões da câmara projetada foram de cerca de 600 mm de comprimento, 300 mm profundidade e 350 mm de altura, conforme destacado na Figura 13, em que tem-se a imagem externa da câmara e suas dimensões. Essas dimensões foram adotadas em semelhança às da câmara projetada por Chennareddy *et al.* (2019), pois comportariam o tamanho e a quantidade de juntas necessárias na pesquisa.



Figura 13 - Caixa da câmara de degradação UV e suas dimensões externas.

Foram escolhidas lâmpadas tubulares actínicas, modelo TL-BL T8 UV-A 15 W com pico de radiação em 365 nm (Lucmat, China). Os dados da lâmpada fornecidos pelo importador são apresentados na Tabela 4. Outras câmaras similares, baseadas na mesma norma, foram projetadas utilizando Lâmpadas fluorescentes tubulares actínicas (GIAMPAOLI *et al.*, 2017; ALDERUCCI *et al.*, 2019; CHENNAREDDY *et al.*, 2019).

Para estimar o número necessário de lâmpadas na câmara, é preciso estimar a irradiação E de cada uma das lâmpadas da câmara, dada pela Eq. (1):

$$E = \frac{\varphi}{2\pi a l} \tag{1}$$

onde φ é o fluxo total de radiação que uma lâmpada gera em Watts, a é a distância em relação à lâmpada e l é o comprimento da lâmpada, ambos em metros, sendo esta equação válida para $a < 0{,}5l$ (PHILIPS, 2023).

Tabela 4 - Dados técnicos da lâmpada usada.

Informações	Dados
Potência nominal	15 W
Potencial de irradiação entre 320 e 400 nm*	3,5 W
Pico de radiação	365 nm
Modelo	T8
Terminal elétrico	G13
Diâmetro	260 mm
Comprimento	450 mm
Vida útil a lâmpada	8000 h

* Dado estimado

Baseado nas normas ASTM D904 (1999) e G154 (2000), que trata sobre os aparatos para exposição, determinou-se o potencial de irradiação a ser gerado sobre as juntas a serem degradas. No Anexo A, tem-se a Tabela 15 do potencial de irradiação do Sol em diversas faixas. Considerando essa tabela, foram somados os potenciais da faixa de 320 nm a 360 nm, com o da faixa de 360 nm a 400 nm, faixas que têm o mesmo intervalo da irradiação da lâmpada. Assim, a câmara foi projetada para produzir uma radiação de 60,34 W/m² sobre o centro da junta, região da união adesiva, ponto mais suscetível à degradação.

Pela Eq. (1), o cálculo da irradiação sobre a junta depende da distância da mesma à lâmpada. Assim, foi preciso determinar as distâncias das lâmpadas ao centro da câmara, onde também ficará o centro das juntas. Avaliando projetos semelhantes (GIAMPAOLI *et al.*, 2017; ALDERUCCI *et al.*, 2019; CHENNAREDDY *et al.*, 2019), ou seja, com lâmpadas e dimensões semelhantes, notou-se que seriam necessárias, pelo menos, 6 lâmpadas. Sendo assim, foi feita a distribuição das lâmpadas na câmara, conforme a Figura 14. Nesta mesma figura, tem-se as distâncias das lâmpadas ao centro da caixa, onde c e b representam a maior e a menor distância, respectivamente, de uma lâmpada ao centro da caixa. Esse é o ponto de maior incidência na câmara. O ponto de menor incidência seria a extremidade da junta, que também foi avaliado, mas tem menor relevância neste projeto.

Na câmara, a distância b é de 100 mm e a distância c é de 141,4 mm. Considera-se que o lado direito das amostras é irradiado diretamente por apenas três lâmpadas e o lado esquerdo pelas outras três lâmpadas do outro lado da câmara. Levando em

consideração as distâncias de cada lâmpada em relação ao centro da câmara e que as lâmpadas adotadas possuem um potencial de radiação aproximado de 3,5 W na faixa do UV, conforme Tabela 4, a irradiação recebida no centro da câmara é de pelo menos 61,4 W/m². Este valor equivale a 221 kJ/h.m² e é um pouco superior ao valor de referência calculado com base na norma, que é de 60,34 W/m².

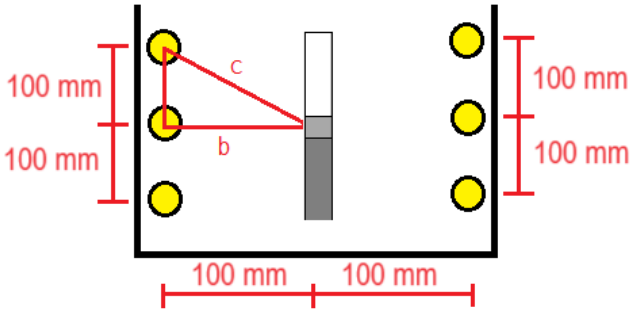
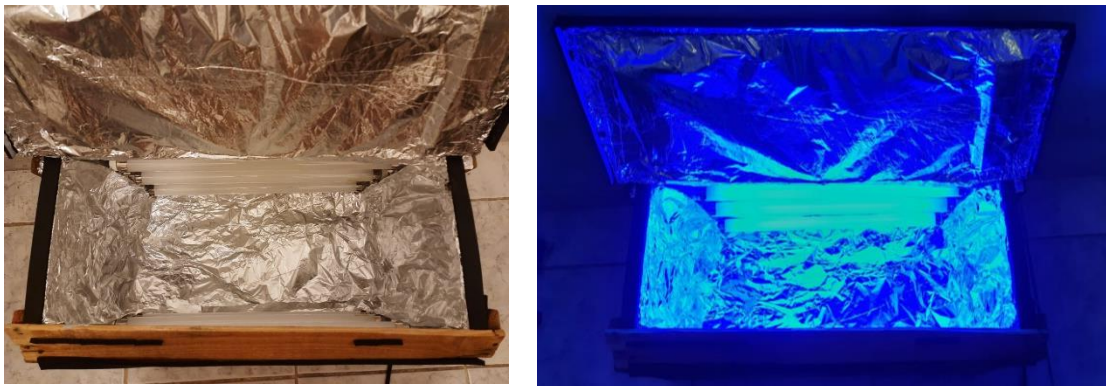


Figura 14 - Esquema do posicionamento das lâmpadas e das juntas na câmara de degradação UV.

Para a determinação do potencial de radiação solar em 1 ano no Brasil, dados da irradiância solar anual foram coletados no banco de dados do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sergio de S. Brito - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CRESESB - CEPEL) (CEPEL, 2022). Foram selecionados dados da região de Niterói, para comparação dos resultados da degradação UV com os da degradação externa realizada em Niterói. Deve-se destacar que, de todo o potencial energético do Sol, apenas cerca de 5% estão relacionados à radiação UV (ESCOBEDO *et al.*, 2011; INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER, 1992). Assim, o potencial de global de irradiação em Niterói, em 1 ano, é de cerca de 6284,20 MJ/m² e, considerando apenas a faixa do UV, tem-se um potencial de 314 MJ/m² por ano. Portanto, para simular esta exposição solar por 1 ano com a câmara projetada, seriam necessários, aproximadamente, 60 dias de exposição na câmara.

Cabe destacar que as paredes de toda a câmara foram forradas com papel alumínio, com superfície espelhada, buscando refletir toda a radiação que não incide diretamente sobre as juntas, com a finalidade de aproveitar melhor a radiação produzida pelas lâmpadas. Além disso, foi considerado, para o cálculo do potencial, apenas a irradiação gerada em linha reta sobre a junta, desconsiderando o efeito difuso de

irradiação de todo o comprimento da lâmpada. Portanto, a câmara produz radiação suficiente para atender os requisitos da norma e os valores obtidos são compatíveis com o obtido por outros autores. Na Figura 15, tem-se a imagem da câmara produzida, em (a) tem-se a câmara internamente e verifica-se a distribuição das lâmpadas, em (b) a câmara ligada.

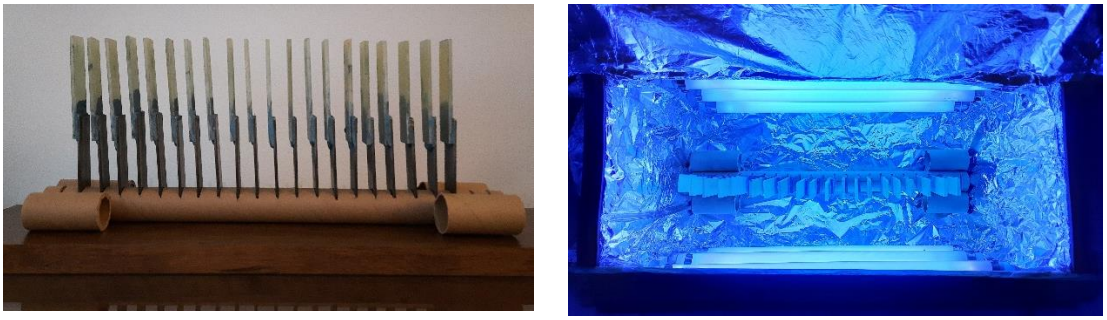


(a) (b)

Figura 15 - Câmara de degradação UV, com as lâmpadas em (a) deligadas e em (b) acessas.

Um suporte para posicionar as juntas dentro da câmara foi confeccionado, como apresentado na Figura 16. Na Figura 16(a), tem-se o suporte com as juntas posicionadas nele e, na Figura 16(b), o suporte com as juntas no interior da câmara ligada. Pode-se destacar que as juntas são posicionadas lateralmente em relação as lâmpadas, há um espaço de cerca de 20 mm entre as juntas e, no suporte, podem ser posicionadas 20 juntas por vez. Com a finalidade de acelerar a etapa de degradação UV da pesquisa, foram produzidas 2 câmaras como a descrita nesta seção. Deste modo, simultaneamente, foi possível degradar 40 juntas.

Visto que essas lâmpadas têm potencial de aquecimento, a temperatura da câmara foi verificada durante seu funcionamento. Utilizou-se um termopar para medição da temperatura. Deve se destacar que a temperatura aferida sofre pequenas variações em função das temperaturas ambientes do dia. A temperatura média observada foi de cerca de 60°C.



(a) (b)

Figura 16 - Suporte de posicionamento das juntas no interior da câmara: (a) disposição das juntas no suporte e (b) suporte com juntas dentro da câmara.

4.5. Degradações

Foi proposto simular, experimentalmente, degradação ambiental das juntas adesivas produzidas. Para tal, são consideradas as seguintes condições impostas: incidência de radiação UV por diferentes tempos de exposição e imersão em água destilada e em água salgada, sendo essas imersões avaliadas nas temperaturas de 4 °C, ambiente e 40 °C. Além da degradação individual de cada fator ambiental simulado, também serão combinados, com a finalidade de observar as alterações provocadas pelo UV na forma como os outros agentes de degradação têm seus efeitos alterados. Para ter uma análise mais próxima da realidade, as juntas também foram degradadas com exposição em ambiente externo, onde se tem radiação UV proveniente do Sol, além de chuva, variação de umidade e de temperatura. Destaca-se que algumas degradações realizadas para a junta também serão realizadas para o material compósito.

Nas próximas seções serão discutidas, em detalhes, a metodologia adotada em cada procedimento de degradação proposto e a forma como se procedeu a interação entre os elementos degradantes.

4.5.1. Ultravioleta

A exposição à radiação UV foi realizada utilizando a câmara UV descrita na seção 4.4. A metodologia de degradação seguiu a ASTM D-904 (1999), usando o

método A, que usa lâmpadas fluorescentes, e o ciclo II de degradação, em que a exposição ocorre de maneira contínua e alta umidade não é adotada.

Nos trabalhos de Alderucci *et al.* (2019) e Giampaoli *et al.* (2017) foram utilizadas 1000 h de exposição UV continua. Já no trabalho de Channareddy *et al.* (2019) formam usadas 2160 h de exposição alternando 4 h sobre radiação UV e 4h no escuro com condensação, isso quer dizer que foram usadas 1080 h em radiação UV. Barbosa *et al.* (2017) também usaram 2160 h de degradação de compósitos reforçados com fibra de carbono, porém alternando 8 h sob radiação UV e 4 h em condensação contínua, o que corresponde a 1440 h de exposição à radiação UV. Já Nguyen *et al.* (2012) expuseram suas juntas duplas e o material dos aderentes (compósito reforçado com fibra de carbono) e o adesivo epóxi por 124 h, 248 h e 372 h à radiação UV + temperatura de 40 °C. Além disso, os pesquisadores destacaram que a exposição à radiação UV (com total de emissão por hora de 508 kJ/m²) por 371 h é equivalente a degradar o material por 1 ano na Austrália.

Tendo em vista que esses trabalhos degradaram por tempos entorno de 1000 h de exposição UV, buscou-se degradar as juntas por períodos mais longos de exposição contínua à radiação UV e avaliar as alterações provocadas ao longo do tempo, a fim de descrever o perfil da degradação UV das juntas em função do tempo de exposição. Foram usados os tempos de 720 h (30 dias), 1440 h (60 dias), 2160 h (90 dias), 2880 h (120 dias) e 4320 h (180 dias). Serão usados 3 corpos de provas (CPs) para cada condição, sendo necessários 15 CPs.

4.5.2. Degradação hidrotérmica: Imersão em água salgada e destilada

Como já destacado, a ação hidrotérmica tem efeito mais agressivo em juntas dissimilares. Além disso, a presença de sais na água altera a forma como ela interage com os materiais. Nesse trabalho, um dos aderentes da junta é de aço, que tem sua degradação intensificada pela presença de NaCl da água salgada. Como a temperatura em que a imersão ocorre altera a forma com a água é absorvida, é proposto degradar as juntas aço/GFRP por imersão contínua nas temperaturas de 4 °C, temperatura ambiente e 40 °C. As duas primeiras são as temperaturas aproximadas do fundo do mar e do ambiente, respectivamente, enquanto a última é uma temperatura elevada que favorece o processo de difusão e degradação.

Giampaoli *et al.* (2017) degradaram juntas aço/GFRP com condensação contínua em 40 °C por 6 meses (180 dias). Já Souza *et al.* (2019) estudaram juntas simples de GFRP coladas com adesivo epóxi estrutural em diversas condições, avaliando os resultados ao longo do tempo. Os autores notaram que os resultados em condensação contínua são semelhantes aos obtidos em imersão, sendo os resultados também similares aos encontrados por Giampaoli *et al*. (2017). Além disso, a maior parte das degradações por eles realizadas gerou mudanças significativas até os primeiros 120 dias. Assim, nesta tese, as juntas serão degradas por imersão por um período de 90 dias, visto que esse período já é o suficiente para verificar alguma degradação, sendo possível comparar a influência das diferentes temperaturas de imersão na degradação das juntas.

A degradação das juntas é realizada seguindo a norma ASTM D570 (2010). A água salgada é obtida adicionado 5% em peso de NaCl na água destilada, conforme ASTM D 1141 (2008). Esse procedimento foi também realizado por Souza *et al*. (2019) e Hesmati *et al*. (2017). Em cada condição são avaliados 3 corpos de prova e, como serão analisadas mecanicamente dois meios de imersão e 3 temperaturas, são necessários 18 CPs de juntas.

As amostras foram imersas totalmente em recipientes fechados, conforme observado na Figura 17, em que se tem os recipientes para amostras imersas dentro de uma estufa, que foi usada para manter a temperatura em aproximadamente 40°C, e amostras na temperatura ambiente.



(a) (b)

Figura 17 – Juntas imersas em água nos ambientes de (a) 40°C e (b) temperatura ambiente.

As amostras de 4 °C foram mantidas em uma geladeira doméstica, cuja temperatura varia entre 4 e 4,5 °C, temperatura medida com auxílio de um termopar. As amostras da temperatura ambiente foram mantidas no ambiente natural, em que também há variação da temperatura, conforme a variação da temperatura ao longo do dia e das estações. Em função do não controle da temperatura ambiente entorno de 25 °C, esta temperatura é referida ao longo do texto como temperatura ambiente.

Cada CP teve sua massa seca medida antes da imersão. A massa úmida foi mensurada a cada dia no início da imersão, depois as medições foram espaçadas para cada 7 dias, chegando a no máximo intervalos de 14 dias. Com isso, foi obtido o perfil de absorção de água em função do tempo para cada condição. A medida da massa é realizada usando a balança de precisão (Ohaus, Estados Unidos) disponível no laboratório. Com esses dados, a porcentagem de massa de água absorvida é calculada pela Eq. (2).

$$M(\%) = \frac{Massa\ final - Massa\ inicial}{Massa\ inicial}.100 \quad (2)$$

onde a massa inicial é a massa seca do corpo de prova, que foi mantido em 60 °C por 1 h antes de ter a sua massa seca aferida, e a massa final é a massa úmida medida, periodicamente, durante a imersão, conforme o tempo de degradação.

4.5.3. Ação combinada das degradações provocadas pela radiação UV e pela imersão em água

Buscando compreender como a degradação por raios UV interage com a degradação hidrotérmica, propõe-se a combinação da exposição à radiação UV com a imersão em água. As juntas serão degradas com radiação UV, continuamente, por 60 dias. Esse tempo é maior do que o comumente adotado nos trabalhos em que foram combinados UV com condensação contínua (ALDERUCCI *et al.*, 2019; GIAMPAOLI *et al.*, 2017; CHENNAREDDY *et al.*, 2019). Adicionalmente, é um dos tempos avaliados na degradação UV individual nesta tese. Depois, serão mantidas por mais 90 dias em

imersão em água destilada e em água salgada nas temperaturas de 4 °C, ambiente e 40 °C. Cada condição contará com 3 CPs, totalizando 18 CPs.

De modo semelhante ao realizado nas juntas degradadas apenas com água, as juntas degradadas pela ação combinada também terão suas massas úmidas e seca aferidas.

4.5.4. Exposição externa

Mesmo simulando artificialmente diferentes cenários de degradação, o ambiente não é previsível e monótono. Assim, uma forma de prever e compreender o comportamento das juntas em serviço é degradando-as com exposição externa natural, onde há diversos fatores que podem degradar as juntas, como variação de umidade, de temperatura e radiação UV, por exemplo.

Tendo em vista esta observação, é proposto expor as juntas ao ambiente externo por 1 ano. As juntas, com intervalos distintos de tempos de exposição, serão testadas por cisalhamento. Os tempos de exposição avaliados são de 30, 60, 90, 120, 180, 270 e 365 dias. Cada análise contempla 3 juntas, então, serão expostos 21 CPs. A degradação iniciou-se em fevereiro de 2022 e terminou em fevereiro de 2023, quando alcançou-se 365 dias de degradação.

As juntas foram expostas na cidade de Niterói-RJ, (22°54'24.8"S 43°07'59.5"W), na região marcada no mapa da Figura 18. Ainda nessa figura, destaca-se a forma como as juntas foram posicionadas sobre o telhado de uma construção localizada próxima à praia, dentro do *campus* da UFF (Universidade Federal Fluminense). Nesta exposição, as juntas estarão sujeitas a chuva, mudança de temperatura e umidade, exposição solar e maresia devido à proximidade ao mar.



Figura 18 - Juntas expostas no ambiente externo.

Como o clima varia de região para região e ao logo do tempo, as informações meteorológicas de temperatura máxima e mínima, umidade relativa, precipitação e irradiação solar foram coletadas da estação meteorológica automática da cidade de Niterói. Os dados são disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A fim de reiterar todas as degradações que as juntas foram sujeitas, na Tabela 5, tem-se as condições propostas nesta tese, os tempos de exposição e a quantidade de corpos de prova que serão avaliados para cada condição. Destaca-se que serão necessários 75 CPs das juntas para atender a todas as condições de degradação citadas anteriormente e contemplar o ensaio mecânico de cisalhamento.

Tabela 5 - Tipo de degradação, tempos de exposição e número de amostras.

Condição	Característica da exposição	Nº de CPS (cisalhamento)
Sem degradação	-	3
UV	30, 60, 90, 120 e 180 dias	5x3=15
Ambiente externo	30, 60, 90, 120, 180, 270 e 365 dias	7x3=21
90 dias imerso em água salgada	4°C, ambiente e 40 °C	3x3=9
60 dias de UV + 90 dias imerso em água salgada	4°C, ambiente e 40 °C	3x3=9
90 dias imerso em água destilada	4°C, ambiente e 40 °C	3x3=9
60 dias de UV + 90 dias imerso em água destilada	4°C, ambiente e 40 °C	3x3=9
		Total: 75

4.6. Degradação do aderente compósito

Paralelamente à degradação das juntas, também será realizada a degradação do aderente compósito. Ou seja, o compósito também será avaliado mecanicamente depois de degradado por exposição UV, imersão em água e combinação UV com imersão. O compósito será degradado conforme os tópicos a seguir.

- Radiação UV pelos períodos de 30, 60, 90, 120 e 180 dias.
- Imersão em água destilada nas temperaturas de 4 °C, ambiente e 40 °C por 90 dias.
- Imersão em água salgada nas temperaturas de 4 °C, ambiente e 40 °C por 90 dias.
- 60 dias de radiação UV + 90 dias de imersão em água destilada nas temperaturas de 4 °C, ambiente e 40 °C.
- 60 dias de radiação UV + 90 dias de imersão em água salgada nas temperaturas de 4 °C, ambiente e 40 °C.

Na degradação por imersão em água, o compósito também terá suas massas seca e úmida avaliadas do mesmo modo descrito para a análise de massa da junta. Após essas degradações, o compósito será testado mecanicamente por tração e flexão.

No total, são consideradas 15 condições de degradação, além da condição não degradada. Considerando que, segundo as normas dos ensaios mecânicos, são necessários 3 CPs para cada condição, ao todo serão necessários 48 CPs para tração e mais 48 CPs para flexão.

Através das degradações propostas para o compósito, busca-se verificar, não só a mudança de comportamento mecânico ao longo do tempo causada pela radiação UV, como também a influência da radiação UV no processo de degradação provocado pela imersão em água.

Vale destacar que as amostras de adesivo também foram imersas nessas condições que o compósito foi degradado, a fim de verificar o ganho de massa deste material. Foi usado uma amostra do mesmo tamanho da usada para a Análise Dinâmico Mecânica (DMA), que será descrita à frente.

4.7. Caracterizações

Com a finalidade de avaliar as alterações provocadas pelas degradações, a junta, o compósito e o adesivo serão caracterizados antes da degradação e após cada período de exposição proposto.

O adesivo será caraterizado por Análise Dinâmico Mecânica (DMA), o compósito terá seu comportamento avaliado por tração e flexão e as juntas serão avaliadas mecanicamente por meio de teste de cisalhamento.

Adicionalmente serão realizadas análises de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e Análise termogravimétrica (TGA) nas resinas, além de microscopia ótica na superfície do compósito e em regiões de falha.

4.7.1. Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) do adesivo e do compósito não envelhecidos e envelhecidos foi realizada usando um FTIR, modelo PerkinElmer Frontier. As amostras para cada condição foram analisadas no modo *Atenuated Total Reflectance* (ATR). As condições de análise foram na faixa de 700 e 4000 cm^{-1} e resolução de 4 cm^{-1} e 256 varreduras

Deve-se mencionar que as amostras de adesivo foram removidas da parte externa da junta, ou seja, região exposta diretamente à radiação UV. Além disso, as amostras foram transformadas em pó com o auxílio de um gral de porcelana. As amostras em pó também foram usadas para análise termogravimétrica.

Apenas as amostras degradadas com UV tiveram o seu adesivo e compósito avaliados por FTIR. Já as mostras do ambiente externo apenas o compósito. As amostras em imersão não foram avaliadas por FTIR, visto que, na utilização desta análise, a utilização do FTIR buscou evidenciar a fotodegradação dos polímeros das resinas usadas nos materiais.

4.7.2. Análise termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada em todos os tempos de exposição para determinar a estabilidade térmica do adesivo e do compósito devido à exposição UV usando o *Simultaneous Thermal Analyzer*, modelo STA 6000 (PerkinElmer, EUA). As varreduras foram realizadas em atmosfera de nitrogênio, com uma taxa de aquecimento de 5 °C/min de 30 a 650 °C. As amostras de adesivo foram retiradas das juntas degradadas, removendo o adesivo que ficou nas bordas. Esse material foi moído em um cadinho para a realização da análise.

4.7.3. Análise Dinâmico Mecânica (DMA) do adesivo

A análise térmica do adesivo exposto ao UV e ao ambiente externo foi avaliada por DMA, utilizando o equipamento DMA 242D (Netzsch, Alemanha), seguindo as

recomendações da norma ASTM D7028 (2007). Adotou-se uma frequência de 1 Hz e uma taxa de aquecimento de 5 °C/min, partindo da temperatura ambiente e chegando até 200 °C, utilizando atmosfera de nitrogênio.

Para o ensaio de DMA (*Dynamic Mechanical Analysis*), foram feitas placas planas do adesivo, que foram produzidas espalhando o adesivo em placas de aço. O adesivo foi pressionado entre as placas com auxílio de uma prensa hidráulica aplicando uma carga de 2 ton, o suficiente para espalhar o adesivo e remover bolhas. Para o controle da espessura, foi usado um batente que garantisse a espessura de 2 mm.

Depois de curados, os corpos de prova para os testes de DMA foram cortados com as dimensões aproximadas de 10 mm de largura e 50 mm de comprimento, obtendo um CP conforme o apresentado na Figura 19. Foram testados 3 CPs para cada condição, assim, foram necessários 15 CPs para as condições sem degradar, com 30, 60, 90, 120 e 180 dias de exposição à radiação UV, mais 21 CPs para a condição de exposição ao ambiente externo, sendo 7 tempos de exposição externa adotados.

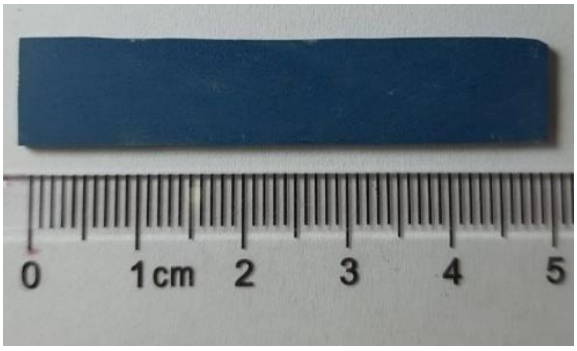


Figura 19 - Corpo de prova do teste de DMA.

4.7.4. Ensaio de tração do compósito

Os compósitos foram testados em tração de acordo com a norma ASTM D3039 (2014), na máquina universal de ensaios (Shimadzu, Japão), modelo Servo Pulser, adotando a velocidade de deslocamento de 2 mm/min. A configuração do teste na máquina de ensaios pode ser observada e mais bem compreendida na Figura 20. As dimensões dos CPs foram 25 mm de largura, 3,8 mm de espessura e 220 mm de comprimento, sendo Lo igual a 158 mm. Foram testados 3 CPs para cada condição.

A tensão de ruptura à tração (σ_t), em MPa, é obtida por meio do cálculo da Eq. (3), em que F_r é a força em N aplicada no momento da fratura e *A* é a área da seção transversal do corpo de prova em mm².

$$\sigma_t = \frac{F_r}{A} \tag{3}$$

A deformação máxima de tração (ε_t) pode ser obtida pela razão entre o deslocamento alcançado no instante da ruptura (ΔL) pelo comprimento inicial (L_o), ou seja, o espaço entre as garras de fixação.

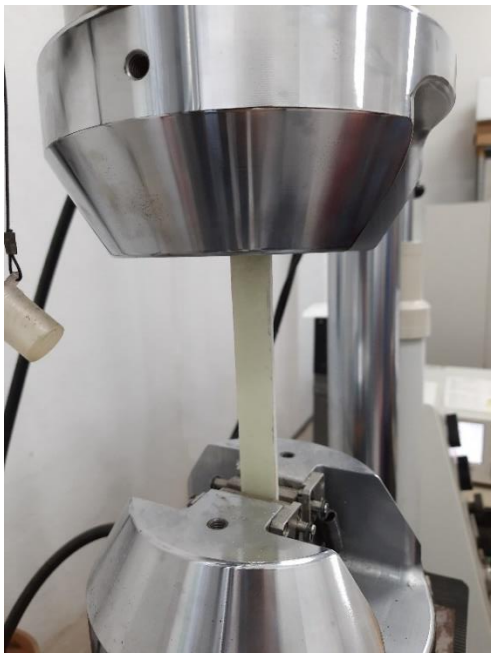


Figura 20 - Ensaio de tração do compósito.

Da curva tensão por deformação, pode-se determinar o módulo de elasticidade (E) do material, através da razão entre a variação de tensão ($\Delta\sigma$) e a variação da deformação ($\Delta\varepsilon$), conforme a Eq. 4.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \tag{4}$$

O intervalo de deformação escolhido, para o cálculo do módulo de elasticidade, deve seguir as recomendações da norma, ASTM D3039 (2014), que deve ser entre 0,001 e 0,003 para materiais em que a falha ocorre em deformações acima de 0,006.

4.7.5. Ensaio de flexão do compósito

O compósito reforçado com fibra de vidro também teve seu comportamento mecânico avaliado por flexão em 3 pontos**,** conforme a ASTM D790 (2003). Segundo essa norma, para amostras com a espessura do compósito desta tese, deve ser adotado um vão de espaçamento dos apoios de 16 vezes a espessura da amostra. A largura da amostra também não deve passar de 25% do valor do espaçamento. Assim, considerando a espessura do compósito, que é de 4,0 mm aproximadamente, deve ser adotado um espaçamento de 64 mm. Para a largura optou-se por ½ pol, ou seja, 12,7 mm, valor que não ultrapassa 25% de 64 mm. Destaca-se que o comprimento da amostra deve ser maior que o espaçamento, o suficiente para evitar a amostra não caia do apoio durante o ensaio. Então, será adotado 100 mm para o comprimento da amostra. Na Figura 21, tem-se as dimensões do corpo de prova para flexão e a distância entre os apoios.

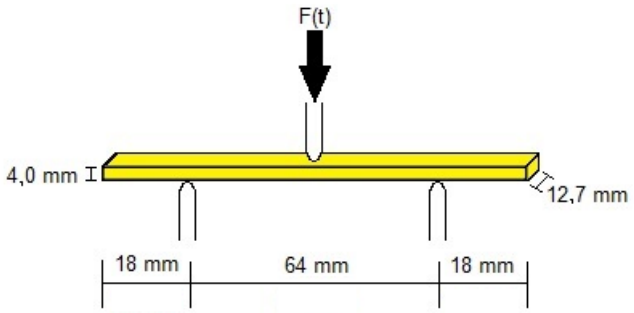


Figura 21 - Configuração do CP do ensaio de flexão do compósito.

A taxa de deslocamento do apoio central (R) no ensaio é calculada pela Eq. 5.

$$R = ZL^2/6d \tag{5}$$

onde *L* é o espaçamento entre os apoios, *d* é a espessura do compósito, ambos dados em mm, *Z* é a taxa de deformação da fibra externa, que segundo a norma deve ser de 0,01 mm/mm/min.

Pela Eq. (5), tem-se que a taxa de deslocamento aplicada no ensaio é de, aproximadamente, 1,6 mm/min.

A tensão de ruptura à flexão (σ_f), em MPa, é obtida por meio do cálculo da Eq. (6).

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bh^2} \tag{6}$$

Em que, a carga no instante da ruptura, *P*, é utilizada em N. Já a distância entre os apoios do corpo de prova (*L*), a largura da seção do corpo de prova (*b*) e a altura da seção do corpo de prova (*h*) são usados em mm.

A deformação de flexão na tensão máxima ε_f é obtida pela equação (7):

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \tag{7}$$

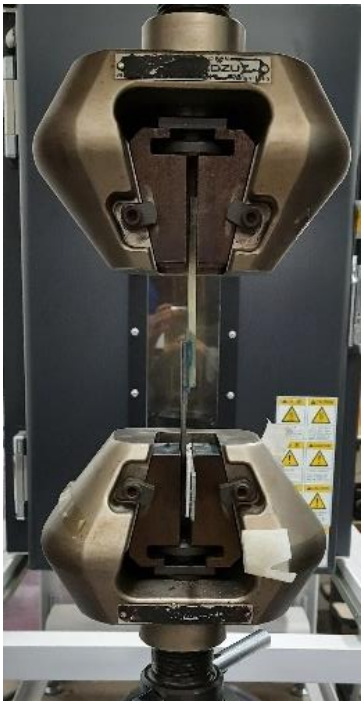
Onde *L* é o comprimento do espaço entre os apoios, *D* é o deslocamento no momento da máxima tensão, *d* é a espessura do corpo de prova. Todas essas variáveis apresentam a mesma unidade de comprimento, mm.

4.7.6. Ensaio de cisalhamento das juntas

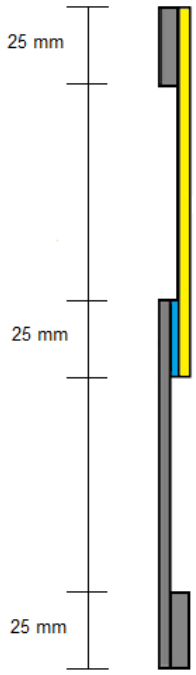
O teste de cisalhamento das juntas seguiu a norma ASTM D5868 (2014), indicada para juntas com aderentes compósitos, e a norma ASTM D1002 (2010), indicada para juntas de aderentes metálicos. O teste foi realizado usando a máquina de ensaios universal (Shimadzu, Japão), modelo AG-X. Foi adotada a taxa de carregamento de 1,3 mm/min.

Na Figura 22(a), tem-se uma junta posicionada na máquina para o teste de cisalhamento. Foram utilizados batentes para alinhar a junta na máquina, sendo presos

na máquina 25 mm de comprimento de cada um dos aderentes. Um esquema, com a configuração e as medidas destes batentes nas juntas, é apresentado na Figura 22(b).



(a)



(b)

Figura 22 - Configuração da máquina de ensaio de teste de cisalhamento em (a) e das juntas coladas para o ensaio em (b).

4.7.7. Microscopia Ótica

Análises superficiais dos compósitos e das regiões de falha das juntas foram realizadas com auxílio de microscopias. Estas foram realizadas no microscópio ótico Olympus, modelo BX60MF adotando ampliações de 200 vezes.

Os modos de falha das juntas foram avaliados por imagens fotográficas e a microscopia foi adotada para detectar uma eventual presença de corrosão pontual. Além da observação dos modos de falha, as mudanças visuais de cor dos polímeros, em especial nos compósitos, foram registradas por fotografias, sendo que esta mudança de cor é um indicador de foto-oxidação (PANCHAL, 2019).

5. Resultados e discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos. Como são tratadas muitas análises, os resultados foram divididos de acordo com as degradações propostas. Assim, há uma seção que trata dos resultados obtidos para a exposição à radiação UV artificial, uma para a exposição externa e uma para a degradação combinada do UV com diferentes tipos de imersão.

5.1. Degradação UV artificial

Nesta seção tem-se os resultados do estudo da degradação UV sobre as juntas aço/GFRP e de seus componentes. Assim, ela está subdividida nas seções 5.1.1, 5.1.2 e 5.1.3 que descrevem a caracterização do compósito, da junta e do adesivo, respectivamente, que foram degradados com radiação UV por meio da câmara de envelhecimento acelerado.

5.1.1. Compósito degradado com UV

O compósito degrado com radiação UV foi caracterizado por meio dos testes mecânicos de tração e flexão. Alterações físicas foram avaliadas por imagens e microscopia ótica. FTIR e análises termogravimétricas também foram realizadas. Nas próximas subseções, os resultados destas análises serão discutidos e comparados.

5.1.1.1. Teste de tração e flexão do compósito

Os dados obtidos do ensaio de tração do compósito não degradado e dos expostos à radiação UV são apresentados na Tabela 6. O limite de resistência à tração, depois dos compósitos expostos à radiação UV, foi reduzido em todos os tempos de exposição em relação à condição não degradada. Houve uma pequena redução de cerca de 3,4% após 30 dias, alcançando 18,7% em 90 dias de exposição. A partir de 90 dias observa-se que a queda de resistência à tração foi menor, com reduções de 12,5%

e 10,4% para os tempos de 120 e 180 dias de exposição, respectivamente. No entanto, nesses tempos de degradação, os desvios entre as amostras foram os mais elevados de todos os tempos. Apesar dos desvios, observa-se uma tendência de melhoria na resistência à tração. Esta melhoria pode estar associada ao fato de que a degradação causada pela exposição à radiação UV, que provoca a quebra das cadeias poliméricas, (SHOKRIEH; BAYAT, 2007) e a foto-oxidação (BAZLI *et al.*, 2020), fatos que estão relacionados a redução de resistência, atinge seus limites de degradação. Belec *et al.* (2015) observaram que a taxa de degradação do seu material diminui com o tempo da degradação, atingindo uma taxa crítica. Paralelamente as degradações que reduzem a resistência, provavelmente ocorre pós-cura, devido à alta temperatura da câmara. A pós-cura proporciona aumento das reticulações, o que favorece o aumento da resistência do compósito. Assim, após 120 dias, observa-se uma melhora na resistência à tração, à medida que os efeitos da degradação atingem sua taxa crítica, sendo então superados pelos efeitos da pós-cura.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas de tração.

Tempo de exposição à radiação UV	Máxima tensão de tração (MPa)	Máxima deformação (mm/mm)	Módulo de elasticidade E_t (GPa)
Sem degradar	270,58 ± 2,09	0,0219 ± 0,0008	16,62 ± 0,13
30 dias	261,40 ± 2,70	0,0206 ± 0,0005	16,75 ± 0,07
60 dias	235,24 ± 5,69	0,0226 ± 3,874E-05	14,35 ± 0,15
90 dias	219,97 ± 3,11	0,0205 ± 0,0005	14,14 ± 0,03
120 dias	236,77 ± 14,54	0,0195 ± 0,0009	16,09 ± 0,53
180 dias	242,48 ± 19,88	0,0212 ± 0,0014	15,34 ± 0,35

Diversos outros autores, que estudaram os efeitos da degradação UV na resistência à tração de compósitos, observaram uma redução da resistência do compósito com a degradação UV. Algumas das pesquisas desses autores são listadas na Tabela 7, em que se tem o tipo de material, a condição de exposição à radiação UV e o percentual de redução da resistência à tração. Comparando os dados da Tabela 7 com os da Tabela 6 pode-se destacar que o compósito deste trabalho apresentou queda na resistência à tração assim como os demais trabalhos. Por exemplo, no estudo de Chennareddy et al. (CHENNAREDDY *et al.*, 2019) que reflete de perto as condições de

degradação empregadas neste artigo, envolvendo exposição UV intensificada sem a presença de outros agentes de degradação, houve uma redução de 10% na resistência à tração dos compósitos após 576 horas de exposição UV. Em contrapartida, conforme indicado na Tabela 1, após 30 dias, equivalente a 720 horas, a redução na resistência à tração do compósito desta tese foi de apenas 3,4%. Isto sugere que mesmo quando não estão presentes outros agentes de degradação intensificada, o compósito nesta tese apresenta boa resistência à degradação por UV.

Tabela 7: Comparação entre o resultado do teste de tração do presente estudo e pesquisas semelhantes.

Compósito	Condição de exposição	Resultado	Referência
GFRP laminado com matriz epóxi	720h (30 dias), 1440h (60 dias), 2160h (90 dias), 2880h (120 dias) e 4320h (180 dias)	Redução máxima de 18,7% em 90 dias de exposição	Este trabalho
GFRP com matriz epóxi	Umidade, 40°C/80°C e ciclos de UV (2100h)	Redução de 21% após 2100 h de degradação	DOGAN; ARMAN; OZDEMIR, 2018
GFRP pultrudado com matriz vinil éster com diferentes perfis	3000 h de UV e ciclos de umidade	Redução de 27.4% e 26para os dois perfis estudados	BAZLI *et al.*, 2020
Flax fabric com matriz epóxi	500 h, 1000 h e 1500 h em UV e ciclos de spray de água	Reduções de 19% em 500 h, 33% em 1000h, 39% após 1500h de exposição	YAN; CHOUW; KRISHNAN, 2015
GFRP com matrix epóxi	Ciclos em UV e no escuro em 51°C (576 h no UV)	Redução de 10%	CHENNAREDDY *et al.*, 2019
GFRP com matrix epóxi	Ciclos de UV em 40°C e no escuro em 70°C, ambos comh 70% de umidade	Redução de 27%	DOGAN; ARMAN, 2019

Na Figura 23, tem-se as curvas tensão e deformação de tração de uma amostra de cada condição de degradação proposta. De uma forma geral, observa-se que as curvas tensão e deformação apresentadas descrevem um comportamento similar entre as amostras com e sem degradação UV. Todavia, pela Tabela 6, comparando os resultados das amostras sem degradar e das degradadas por 120 dias de exposição, condição de menor deformação máxima, obteve-se uma redução de 11% em relação à

média das amostras não degradadas. Logo, apesar do perfil das curvas serem similares, há uma tendência de redução das deformações máximas obtidas com tempos maiores de exposição ao UV. A redução da deformação com a degradação UV é um comportamento esperado, como já evidenciado por vários pesquisadores que estudaram a resistência à tração de GFRP expostos a UV (DOĞAN; ARMAN, 2018).

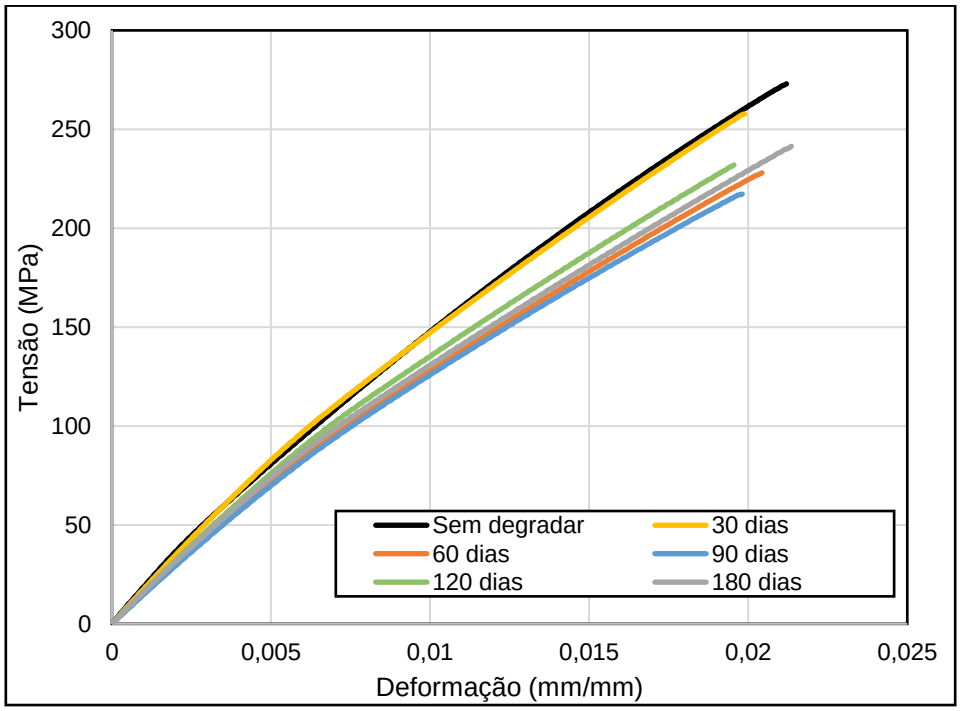


Figura 23 - Curvas tensão e deformação de tração dos compósitos não degradados e degradados por 30, 60, 90, 120 e 180 dias de exposição ao UV.

Em relação aos módulos de elasticidade em tração (E_t), o compósito sem degradar apresenta E_t de 16,62 GPa em média, havendo alteração pouco significativa após 30 dias de degradação, um aumento médio menor que 1%. Mas em 60 e 90 dias de exposição há reduções de rigidez de 13,7 e 14,9%, respectivamente, voltando a registrar aumento do E_t nos tempos de exposição maiores, mas ainda assim apresentando valores menores que a condição sem degradar. Essa melhora nos valores de rigidez nos maiores tempos de degradação é coerente com o aumento observado para o limite de resistência à tração nos 2 últimos tempos de degradação. Deve-se destacar que o módulo de elasticidade dos compósitos é bastante influenciado pelo módulo de elasticidade das fibras (NGUYEN *et al.*, 2012 BAZLI *et al.*, 2020), sendo muitas vezes não significativamente alterado pela degradação UV, visto que esse fator

age superficialmente sobre o material, degradando primeiramente a resina, não alcançando as fibras na maioria dos tempos de exposição. Outros pesquisadores mostram que as fibras são menos afetadas pela degradação do que a resina (DOGAN; ARMAN, 2019). Como a maior parte das propriedades mecânicas do compósito estão associadas às fibras (KHAN *et al.*, 2021), há uma pequena redução no módulo de elasticidade. Assim, a redução observada no módulo de elasticidade pode estar associada à degradação da resina e à interação fibra-resina (LOHANI, 2021). Além da degradação UV, há também um aumento na temperatura do meio da câmara UV, que ficou em torno de 60 °C, esse aumento pode ter contribuído para a degradação da resina e sua interação com a fibra. Outros pesquisadores também relatam redução nas propriedades mecânicas de compósitos que foram degradados em ambientes com alta temperatura, em função da degradação gerada na interação fibra-resina (LIU *et al.*, 2020; GUERMAZI *et al.*, 2016; ELLYIN; MASER, 2004).

Na Figura 24 tem-se as micrografias da superfície do compósito sem degradar em (a) e degradadas por 60, 120 e 180 dias nas figuras (b), (c) e (d), respectivamente. Como destacado, nos maiores tempos de exposição observa-se a exposição das fibras, fato que começa a ser evidenciado em 60 dias, sendo mais claramente observada em 180 dias de exposição. A exposição das fibras é resultado da degradação da resina pela radiação UV que tem capacidade de provocar a sua perda de massa. Neste trabalho, foram usadas 22 camadas de fibra de vidro, assim, a exposição das fibras ocorreu apenas na camada da superfície. Apesar dessa exposição, as alterações observadas no módulo de elasticidade devem ter influência de outros fatores, como a elevação da temperatura (KORKMAZ; GÜLTEKIN, 2022). Esta pode provocar o surgimento de microfissuras no interior da peça devido a dilatação provocada pelo aquecimento das amostras, que também pode alterar o módulo de elasticidade (E_t) visto que pode modificar a interação matriz-fibra (LIU; LIU; FENG, 2020). Ainda na Figura 24, também pode ser observado o surgimento de micro trincas na superfície. Esse fato também colabora para a redução da resistência à tração e do módulo de elasticidade.

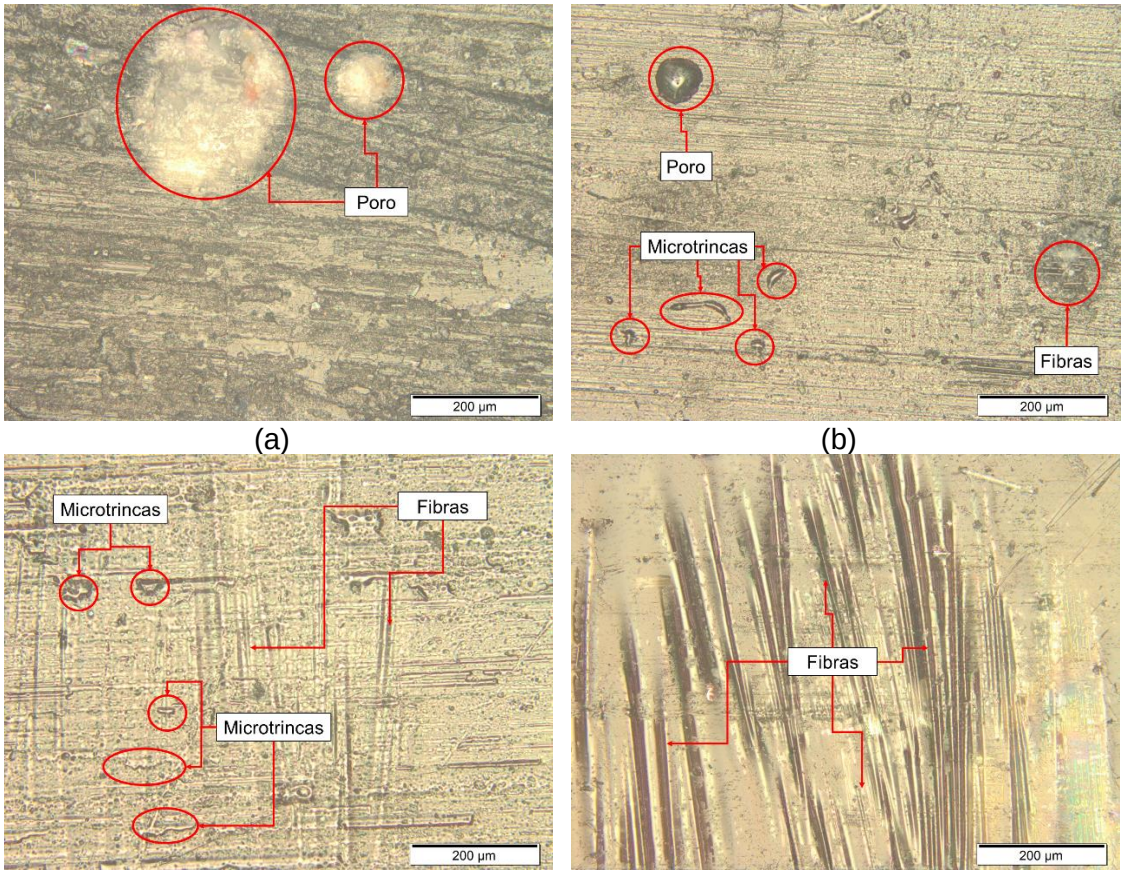


Figura 24 - Micrografias da superfície externa dos compósitos (a) sem degradar, (b) com 60, (c) 120 e (d) 180 dias de exposição ao UV ampliadas em 200 vezes.

Na Tabela 8, tem-se os resultados do teste de flexão em 3 pontos do compósito. Nela, são apresentados a tensão de flexão máxima suportada, a deformação obtida na tensão máxima e o módulo de flexão (E_f). Diferentemente do observado para a resistência à tração, de maneira geral, com o tempo de exposição foi observada uma melhora na resistência à flexão, em relação à condição não degradada. Após 30 dias, foi obtido o maior aumento, 54,1%, sendo este aumento reflexo dos efeitos de pós-cura proporcionados pela exposição UV. A partir de 60 dias, apesar de os resultados em média serem maiores que os do compósito não degradado, há um comportamento de redução da resistência em relação ao compósito exposto por 30 dias, sendo, em 180 dias, 22,9% menor, mas ainda 18,9% maior que a resistência do compósito sem degradar. Nesse caso, os efeitos de degradação da resina, que ocorrem paralelamente, começam a superar os efeitos da pós-cura, resultando na redução da resistência. Esse comportamento de redução da resistência com a degradação UV também é

similarmente observado na literatura em estudos com compósitos GFRP com matriz epóxi (YAN; CHOUW; KRISHNAN, 2015; ASHRAFI *et al.*, 2018; SOUSA; CORREIA; CABRAL-FONSECA, 2016). Khotbehsara *et al.* (2021), inicialmente observaram redução da resistência à flexão, mas obtiveram melhora na resistência em tempos maiores de exposição à radiação UV. Eles destacam que a temperatura de 60 °C, que é associada ao UV dentro da câmara de envelhecimento acelerado, favorece o aumento de resistência à flexão.

Tabela 8 – Propriedades mecânicas de flexão do compósito

Tempo de exposição à radiação UV	Máxima tensão de flexão (MPa)	Deformação (mm/mm)	Módulo de elasticidade em Flexão – E_f (GPa)
Sem degradar	242,20 ± 16,02	0,0186 ± 0,0011	15,44 ± 0,12
30 dias	373,35 ± 14,34	0,0241 ± 0,0013	18,03 ± 0,932
60 dias	362,52 ± 4,93	0,0252 ± 0,0010	16,66 ± 0,70
90 dias	336,36 ± 16,68	0,0244 ± 0,0014	15,78 ± 0,21
120 dias	315,95 ± 19,08	0,0228 ± 0,0047	13,69 ± 1,28
180 dias	288,01 ± 46,22	0,0248 ± 0,0007	13,34 ± 1,68

Na Figura 25, tem-se as curvas tensão e deformação de flexão de uma amostra de cada condição, em que se pode observar que a deformação máxima alcançada até a falha aumenta com o tempo de exposição à radiação UV, fato que numericamente também é destacado na Tabela 8, observando um aumento de 36% em 120 dias de exposição. De semelhante modo, o módulo de elasticidade de flexão apresenta o maior aumento com 30 dias de exposição seguido de reduções, alcançado o valor de 13,34 GPa para 180 dias de exposição, valor que é 13,6% menor que o sem degradar. Cabe destacar que os 2 últimos tempos de degradação foram os que apresentaram a maior dispersão nos resultados, fato que também ocorreu nos resultados de tração. Isso mostra que os efeitos da radiação a longo prazo não são uniformes sobre o material.

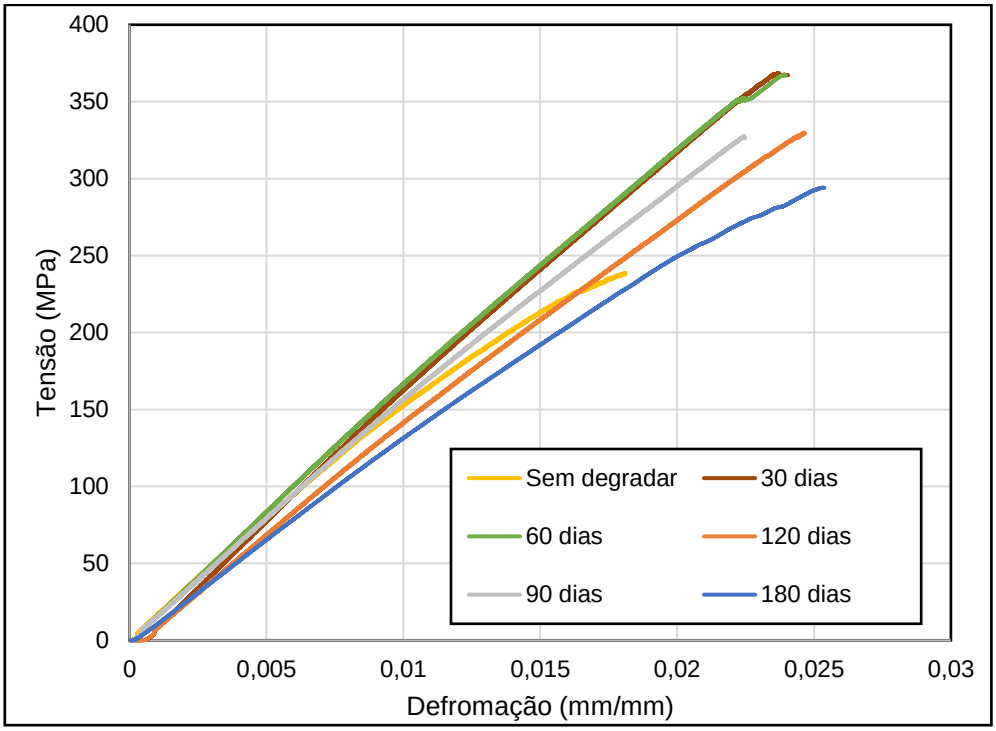


Figura 25 – Curvas tensão e deformação de flexão dos compósitos não degradados e degradados por 30, 60, 90, 120 e 180 dias de exposição.

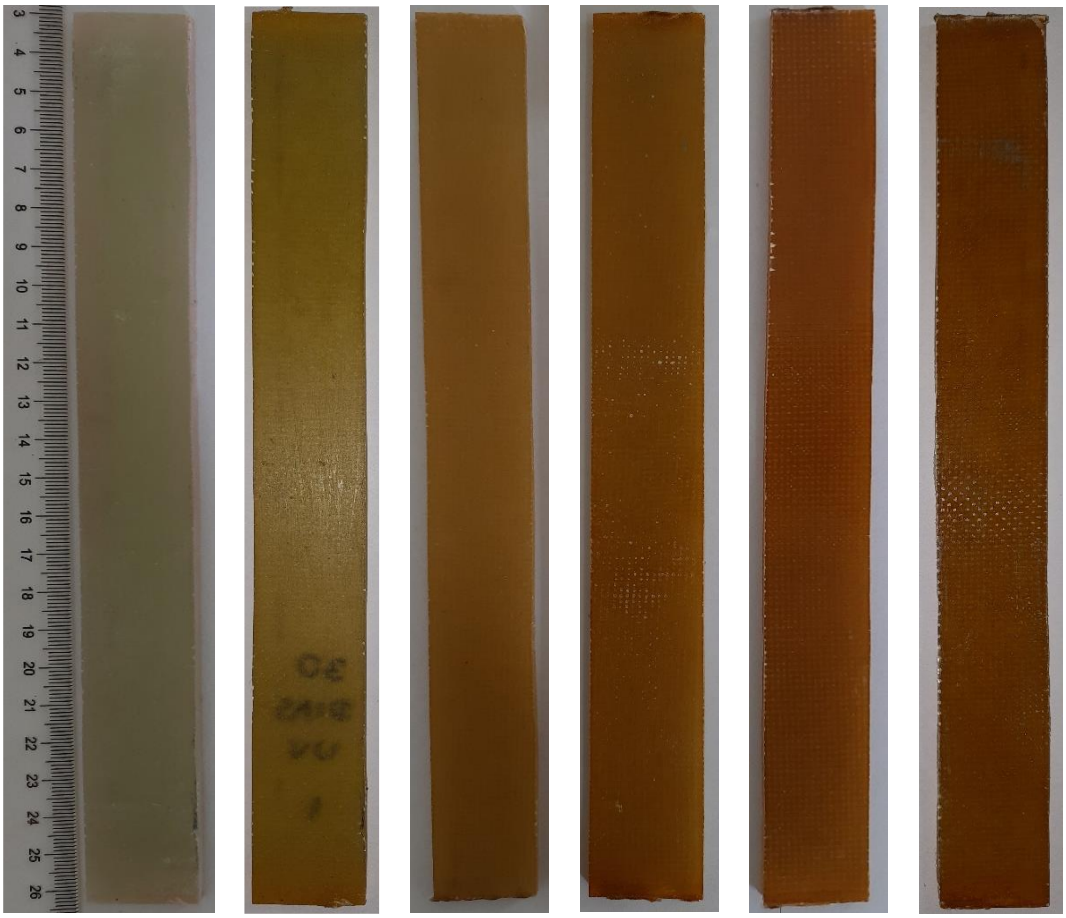
Os efeitos superficiais da degradação são mais influentes na resistência à flexão (SOUSA; CORREIA; CABRAL-FONSECA, 2016). Além disso, a degradação superficial, como o surgimento de micro trincas, é crescente com o tempo de exposição. Assim, o comportamento em flexão no início é pouco influenciado por estas micro trincas, que com o tempo aumentam e passam a reduzir a resistência à flexão. Já a resistência à tração é influente principalmente pela degradação da resina e da interação fibra-resina, sendo estas degradações também proporcionadas pela temperatura elevada da exposição UV, que atinge não somente a superfície, atuando sobre todo o corpo (BAZLI *et al.*, 2020). Assim, os efeitos de pós-cura, que elevam a resistência mecânica do material acabam sendo mais evidentes em flexão e não em tração, obtendo melhoria expressiva de resistência à flexão.

5.1.1.2. Análise visual da degradação

A degradação UV provoca alterações estéticas nos materiais poliméricos. Os primeiros sinais da degradação são a perda de brilho, escamação e amarelamento. Este

último é resultado da foto-oxidação de duplas ligações não reagidas em resinas incompletamente curadas (CHIN, 2007). Na

Figura 26, tem-se um compósito em cada tempo de degradação. Nota-se que com a exposição os compósitos vão se tornando amarelados e, na medida com que o tempo de exposição é aumentado, esse amarelamento é intensificado. Logo, evidencia-se o aumento de foto-oxidação.



Sem degradar 30 dias 60 dias 90 dias 120 dias 180 dias

Figura 26 – Compósito sem degradar e exposto a radiação UV por 30, 60, 90, 120 e 180 dias.

Também pode ser observado que, com o tempo de degradação, as fibras que estão abaixo da matriz polimérica começam a ficar mais nítidas. Como destacado por Panchal *et al.* (2019), a radiação UV além de provocar a foto-oxidação, também tem potencial para quebrar as cadeias poliméricas, gerar trincas na superfície do material e provocar perda de massa. Esses fatos podem ser responsáveis por reduzir a espessura

externa da matriz do compósito, evidenciando as fibras internas do compósito. Não somente promovendo alterações estéticas nos compósitos, essas mudanças podem estar relacionadas à redução das propriedades mecânicas, fatos observados nos testes mecânicos.

5.1.1.3. Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier

A resina da matriz compósita é oriunda da reação da epicloridina com o Bisfenol A, para a qual foi utilizado um aduto de amina alifática como endurecedor. Na Figura 27, tem-se os espectros de infravermelho (IR) dos compósitos não envelhecido e envelhecido por exposição à radiação UV. Os picos intensos em 1606, 1509 e 828cm^{-1} (CORRES *et al.*, 2011 KORKMAZ; GÜLTEKIN, 2022) picos são referentes aos anéis aromáticos. Já os picos em 1243, 1182, 1080, 1038 cm^{-1} estão relacionados aos grupos éter (BARBOSA, 2017 SUN, 2018 MEURE; WU; FURMAN, 2010 BELEC, 2015 BARBOSA, 2017). Esses picos são típicos do sistema epóxi. Com o aumento do tempo de envelhecimento, há uma redução notável destes picos, especialmente em 1509 e 1243 cm^{-1}, indicando uma diminuição nos anéis aromáticos e nos grupos éteres associados aos grupos epóxi. Esta redução é um indicador das reações de reticulação que ocorrem na estrutura epóxi. Ou seja, a interação do epóxi com o endurecedor gera produtos como cetona e amida ou quinona, observados em picos em 1730-1740 cm^{-1} e 1650 cm^{-1}, respectivamente, que aumentam com o tempo de exposição UV (BARBOSA, 2017; BELEC, 2015).

Diferentemente do observado para os picos anteriormente descritos, os picos existentes no intervalo de 1650 a 1800cm^{-1} crescem com o tempo de degradação. Essa observação é destacada na literatura como resultado do processo de foto-oxidação do sistema epóxi-amina que altera a matriz do compósito (BELEC, 2015; BARBOSA, 2017). Assim, o crescimento dos picos é relacionado à formação de cetona (em 1730-1740 cm^{-1}), e amida ou metil-quinona em 1650 a 1660 cm^{-1} em função da oxidação promovida pela exposição à radiação UV (BELEC, 2015; BARBOSA, 2017).

Os picos em 2920 e 2850 cm^{-1} estão relacionados ao alongamento C-H do monômero (L. DA ROCHA, 2021), que apresentam, para a maioria dos tempos de degradação, uma redução na intensidade desses picos com o aumento do tempo de exposição à radiação UV, revelando a degradação dos grupos -CH causada pela

radiação UV. As ligações formadas por esses grupos (-CH) com as cadeias principais da estrutura epóxi possuem baixa energia, possibilitando sua quebra pela radiação UV (KORKMAZ; GÜLTEKIN, 2022). A redução dos picos relacionados ao -CH confirma a oxidação, que pode levar à formação de vários grupos carbonila, por exemplo, cetona e éster (YANG *et al.*, 2015). O pico amplo observado em 3260 cm^{-1}, provavelmente está relacionado aos grupos hidroxila (L. DA ROCHA, 2021; BARBOSA, 2017; LOHANI, 2021). A redução que ocorre em 180 dias pode estar relacionada ao fim da reação do epóxi com seu endurecedor (MAILHOT *et al.*, 2005).

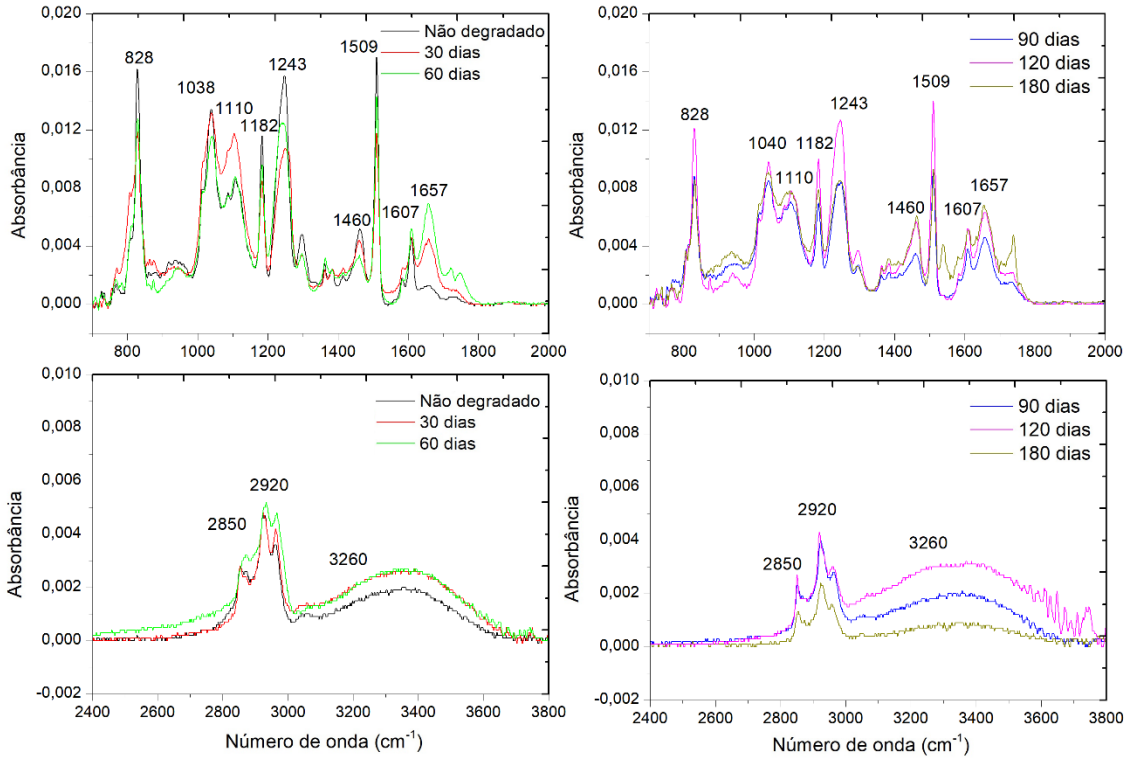


Figura 27 – Espectro de FTIR não degradado (0 dias) e do compósito exposto à radiação UV por 30, 60, 90, 120 e 180 dias.

Segundo Tcherbi *et al*. (2013), subprodutos de ácidos carbonílicos e carboxílicos são produzidos durante as reações entre a resina epóxi e o seu agente de cura. Esses subprodutos são susceptíveis à degradação UV, que, na presença do UV e ar podem causar foto-oxidação. A foto-oxidação produz radicais que podem interagir com as moléculas do polímero formando hidroperóxidos e, com isso, causar a degradação do material, como a quebra das cadeias. Deste modo, as cadeias poliméricas da resina do

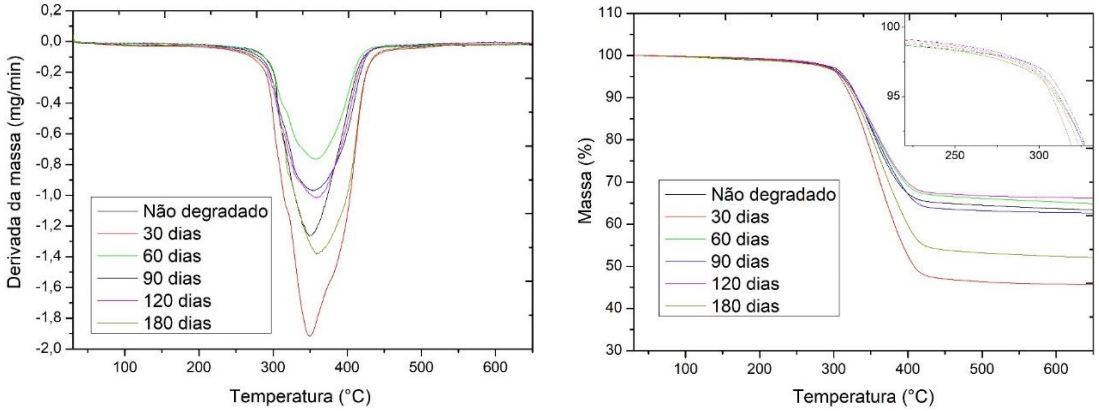
compósito, como já evidenciado na análise visual do compósito e agora reafirmado no FTIR, passam por processo de foto-oxidação que resulta na redução de propriedades mecânicas ao longo do tempo de exposição à radiação UV.

Estes resultados indicam uma evolução estrutural complexa da resina epóxi durante o envelhecimento devido à exposição à radiação UV, com implicações diretas nas propriedades mecânicas. A formação de ligações cruzadas durante o envelhecimento, conforme indicado pela análise de picos no espectro infravermelho, pode contribuir para um aumento na resistência à flexão. As ligações cruzadas geralmente aumentam a rigidez e a resistência dos materiais, tornando-os mais resistentes às cargas de flexão. Por outro lado, a formação de produtos de degradação, como a oxidação de grupos funcionais da resina, como grupos hidroxila e grupos alifáticos, pode contribuir para a diminuição da resistência à tração. Esta oxidação pode levar à quebra de ligações e à formação de produtos mais frágeis. O envelhecimento pode levar a alterações na morfologia do material, como a formação de microfissuras ou porosidade, que podem afetar de forma diferente as propriedades de tração e flexão. O mesmo acontece quando o envelhecimento desencadeia reações químicas específicas, que afetam as propriedades mecânicas de forma diferente.

5.1.1.4. Análise termogravimétrica

A Figura 28 apresenta em (a) a curva derivada da análise termogravimétrica do adesivo e, em (b), a perda de massa. Pela Figura 28 (a), nota-se que há apenas uma etapa de decomposição para todas as condições. Esse evento, que ocorre próximo a 300 °C, é relacionado à degradação da matriz epóxi. Pela Figura 28(b), verifica-se que a perda de massa até 100 °C foi bastante pequena, ficando na faixa de 0,35 a 0,20%, o que mostra que as amostras não continham quantidade significativa de água adsorvida. Além disso, até 650 °C pelo menos cerca de 60% da massa ainda se mantem para a maioria das amostras, mostrando que quantidade significativa da amostra é composta de material inorgânico que não se degrada até 650 °C. Grande parte deste material inorgânico é relativa à fibra de vidro presente no compósito de onde foi removida a amostra para esta análise. Como destacado por Jia e Hong (2021), a utilização de material inorgânico junto com a resina epóxi melhora a estabilidade térmica do polímero.

Assim, a utilização de amostras provenientes do compósito torna a análise mais próxima da realidade do compósito.



(a) (b)

Figura 28 - (a) Derivada da perda de massa (DTG) (b) Termograma de perda de massa como uma função da temperatura do compósito sem degradar e expostos a radiação UV por 30, 60, 90, 120 e 180 dias.

Pela ampliação da faixa de 200 a 350°C do termograma de perda de massa da Figura 28(b), percebe-se pouca mudança em relação à temperatura de degradação do epóxi. Mas acima de 300°C, onde inicia-se a maior perda de massa, nota-se que todos as amostras degradadas apresentaram o início dessa perda de massa em temperaturas menores que a temperatura da amostra não degradada. Apesar de ser uma mudança muito sutil, pode-se dizer que a radiação UV melhora a estabilidade térmica do epóxi, pois a temperatura de degradação é reduzida em todos os tempos de exposição.

5.1.2. Juntas degradadas com UV

As juntas degradas com radiação UV foram caracterizadas mecanicamente por testes de cisalhamento e seus modos de falha avaliados. Alterações visuais de coloração também foram avaliadas. Nas próximas subseções, os resultados destas análises são discutidos e comparados.

5.1.2.1. Teste de cisalhamento das juntas degradada com UV

Os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento das juntas não degradadas e das juntas degradadas por 30, 60, 90, 120 e 180 dias em exposição UV são apresentados na Tabela 9. O perfil variação da resistência ao cisalhamento com a degradação ao longo dos tempos de exposição é mostrado na Figura 29, que apresenta a média da resistência ao cisalhamento para cada período, bem como as barras de desvio. Nesta figura, pode-se observar que, com o aumento do tempo de exposição, houve uma tendência de diminuição da resistência da junta. Essas alterações foram mais significativas após 60 dias e, principalmente, 90 dias de exposição.

Tabela 9: Propriedades mecânicas da junta e teste Tukey*

Tempo de exposição à radiação UV	Resistência ao cisalhamento (MPa)	Deslocamento máximo (mm)	K (kN/mm)
Sem degradar	12,96 ± 0,80[a]	2,17 ± 0,11	6,43 ± 0,55
30 dias	11,69 ± 1,17[a]	1,47 ± 0,36	7,46 ± 0,49
60 dias	10,66 ± 0,60[b]	1,52 ± 0,27	7,44 ± 0,57
90 dias	8,74 ± 1,49[b]	1,45 ± 0,25	6,64 ± 0,13
120 dias	9,43 ± 0,57[b]	1,07 ± 0,17	8,07 ± 0,90
180 dias	9,76 ± 0,81[b]	1,45 ± 0,28	7,36 ± 0,56

* O teste Tukey foi aplicado para as médias da resistência ao cisalhamento de temperatura com um nível de confiança de 0,05. Os sobrescritos com a mesma letra significam que os valores apresentados possuem pouca diferença estatística. A letra **a** é usada para resultados não estatisticamente significativos em relação ao valor médio do caso sem degradação. A letra **b** indica os resultados estatisticamente significativos em relação aos valores médios sem degradação.

Sem degradação, as juntas tiveram resistência ao cisalhamento média de 12,96 MPa, com quedas médias de 9,8%, 17,7% e 32,5% após exposição por 30, 60 e 90 dias, respectivamente. Essa tendência de queda da resistência ao cisalhamento com o aumento do tempo de exposição também foi observada por Rocha (2021) e por Korkmaz e Gültekin (2022), que também estudaram juntas expostas à radiação UV. Deve-se destacar que, embora a radiação UV cause foto-oxidação em polímeros, esse

fenômeno é superficial. Como o adesivo é sobreposto pelos aderentes, apenas as laterais ficam sujeitas à radiação. Assim, outros fatores devem ser responsáveis por causar a degradação do adesivo, como o calor gerado pelas lâmpadas UV. Neste caso, além da exposição UV produzida pelas lâmpadas, as amostras também foram expostas à temperatura elevada dentro da câmara, cerca de 60 °C, mantida durante todos os tempos de exposição adotados. Assim, em parte, a degradação do adesivo também pode ser causada pela ação do calor. Conforme observado por Korkmaz *et al.* (2022), o aumento da temperatura pode provocar trincas no adesivo epóxi, enfraquecendo-o e levando à falha da junta.

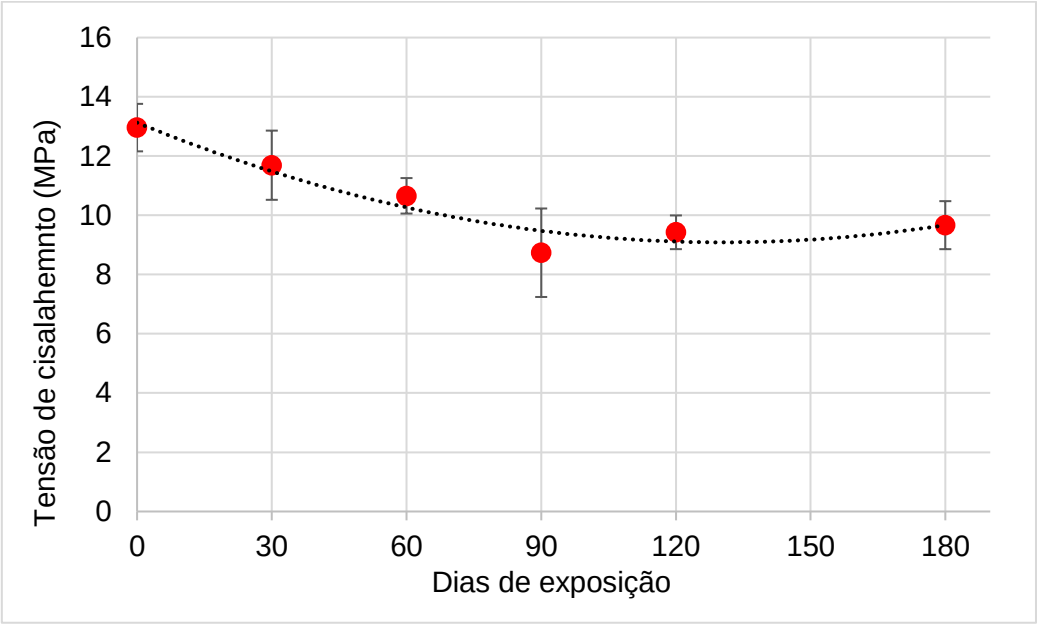


Figura 29 – Média da tensão de cisalhamento das juntas expostas à radiação UV.

Deve-se notar que a exposição aos raios UV causa microfissuras superficiais e o efeito de pós-cura, que torna os adesivos mais rígidos (frágeis) (KORKMAZ; GÜLTEKIN, 2022). Portanto, tanto o UV quanto a temperatura têm o potencial de degradar o adesivo de forma a reduzir a resistência da junta, com a temperatura influenciando todo o adesivo. Portanto, a associação de alta temperatura com UV pode gerar uma degradação mais agressiva do que quando esses agentes de degradação atuam isoladamente, conforme evidenciado por outros autores (BUDHE; BANEA; DE BARROS, 2018).

A partir de 90 dias, embora em média os resultados tenham apresentado melhorias, os desvios se sobrepuseram, tornando-se necessário compará-los estatisticamente. Assim, o teste Tukey foi utilizado para comparar amostras degradadas e não degradadas. Letras iguais são usadas para relatar os resultados médios sem significância estatística ($p>0,05$) em relação aos resultados médios não degradados, enquanto letras diferentes são usadas para médias estatisticamente significativas ($p<0,05$). Conforme observado na Tabela 9, os resultados das amostras sem degradação e das amostras degradadas por 30 dias estão marcados pela letra a, não sendo estatisticamente significativos entre si. Após 60 dias de degradação, os resultados foram sempre estatisticamente significativos em relação às juntas não degradadas, sendo atribuída a letra b. Porém, deve-se destacar que, comparando os grupos seguidos de amostras degradadas, notou-se o parâmetro p do teste Tukey cada vez maior que 0,05. Dessa forma, com maiores tempos de exposição, verifica-se que os resultados são cada vez menos estatisticamente significativos/diferentes entre si. Embora os resultados sejam semelhantes após 60 dias de exposição, há uma tendência de aumento das médias de tensão de cisalhamento após 90 dias de exposição. Nesse caso, tempos de exposição superiores a 180 dias poderiam confirmar a continuidade dessa tendência e ser objeto de investigação com tempos de exposição ainda maiores do que os apresentados neste trabalho.

As curvas do teste de cisalhamento de força e deslocamento para todas as condições estudadas são apresentadas na Figura 30. Nestes gráficos, nota-se uma notável redução do deslocamento total desenvolvido nas juntas degradadas. As médias de deslocamento para cada condição são mostradas na Tabela 9. Após 30 dias de degradação, o deslocamento total diminuiu 32,2%, redução que se manteve estável em quase todos os tempos de exposição, com exceção de 120 dias quando foi obtida uma redução de 50,7%.

Em todas as curvas apresentadas, as juntas tendem a ter maior rigidez em deslocamentos menores que 0,5 mm. Quando desenvolvido um determinado nível de deslocamento, há uma diminuição da rigidez, que se mantém aproximadamente constante até a ocorrência da falha. A rigidez da junta (K) foi calculada na parte linear inicial da curva, sendo também apresentada na Tabela 9. Considerando os valores médios de rigidez obtidos, observa-se que as juntas expostas à radiação UV são mais rígidas que as juntas não expostas ao UV, sendo as de maior rigidez as expostas por 120 dias, que são as que apresentaram o menor deslocamento. Da mesma forma,

aumento de rigidez e redução de deslocamento são comportamentos relatados por pesquisadores que estudaram juntas colocadas com adesivos epóxi degradados pela radiação UV (ALDERUCCI *et al.*, 2019).

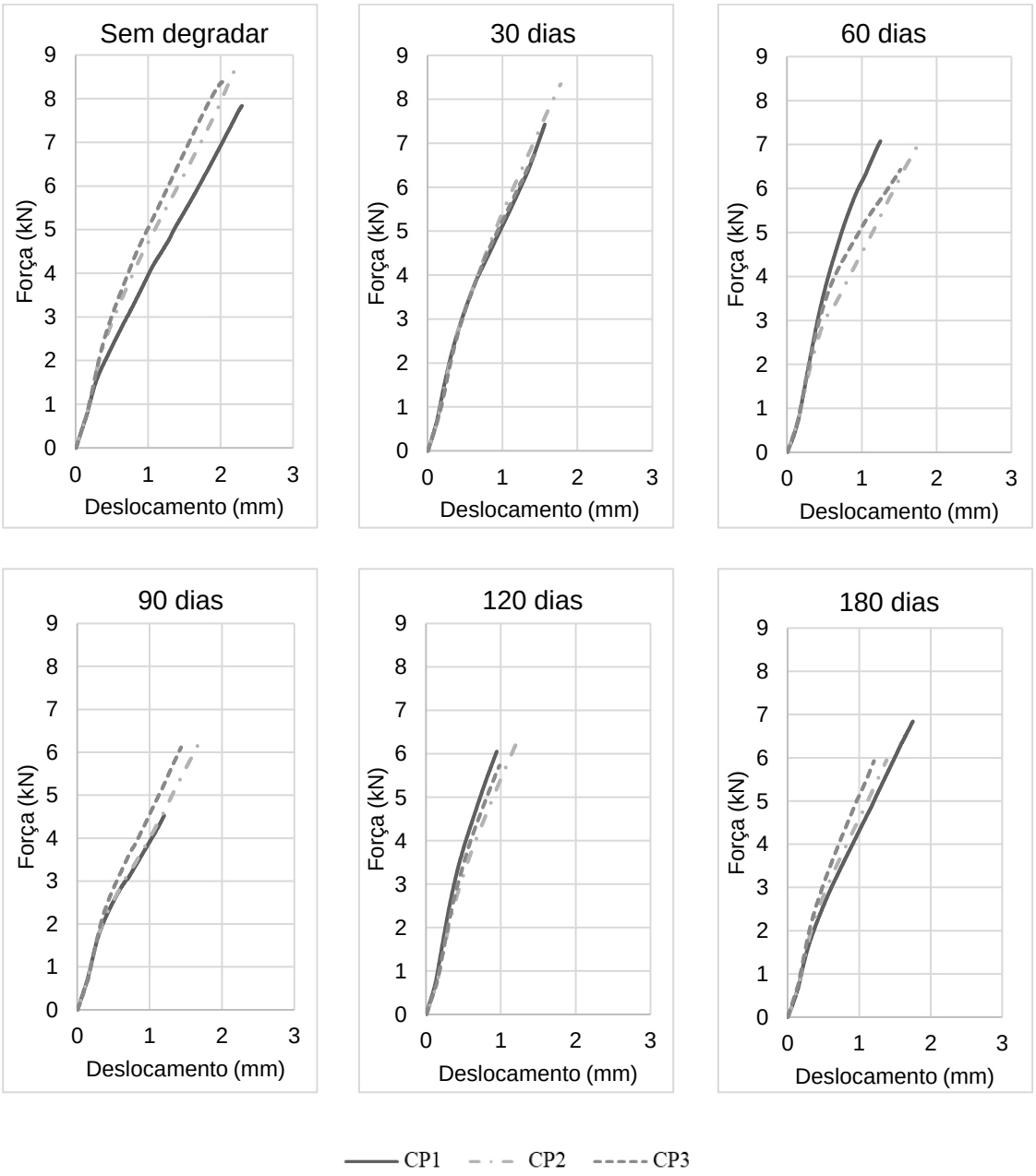


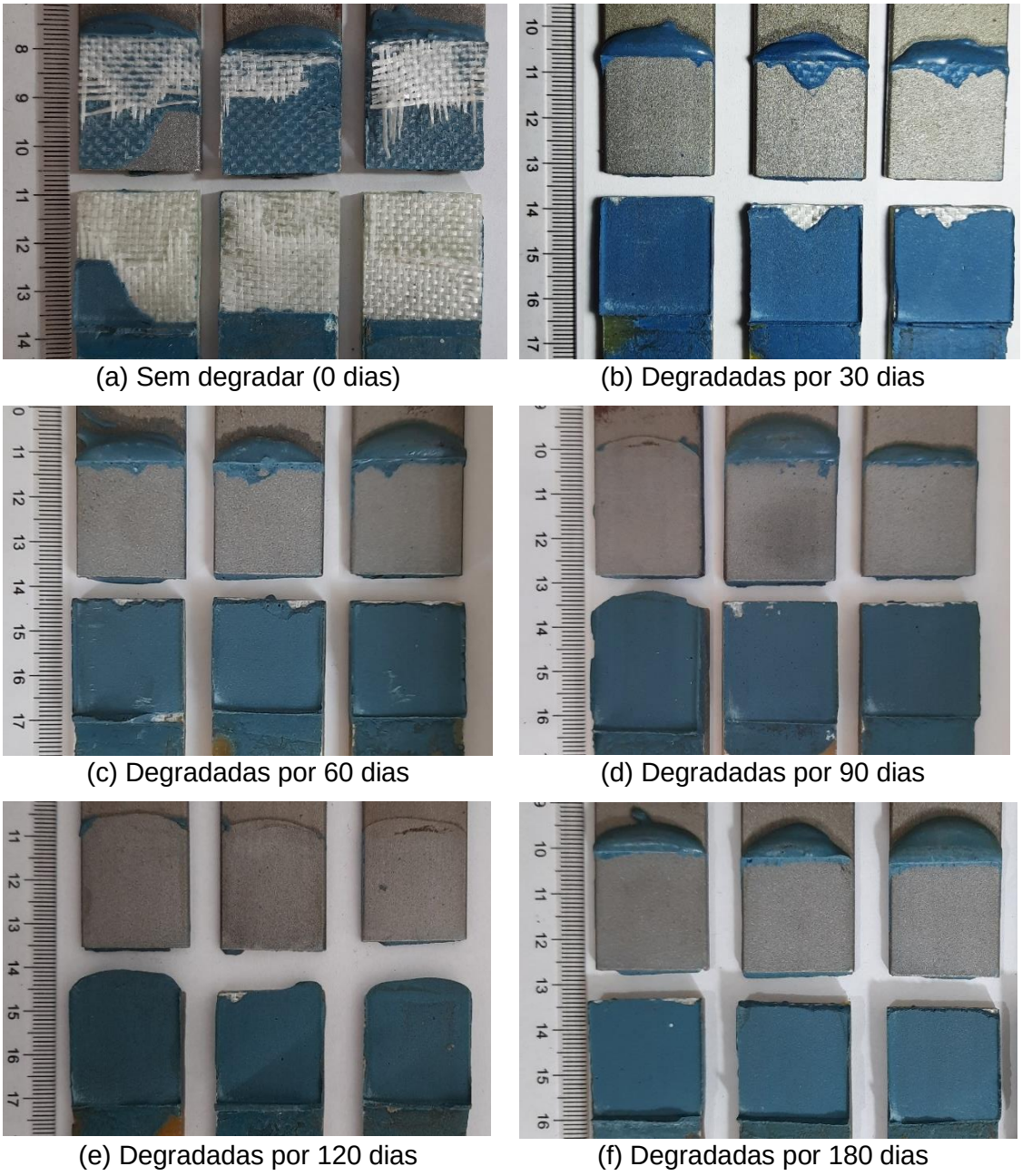
Figura 30 – Curvas de carregamento e deslocamento do teste de cisalhamento das juntas sem degradar e degradadas por 30, 60, 90, 120 e 180 dias de exposição ao UV.

5.1.2.2. Análise do modo de falha das juntas degradadas com UV

Além dos efeitos nas propriedades mecânicas das juntas, o modo de falha também foi modificado pela degradação UV. A Figura 31 apresenta imagens da região de falha de cada junta testada, separadas para cada condição de degradação. A Figura 31(a) contém imagens dos aderentes metálicos e compósitos, respectivamente, após a ruptura da junta na condição sem degradação. As falhas geralmente envolveram degradação do compósito na primeira camada, que foi a mais predominante, exceto na amostra 1, em que houve modo de falha mista, ou seja, presença de falha adesiva na interface adesivo/metal e falha do compósito. As falhas das juntas expostas à radiação UV por 30 dias, mostradas na Figura 31(b), foram predominantemente adesivas na interface adesivo/metal. Houve apenas pontos de falha superficial do compósito em algumas amostras. Comportamento semelhante foi observado em juntas expostas por 60 dias na Figura 31(c). A partir de 90 dias, Figura 31(d) a Figura 31(f), a falha foi exclusiva adesiva na interface metálica.

A mudança do modo de falha para falha adesiva quando as juntas foram degradadas foi semelhante à observada por outros autores que estudaram a degradação de juntas adesivas usando adesivo epóxi e aderente GRFP (GIAMPAOLI *et al.*, 2017 HESHMATI; HAGHANI; AL-EMRANI, 2017 STAZI *et al.*, 2015 SOUSA *et al.*, 2019). Esses autores passaram a ter presença ou aumento do percentual de falha adesiva das juntas com as degradações por eles propostas. Souza *et al.* (2019) destacaram que, além dessa mudança de uma falha do compósito sem degradar para uma falha mista com presença significativa de falha adesiva, não há alteração significativa dos modos de falhas entre as degradações. Tal fato também foi observado, pois nota-se que a degradação UV torna a falha predominantemente adesiva.

Além da falha ser adesiva, ela sempre ocorreu na interface com o aderente metálico. Khaleel *et al*. (2019) também observaram um aumento significativo na falha adesiva na interface com o aderente metálico de suas juntas CFRP/Alumínio coladas com adesivo epóxi quando expostas à radiação UV. Neste trabalho, este fato pode ser correlacionado com a temperatura de 60 °C no interior da câmara, pois os aderentes e o adesivo possuem diferentes coeficientes de dilatação térmica. Ke *et al*. (2020) observaram uma mudança no modo de falha do adesivo na interface com o aderente metálico quando as juntas CFRP/Aço foram testadas em temperaturas mais altas.



(a) Sem degradar (0 dias) (b) Degradadas por 30 dias

(c) Degradadas por 60 dias (d) Degradadas por 90 dias

(e) Degradadas por 120 dias (f) Degradadas por 180 dias

Figura 31 – Modos de falha das juntas sem degradar e degradadas por 30, 60, 90, 120 e 180 dias de exposição à radiação UV.

5.1.2.3. Análise da mudança de cor das juntas degradadas com UV

Conforme destacado por Faria *et al*. (2011) e Panchal *et al*. (2019), a descoloração visual é evidência de foto-oxidação de cadeias poliméricas causada pela radiação UV. A mudança de cor é uma característica visível. Além de alterar a cor, a foto-oxidação também causa alterações como trincas na superfície, modificação da rugosidade e perda de massa, contribuindo para a redução da resistência mecânica. Os grupos funcionais das resinas epóxi são fortes absorvedores de radiação UV e, portanto, altamente degradados (L. DA ROCHA, 2021). Assim, a matriz do compósito e o adesivo das juntas deste trabalho são muito susceptíveis à degradação.

A Figura 32 mostra uma junta em cada condição. A cor dos aderentes compósitos tornou-se mais amarela com o aumento do tempo de exposição. Apesar da forte degradação do compósito, a falha das juntas degradadas não ocorreu na interface compósito-adesivo.

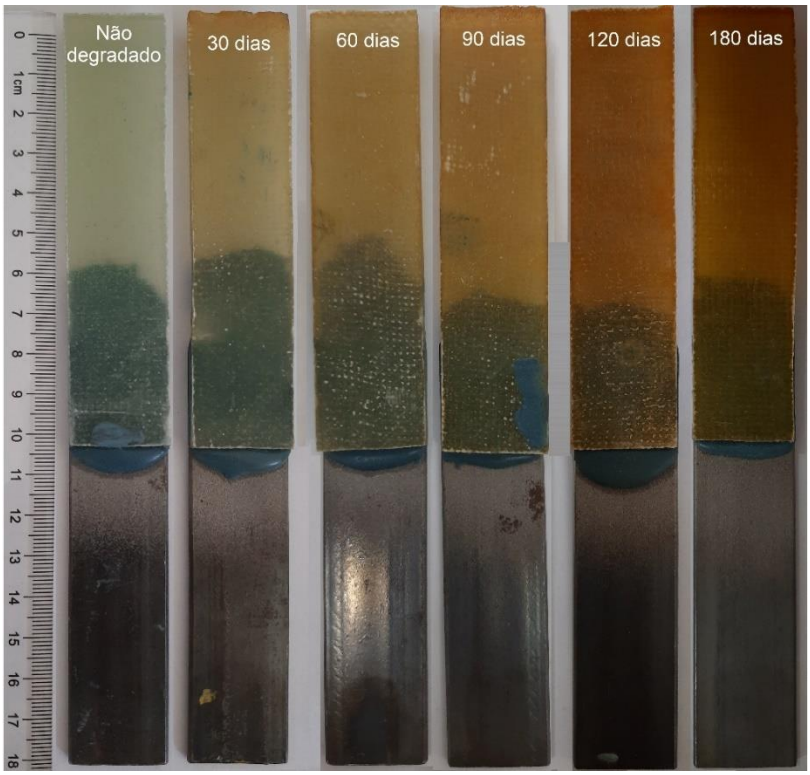


Figura 32 - Juntas não degradadas e expostas a radiação UV por 30, 60, 90, 120 e 180 dias.

Vale ressaltar que como o adesivo, que também é uma matriz epóxi, é de cor azul, a mudança de cor não é tão facilmente visível quanto no compósito. A descoloração é proporcional à foto-oxidação que ocorre no material (FARIA, 2011; KHOTBEHSARA, 2021; BATISTA, 2015). Assim, com o tempo de exposição das juntas, espera-se maior foto-oxidação dos polímeros epóxis.

5.1.3. Adesivo degradado com UV

O adesivo degrado com radiação UV foi caracterizado por meio dos testes dinâmico mecânico (DMA), FTIR e análises termogravimétricas. Nas próximas subseções os resultados destas análises serão discutidos e comparados.

5.1.3.1. Análise dinâmico mecânica do adesivo

Os gráficos do módulo de armazenamento (E') obtidos a partir do DMA das amostras de adesivo não degradado e degradado por exposição à radiação UV são mostrados na Figura 33. Um gráfico com o comportamento médio da temperatura de transição vítrea (Tg) obtida a partir do *onset* de E' para cada condição é apresentado na Figura 34. Esta figura mostra que a Tg diminuiu com o aumento do tempo de exposição à radiação UV. Comportamento semelhante foi relatado na literatura (FARIA, 2011). A redução da Tg está associada à cisão das cadeias moleculares devido à foto-oxidação causada pela radiação UV. A quebra da cadeia aumenta a mobilidade molecular, favorecendo a redução da Tg (BARBOSA *et al.*, 2017; FARIA, 2011; BELEC, 2015).

Em 30°C, o módulo de armazenamento manteve-se estável por até 90 dias de degradação, permanecendo em valores próximos a 11000 MPa. Porém, em 120 e 180 dias, houve queda no módulo de armazenamento, mostrando que o envelhecimento gerou redução na rigidez do material. Essa redução após tempos de degradação mais longos também foi observada por da Rocha (2021), que degradou o GFRP de matriz epóxi em uma câmara UV. Essa redução pode estar relacionada ao enfraquecimento do material devido ao aparecimento de microfissuras na superfície geradas pela radiação UV.

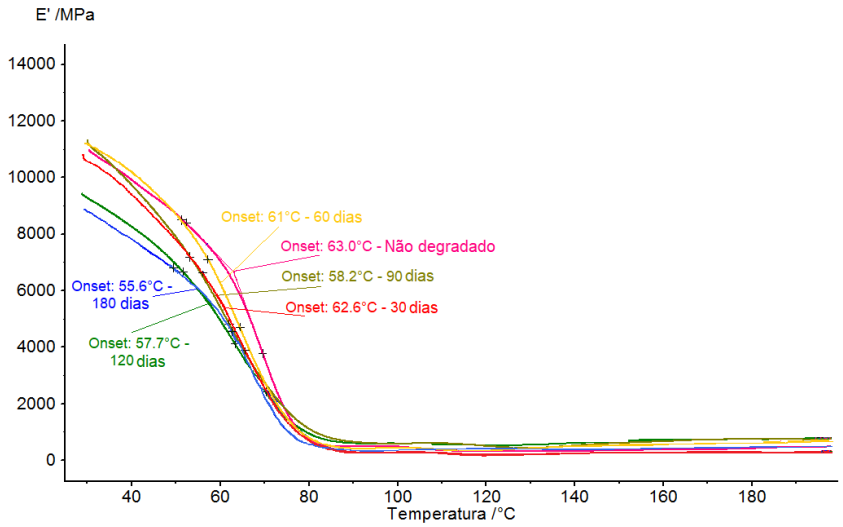


Figura 33 - Módulo de armazenamento do adesivo epóxi antes e depois de exposto a radiação UV por 30, 60, 90, 120 e 180 dias, obtido por DMA.

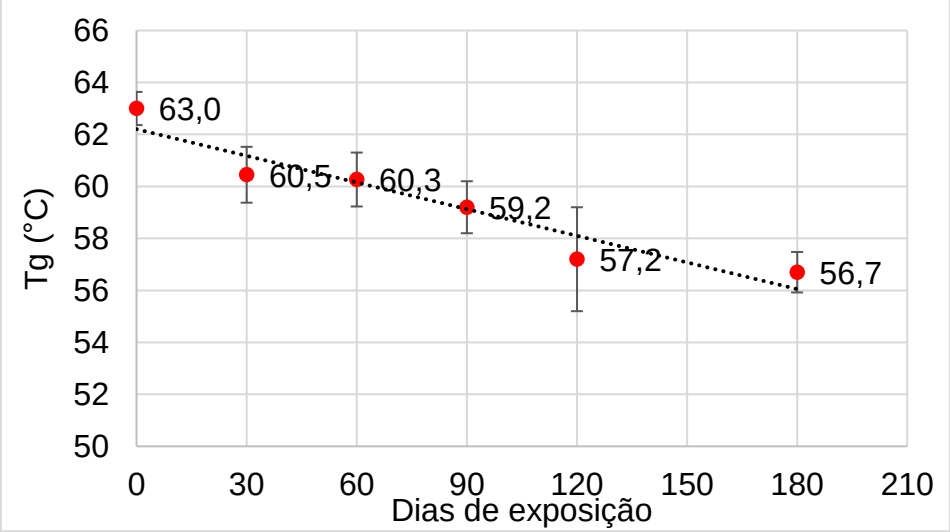


Figura 34 – Variação da Tg com o tempo de exposição à radiação UV.

5.1.3.2. Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier

A Figura 35 mostra os espectros de infravermelho (IR) do adesivo das amostras de adesivo não envelhecido e degradados por exposição à radiação UV. Em 3260 cm^{-1}, há um pico amplo, que provavelmente está relacionado a grupos hidroxila (BARBOSA

et al., 2017; L. DA ROCHA, 2021; LOHANI, 2021). Os picos em 2920 e 2850 cm^{-1} estão relacionados ao alongamento do monômero C-H. Esses picos são ligeiramente deslocados para comprimentos de onda mais longos com o aumento do tempo de exposição à radiação UV, atingindo valores de 2935 cm^{-1}, indicando o alongamento -CH do CH_3, o que sugere a quebra de -CH_2 (L. DA ROCHA, 2021). Além disso, a intensidade desses picos diminui com o aumento do tempo de exposição à radiação UV, revelando a degradação dos grupos -CH causada pela radiação UV. As ligações formadas por esses grupos (-CH) com as cadeias principais da estrutura epóxi possuem baixa energia, possibilitando sua quebra pela radiação UV (KORKMAZ; GÜLTEKIN, 2022).

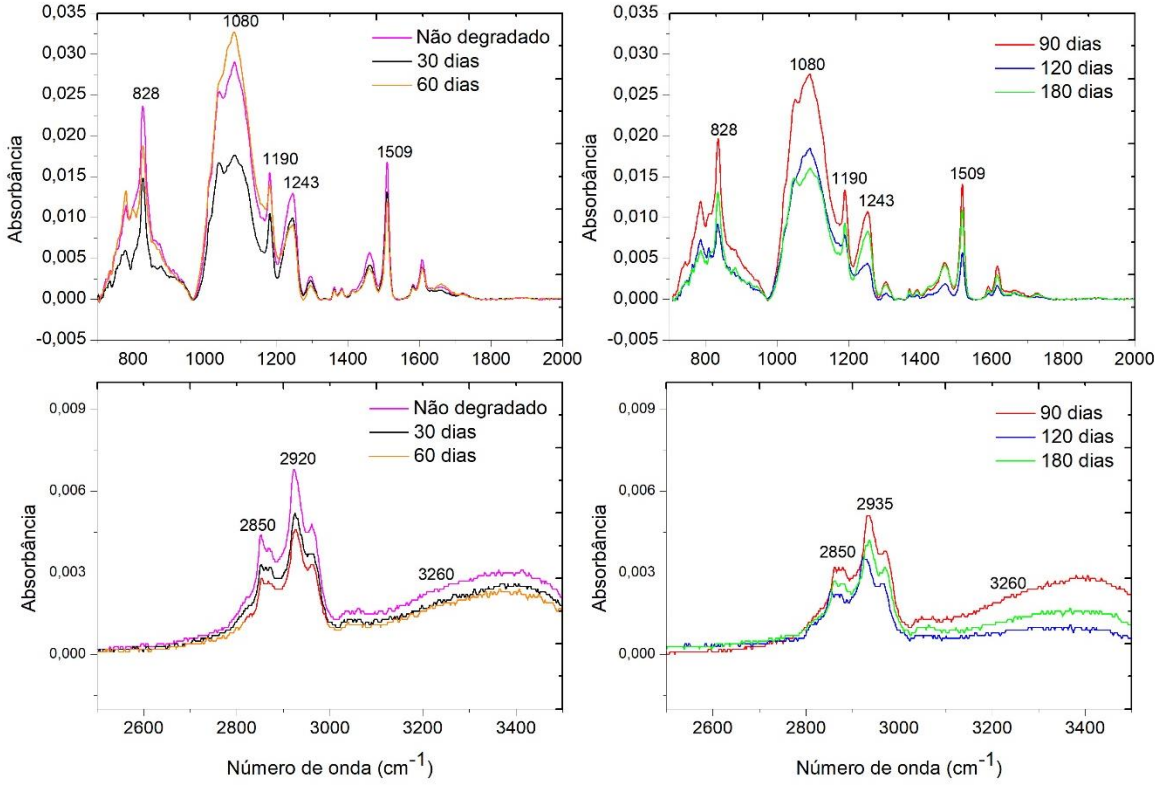


Figura 35 – Espectro de FTIR do adesivo não degradado e exposto à radiação UV por 30, 60, 90, 120 e 180 dias.

Os picos intensos em 1606, 1509 e 828 cm^{-1} estão relacionados aos componentes aromáticos. A redução desses picos, observada em 1509 cm^{-1}, está relacionada ao alongamento do anel aromático do epóxi (KORKMAZ; GÜLTEKIN,

2022). Os picos em 828 cm^{-1} são deslocados para 833 cm^{-1} com o aumento do tempo de exposição ao UV, o que está relacionado às alterações atribuídas à deformação C-H na posição para nos anéis aromáticos (CORRES *et al.*, 2011). A intensidade dos picos também é reduzida com o tempo de exposição, revelando a degradação dos grupos funcionais relacionados. Esses deslocamentos também foram observados por Rocha (2021) e Ghasemi-Kahrizsangi *et al*. (2015), que relataram que a radiação UV pode causar alterações nos anéis aromáticos.

Os picos em 1243, 1190, 1080 cm^{-1} estão relacionados aos grupos éter. As mudanças na intensidade desses picos revelam que a radiação UV também afeta as ligações do epóxi (BARBOSA *et al.*, 2017; SUN, 2018).

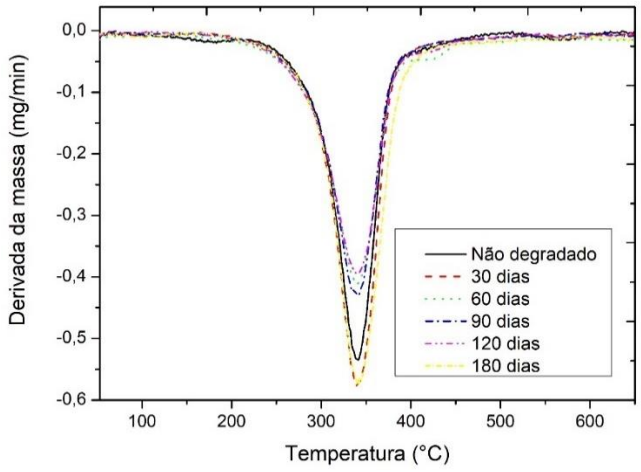
Essas observações indicam que a radiação UV causa deterioração das cadeias poliméricas do adesivo epóxi. Esse fato é compatível com a redução da Tg observada no DMA.

5.1.3.3. Análise termogravimétrica

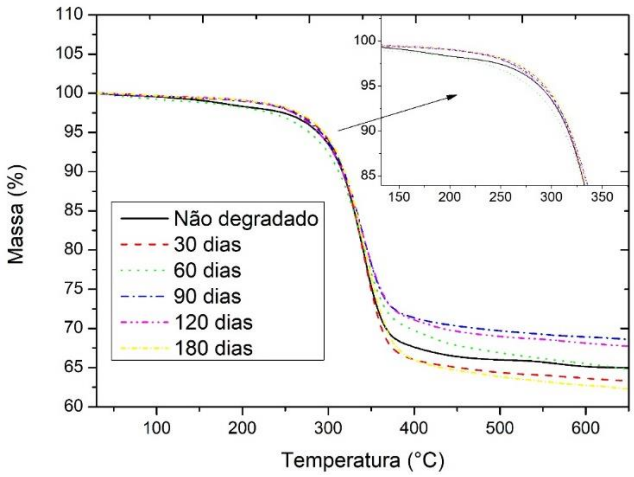
A Figura 36(a) mostra a curva derivada da análise termogravimétrica do adesivo. A amostra não envelhecida e as expostas à radiação UV em tempos diferentes apresentaram apenas uma etapa de decomposição. As amostras não continham quantidade significativa de água adsorvida, pois a perda de massa até 100 °C ficou na faixa de 0,78 a 0,32%.

Os termogramas de perda de massa apresentados na Figura 36(b) mostram claramente que o adesivo não degradado e com 60 dias de exposição à radiação UV apresentaram menores temperaturas de início de degradação, em torno de 150 °C, indicando menor estabilidade térmica. No entanto, a amostra degradada por 60 dias apresentou uma massa menor a 400 °C do que a amostra não degradada, indicando que a exposição melhorou sua estabilidade térmica em temperaturas mais altas. Os adesivos expostos por 30, 90, 120 e 180 dias começaram a se degradar em temperaturas próximas a 250 °C. A maior estabilidade térmica das amostras pode estar relacionada à radiação UV, tornando-as mais resistentes à degradação térmica. As interações da radiação UV com o polímero podem causar quebras de cadeia, como já mencionado, ou variações na densidade de ligações cruzadas (TCHERBI-NARTEH *et*

al., 2013). Isso pode explicar por que as temperaturas de degradação das amostras com 30 e 60 dias de exposição não seguiram o mesmo comportamento das demais amostras.



(a)



(b)

Figura 36 - (a) Derivada da perda de massa (DTG) (b) Termograma de perda de massa como uma função da temperatura do adesivo epóxi sem degradar e expostos a radiação UV por 30, 60, 90, 120 e 180 dias.

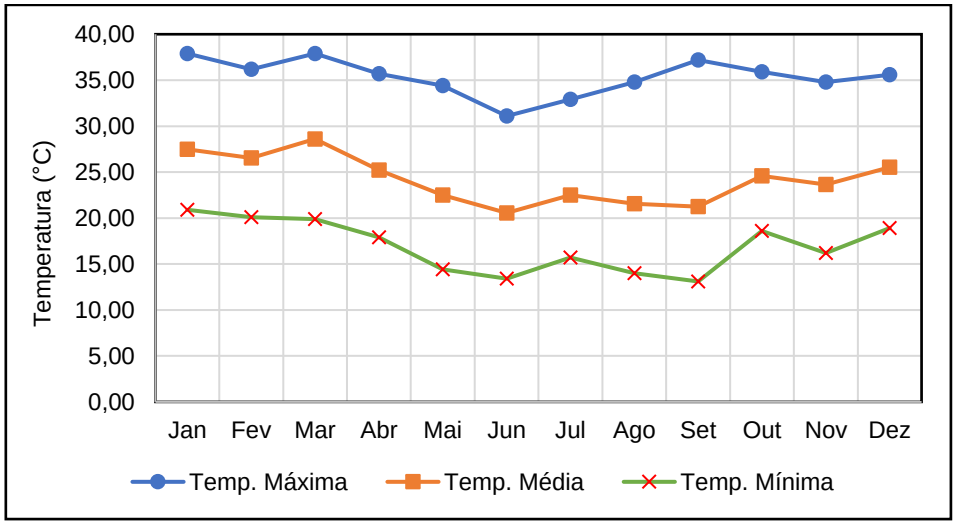
Dentre as amostras analisadas, o adesivo apresentou perda de massa variando de 31,5 a 37,9%, indicando que este adesivo possui material inorgânico. Este conteúdo inorgânico interage com a matriz polimérica. Tanto o adesivo sem exposição à radiação UV quanto o com exposição apresentaram perda de massa. Jia e Hong (2021)

relataram que a adição de material inorgânico no revestimento epóxi melhorou sua estabilidade térmica e reduziu a perda de massa a 600°C, que passou de aproximadamente 90% para valores inferiores a 60%. Assim, o adesivo representado na Figura 36 provavelmente continha material inorgânico que não se degradou até 650°C, por isso reteve cerca de 60% de seu peso.

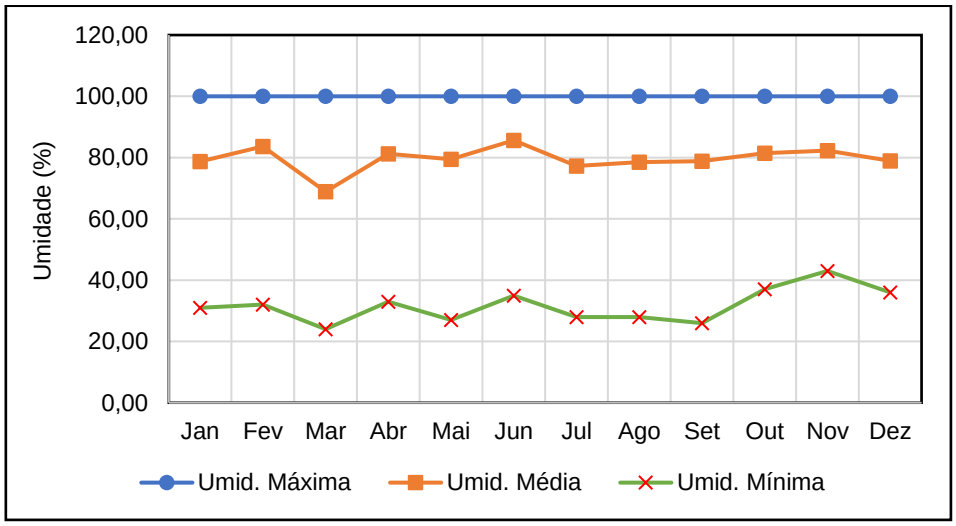
5.2. Degradação Externa

A degradação provocada pela exposição ao ambiente externo tem influência de diversos agentes ambientais. No ambiente em que as juntas foram expostas, pode-se destacar a influência da variação de temperatura, da umidade relativa, do volume de precipitação, da radiação solar, e da salinidade devido à proximidade ao mar. Como estes parâmetros apresentam variações ao longo dos dias, os dados obtidos junto ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) foram plotados nos gráficos da Figura 37 para avaliação das variações máximas mínimas e médias ao longo dos meses do ano. Na Figura 37, tem-se em (a) os dados médios, máximos e mínimos mensais da temperatura e em (b) os valores mensais da umidade relativa média, máxima e mínima, enquanto em (c) tem-se o acumulado mensal de chuva e de radiação na mesma figura. Destaca-se que os dados usados nessa figura são do mesmo período de exposição das juntas durante um ano.

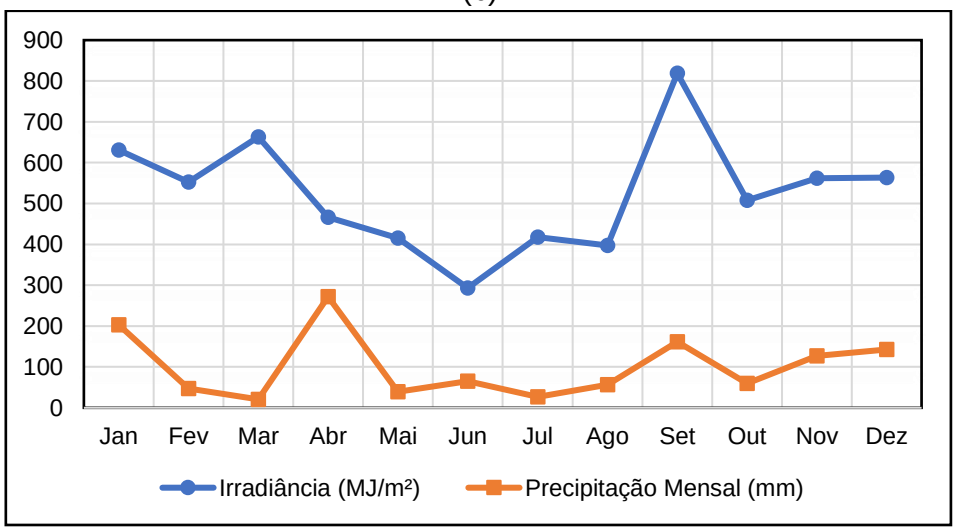
Nota-se que, ao longo dos três primeiros meses do ano de 2022, em relação à temperatura, por se tratar de meses de estações quentes, foram registradas temperaturas máximas elevadas, chegando a 37,9 °C. Observa-se, também nesses meses, as maiores temperaturas médias em relação ao restante dos meses. Mesmo assim, houve dias em que as temperaturas mínimas ficaram em cerca de 20 °C. Além disso, destaca-se que os dados do INMET revelam que, em um mesmo dia, a amplitude térmica chegou a superar 10 °C entre a máxima e a mínima. Nos meses seguintes tem-se a redução da temperatura, em função da mudança das estações, alcançado o inverno no mês de junho. A menor temperatura registrada foi de 13,4 °C. Nos meses finais tem-se o aumento das temperaturas. Tais observações são importantes para auxiliar no entendimento da influência da temperatura sobre a degradação da junta, pois a temperatura promove processos de pós-cura e provoca, também, a dilatação térmica, fatos que alteram o desempenho da junta.



(a)



(b)



(c)

Figura 37 – Condições climáticas registradas na estação meteorológica do INMET da cidade de Niterói: (a) Temperatura, (b) Umidade e (c) Irradiância e Precipitação.

Em relação à umidade, também se observa uma grande variação entre os valores máximos e mínimos mensais, há dias em que a umidade fica em 100% e outros em que se tem registros abaixo de 30%. Já sobre a precipitação mensal, ou seja, a chuva, tem-se meses com grandes volumes de chuva acumulados e meses com pouca ocorrência de chuva, como foi o caso do mês de março de 2022 que o acúmulo de chuva foi de apenas 20,6 mm. Para o total mensal de radiação solar global, tem-se, para a maioria dos meses, valores superiores a 290 MJ/m², chegando a registrar valores próximos a 800 MJ/m² no mês de setembro. Observa uma tendência de redução dos máximos registrados com o decorrer dos meses seguido de uma tendência de aumento no final do ano, fato em concordância com a mudança das estações que ocorre ao longo de um ano. Ao longo de um ano de exposição ao ambiente externo as juntas receberam cerca de 6287,87 MJ/m² de radiação global, considerando a energia apenas na faixa do UV, foram 314,4 MJ/m².

O comportamento das condições ambientais avaliado na Figura 37 está de acordo com mudança das estações do ano para a região de Niterói, comportamento semelhante ao longo de um ano foi observado por Souza *et al.* (2019) que avaliou as mudanças de condições ambientais ao longo do tempo de exposição na região de Lisboa (Portugal).

Outros autores degradaram os seus materiais expondo-os ao ambiente externo de diferentes países. Hunter-Alarcón *et al.* (2018) degradaram juntas simples de GFRP no ambiente externo no Chile por períodos de 9 a 12 meses. Belec *et al.* (2015) expuseram o seu compósito GRFP ao ambiente externo do Vietnã. Abu-Sharkh e Hamid (2004) degradaram seu compósito no ambiente natural da Arábia Saudita por 9 meses. Como os fatores ambientais em cada país sofrem variação ao longo do tempo e, principalmente, em relação às diferentes estações do ano, a observação de tais dados é fundamental para auxiliar a compreensão do comportamento das juntas ao longo do tempo de exposição nessas condições externas.

Nas próximas subseções serão discutidas as análises de FTIR feitas no compósito das juntas expostas ao ambiente externo e do teste de cisalhamento das juntas degradadas bem como a avaliação dos seus modos de falha. Por fim, são discutidos os resultados do DMA realizado para o adesivo exposto ao ambiente externo.

5.2.1. FTIR do aderente compósito exposto ao ambiente externo

Na Figura 38, tem-se o espectro de IR do compósito não degradado e degradado nos diferentes tempos de exposição propostos. Nesta figura, os picos 1606, 1509, 1460 e 828 $cm^{-1,}$ que são relacionados ao anel aromático, são claramente reduzidos com o aumento do tempo de exposição ao ambiente externo. Como na exposição externa as amostras são expostas à radiação UV do sol, esta redução pode ser relacionada à redução de compostos do epóxi não curados, que sofrem pós-cura depois da exposição. Korkmaz e Gültekinl (2022), que estudaram o efeito da exposição à radiação UV em adesivos epóxi, também observou redução nesses picos relacionados a estruturas típicas do epóxi com o tempo de exposição à radiação UV, devido a pós-cura. Outro fator externo que também tem influência sobre o anel aromático é o efeito da água e do sal da maresia, fatos que são relatados por Rocha (2021). Eles evidenciaram alteração do pico em 828 cm^{-1} também nas amostras imersas em água salgada. Assim, a degradação observada no FTIR da Figura 38 não é somente devida exclusivamente à radiação UV.

Os picos relacionados ao grupo funcional do éter são observados em 1243, 1182, 1110, 1038 cm^{-1}. Esses picos também são drasticamente reduzidos provavelmente em função dos efeitos da radiação UV e da umidade presentes no meio externo, como observado por Barbosa et al. (2017). Em contrapartida, como subproduto da foto-oxidação, provocada pela radiação UV, tem-se o aumento dos picos 1730-1740 cm^{-1}, relativos à cetona, e dos picos em 1650-1660 cm^{-1}, relativos à amida ou quinona (BELEC, 2015).

Os picos em 2920 e 2850 cm^{-1} estão relacionados ao monômero C-H (BELEC, 2015; L. DA ROCHA, 2021). Nos primeiros 90 dias há aumento desses picos. Em vista da intensidade da radiação UV natural ser menor que a emitidas por câmara de degradação e a presença de outros agentes de degradação, diferentemente do observado por outros autores, há inicialmente um aumento destes picos, que pode ser relacionado à pós-cura por UV da resina epóxi, resultando na formação de subprodutos de carbonila e ácido carboxílico (LOHANI, 2021). Porém, a longo prazo, esses picos são reduzidos em função dos efeitos dos demais agentes de degradação (L. DA ROCHA, 2021 BELEC, 2015) e do UV que favorece a quebra das cadeias e a foto-oxidação (TCHERBI-NARTEH *et al.*, 2013). As ligações formadas por esses grupos (-CH) com as cadeias principais da estrutura epóxi possuem baixa energia, permitindo

sua quebra pela radiação UV (KORKMAZ; GÜLTEKIN, 2022). Assim, a partir de 120 dias, a redução dos picos pode ser relacionada à degradação do UV e à umidade, como destacado por Rocha (2021).

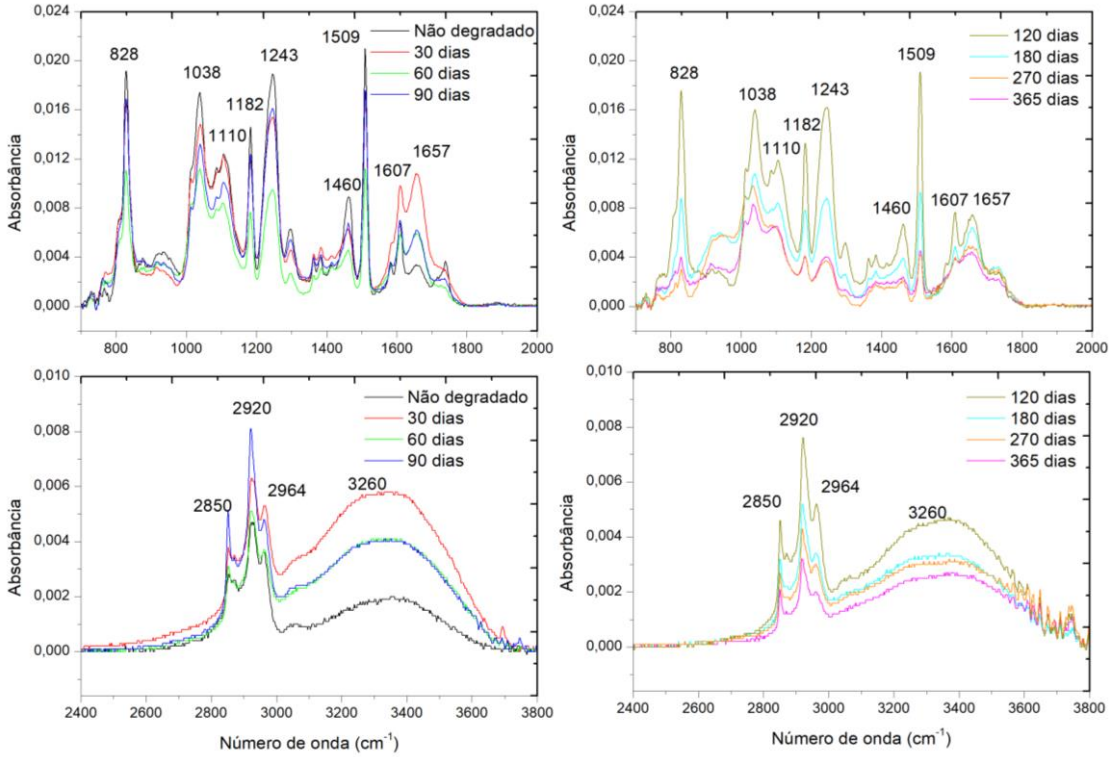


Figura 38 - Espectro de FTIR do compósito não degradado e exposto ao ambiente externo por 30, 60, 90, 120, 180, 270 e 365 dias.

Grupos hidroxila (O-H) podem estar associados à banda larga observada em 3100-3600 cm^{-1} (BARBOSA *et al.*, 2017; L. DA ROCHA, 2021; LOHANI, 2021). O aumento deste grupo pode ser atribuído à absorção de umidade que ocorreu durante dias de chuvas ou muitos úmidos (BATISTA, 2015).

5.2.2. Teste de cisalhamento das juntas

As curvas tensão e deformação das três amostras de cada condição são apresentadas na Figura 40. Na Tabela 10, tem-se os resultados médios da máxima

capacidade de carregamento (kN), do deslocamento máximo obtido na ruptura (mm), da tensão máxima de cisalhamento (MPa) e da rigidez. Na Figura 41, é apresentada a curva da resistência da junta em função do tempo de exposição ao ambiente externo.

Tabela 10: Propriedades mecânicas da junta metal/GFRP não degradada e depois de 30, 60, 90, 120, 180, 270 e 365 de exposição ao ambiente externo.

Condição	Força (kN)	Deslocamento (mm)	Tensão (MPa)	k (kN/mm)
Não degradado	8,36 ± 0,52	2,17 ± 0,11	12,96 ± 0,80	6,43 ± 0,55
30 dias	4,34 ± 0,82	0,89 ± 0,47	7,28 ± 0,81	6,84 ± 1,29
60 dias	3,70 ± 0,34	0,86 ± 0,15	5,73 ± 0,52	6,49 ± 0,95
90 dias	3,43 ± 0,31	0,87 ± 0,11	5,48 ± 0,55	6,40 ± 0,26
120 dias	3,53 ± 0,52	0,71 ± 0,04	5,32 ± 0,49	5,98 ± 0,90
180 dias	3,40 ± 0,41	0,59 ± 0,01	5,26 ± 0,64	6,68 ± 0,83
270 dias	3,89 ± 0,15	0,52 ± 0,08	5,34 ± 0,30	8,63 ± 0,79
365 dias	3,70 ± 0,89	0,97 ± 0,37	5,74 ± 1,39	5,71 ± 0,35

Por esses dados, observa-se que a degradação provocada pela exposição ao ambiente externo foi bem agressiva já nos primeiros 30 dias de exposição, visto que a queda da tensão média de cisalhamento da junta foi de 43,8% nesse período. Já com 60 dias de exposição, a queda de resistência alcança 55,8%, chegando à redução máxima de 59,6% em 180 dias de exposição. Apesar da elevada redução, como pode ser mais bem observado na Figura 41, em que se tem a resistência da junta em função do tempo de exposição, após 60 dias, observa-se estabilidade na resistência da junta. A redução de resistência pode estar relacionada com o processo de corrosão acentuado que ocorreu no aderente metálico.

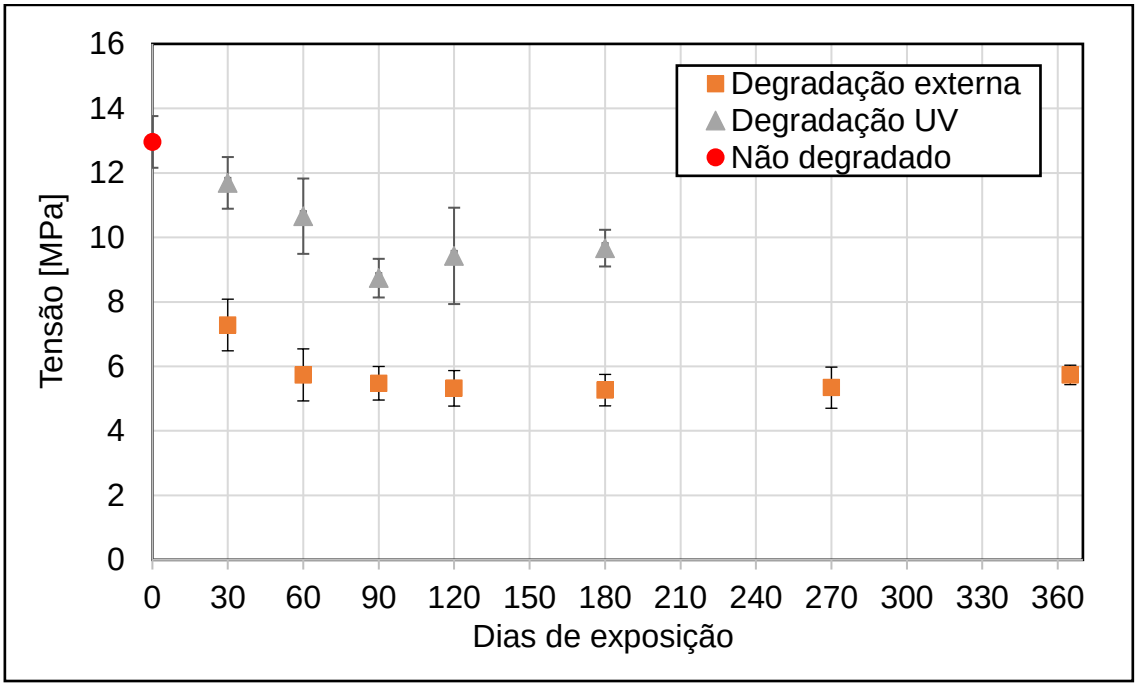


Figura 39 – Comparativo das tensões de cisalhamento das juntas degradadas com UV e no ambiente externo

Na Figura 39 tem-se um comparativo entre as máximas tensões de cisalhamento das juntas degradadas no ambiente externo e por exposição UV artificial. Em relação as juntas degradadas apenas com UV, a degradação externa gerou uma redução de resistência 27,1% maior. Tal comportamento é justificado pelo fato de externamente haver muitos outros agentes, como umidade e corrosão salina, capazes de produzir alterações significativas nas juntas, sendo o UV um agente com potencial de degradação superficial.

Em relação as curvas da Figura 40, observa-se mudança de inclinação da curva de algumas amostras. Tal mudança é devida a um pequeno escorregamento da amostra na garra de fixação da máquina de ensaios no início do ensaio.

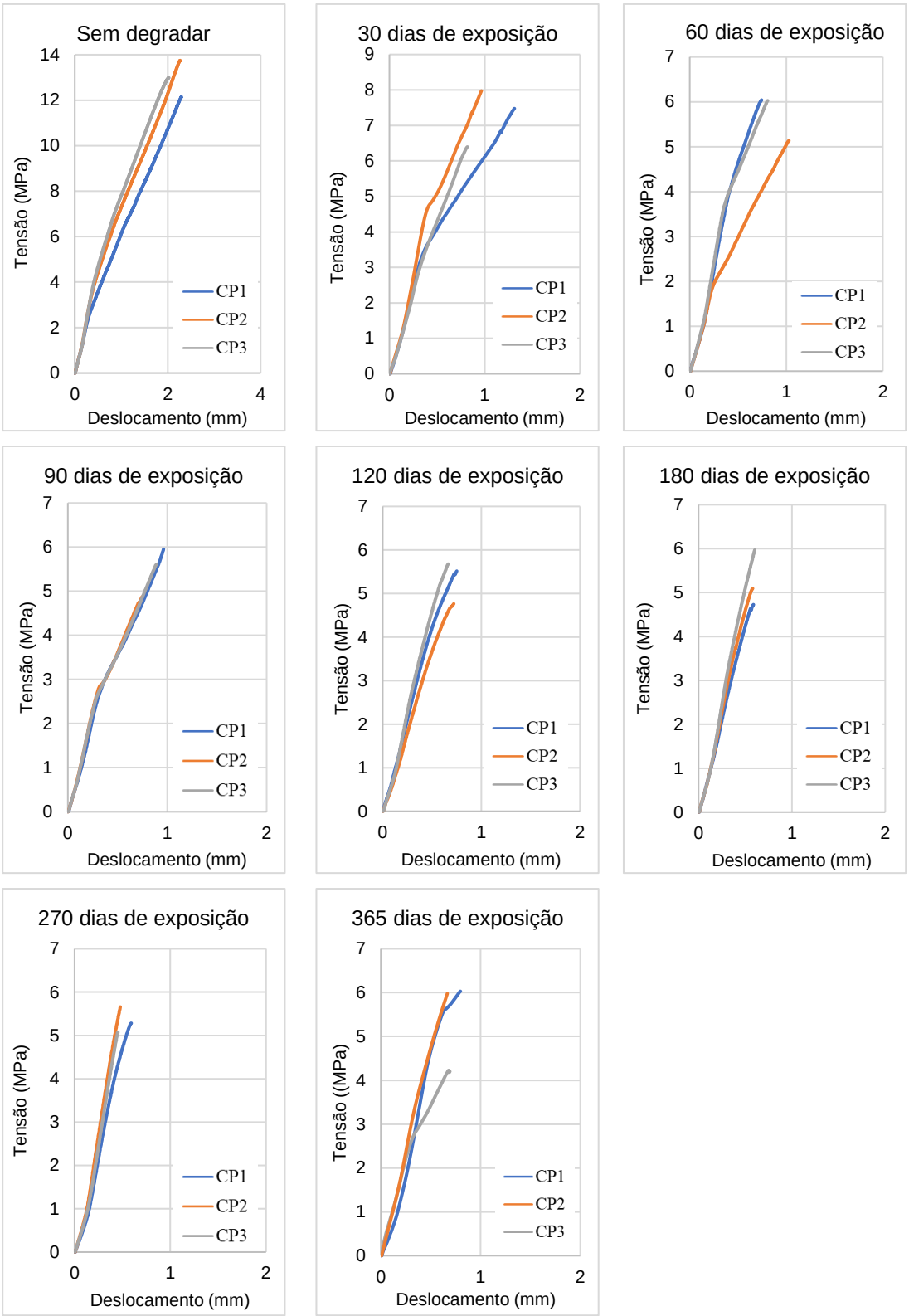


Figura 40 - Curvas tensão e deformação das juntas de cada tempo de exposição externa.

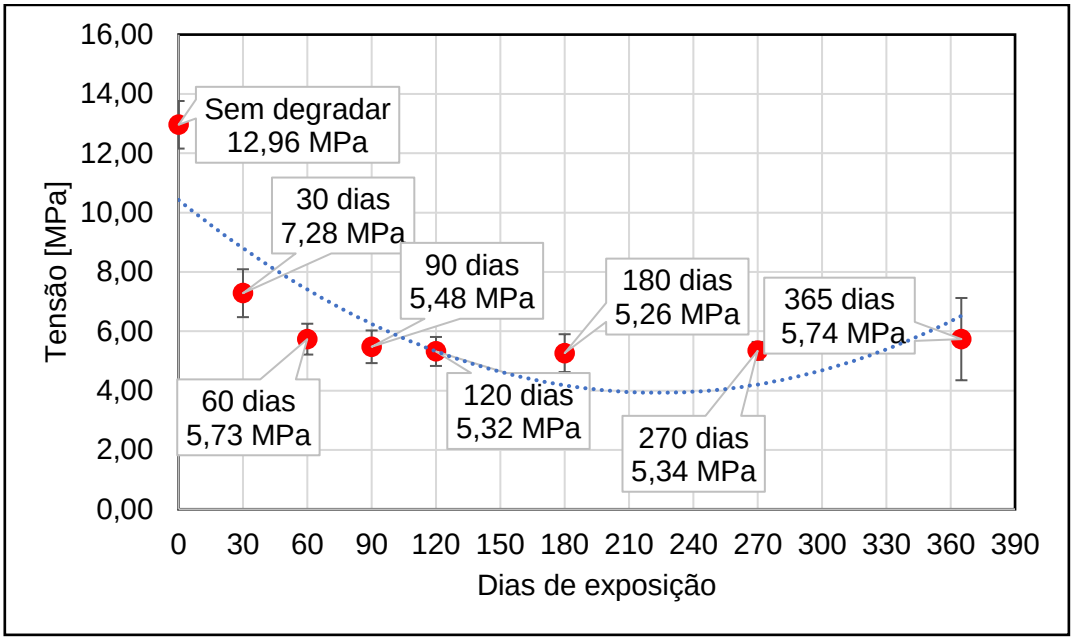


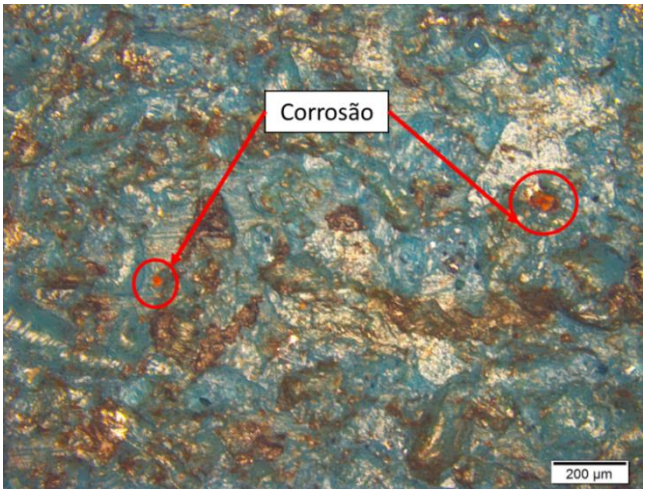
Figura 41 - Comportamento da tensão de cisalhamento das juntas ao longo do tempo de exposição.

Sobre a redução observada na resistência ao cisalhamento, a corrosão e a absorção de água são dois importantes fatores de degradação a serem considerados. A redução na resistência ao cisalhamento da junta colada foi relacionada à corrosão por Li *et al.* (2016). As juntas simples testadas no trabalho de Li *et al.* (2016) tiveram uma redução na resistência ao cisalhamento de 47%, quando as juntas foram degradadas pela névoa salina em 720 horas. Além disso, de acordo com o trabalho de Darla *et al.* (2023), a absorção de água pode estar relacionada à redução da resistência das juntas coladas. As moléculas de água são absorvidas pelo adesivo, degradando a interface com o aderente e permitindo uma reação galvânica com o alumínio do aderente, usado em seu trabalho. Os autores também notaram uma estabilidade na perda de resistência da junta, que estava relacionada ao limite de absorção de água pelo adesivo, atingindo a saturação. Desta forma, a estabilidade observada nos resultados deste trabalho está de acordo com os resultados de Darla *et al.* (2023).

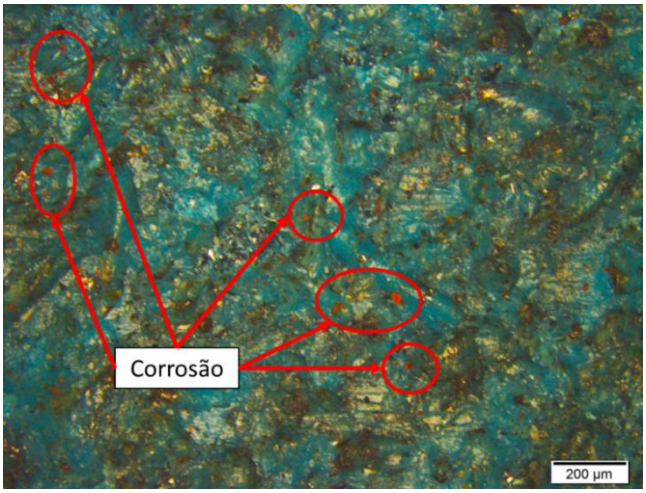
Apesar da estabilidade da tensão média a partir de 60 dias de exposição, o deslocamento não apresenta o mesmo comportamento. Como pôde ser observado na Figura 40 e na Tabela 10, ainda há redução do deslocamento com o aumento do tempo de exposição. Sem degradar, o deslocamento médio é de 2,17 mm, já com 30 dias de exposição, o deslocamento é reduzido em 59%, aproximadamente. Após 270 dias, essa redução ultrapassa 76%. Esse comportamento revela redução da ductilidade do

material. Na degradação com apenas a radiação UV artificial, também foi identificada uma expressiva redução da deformação com o tempo de degradação. O aumento do deslocamento médio observado aos 365 dias é ligeiramente superior ao obtido aos 30 dias, mas significativamente inferior ao obtido na condição não envelhecida. Este comportamento pode ser atribuído à maior ductilidade em função da absorção de água, que poderia ter sido mais intensa antes do 365º dia de exposição ao ambiente externo. Como a absorção de água não foi medida nesta análise devido à complexidade do sistema ser multimaterial, tempos de degradação mais longos permitiriam investigar se a ocorrência de maiores deslocamentos seria uma tendência da degradação ou indicaria um resultado influenciado pelas condições climáticas particulares dos dias imediatamente anteriores aos ensaios mecânicos. Em relação à rigidez, k, este parâmetro não apresentou alteração significativa na maioria dos tempos de exposição. Porém, em 270 dias de exposição é possível notar um ligeiro aumento na rigidez (k) da junta. Tal comportamento pode estar relacionado aos menores deslocamentos.

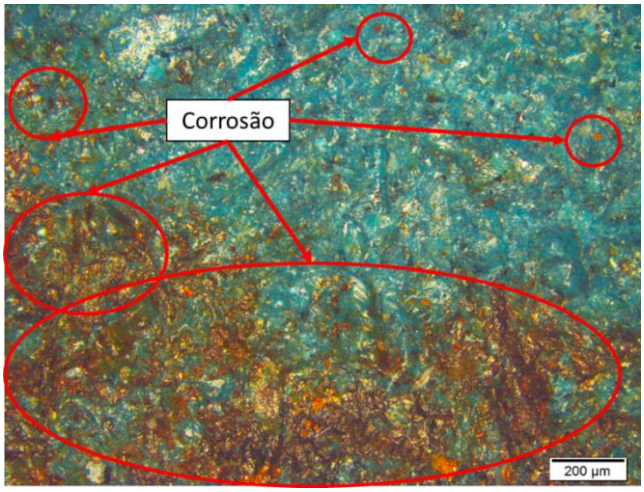
Como pode ser observado nas micrografias dos aderentes metálicos e compósitos apresentadas na Figura 42, o processo corrosivo permeou na região colada. Nesta figura, tem-se as micrografias das amostras degradadas por 30, 180 e 270 dias de exposição, Figura 42 (a), (b) e (c), respectivamente. Em todos os tempos de degradação, tem-se pontos de corrosão sobre o adesivo, que são destacados nas figuras, em que se tem imagens da superfície do adesivo, que ficou sobre o aderente compósito. Na Figura 42 (c), a micrografia foi realizada na borda, região que se pode observar, além dos pontos de corrosão ao longo da imagem, uma região com grande concentração de corrosão. Nos menores tempos de exposição, tem-se pontos de corrosão ao longo do adesivo, o que revela que a corrosão não ficou apenas nas bordas do adesivo.



(a)



(b)



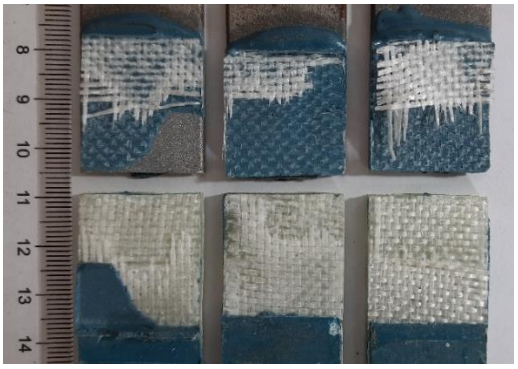
(c)

Figura 42 - Micrografias do adesivo na região de falha das amostras de 30 (a), 180 dias (b) e 270 dias (c) de exposição.

5.2.3. Análise do modo de falha das juntas expostas ao ambiente externo

Os processos de envelhecimento, além de modificar as propriedades mecânicas das juntas, também podem alterar o modo de falha das juntas. Durante o teste de cisalhamento, as juntas coladas com aderentes compósitos podem apresentar vários modos de falha.

Na Figura 43, tem-se as amostras de cada condição após a falha. A análise visual dessa figura permite identificar os modos de falhas. Como já visto, a junta não degradada apresentou falha do compósito, arrancando as primeiras camadas. Após as degradações, as juntas praticamente apresentaram o mesmo tipo de falha, falha adesiva na interface como o aderente metálico. Como já mencionado, a corrosão deste aderente permeou por baixo do adesivo, colaborando com este tipo de falha. Analisando os aderentes metálicos das juntas degradas, percebe-se o aumento da corrosão permeando as bordas da interface adesivo aderente com o aumento do tempo de degradação. Outros autores também destacam o surgimento ou aumento de falha adesiva em juntas adesivas coladas com adesivo epóxi e aderente de GRFP quando elas foram degradadas (GIAMPAOLI *et al.*, 2017 HESHMATI; HAGHANI; AL-EMRANI, 2017 STAZI *et al.*, 2015 SOUSA *et al.*, 2019). Souza *et al.* (2019) relatam não observar alteração significativa dos modos de falhas entre as degradações por eles propostas. Este fato também é notado na Figura 43, em que o modo de falha adesivo se mantém com o aumento do tempo de exposição. Comportamento semelhante foi observado com as juntas degradadas apenas com radiação UV. Assim, o modo de falha das juntas quando expostas ao ambiente externo é o mesmo das juntas degradadas apenas com UV, embora o ambiente externo apresente diversos agentes de degradação, sendo não controlado e mais severo. A ocorrência do modo de falha adesiva nas juntas envelhecidas a partir dos primeiros 30 dias de exposição revela que a degradação externa é altamente significativa na interface metal-adesivo. No entanto, isto não significa que as juntas foram produzidas com má adesão, porque todas as juntas não envelhecidas falharam no aderente compósito. Esse fato confirma a qualidade da ligação e a eficiência da junta. Observação semelhante foi feita por Arrouche *et al.* (2021).



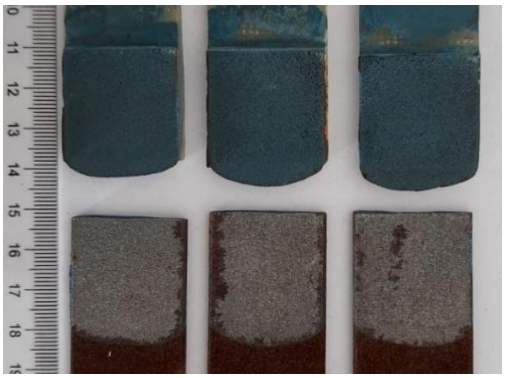
(a) Não degradado



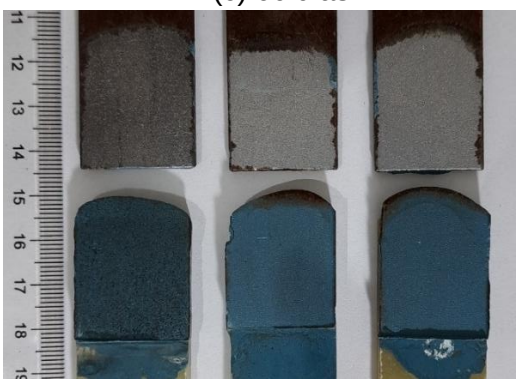
(b) 30 dias



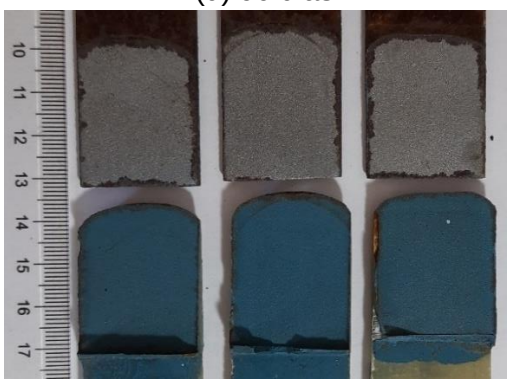
(c) 60 dias



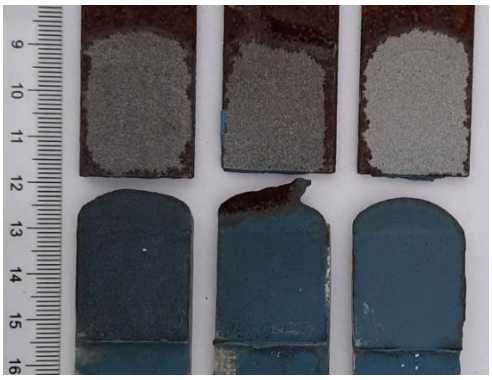
(d) 90 dias



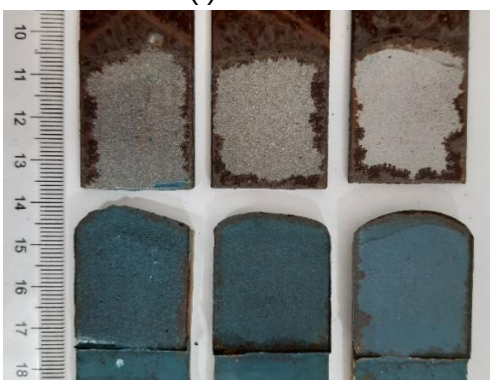
(e) 120 dias



(f) 180 dias



(g) 270 dias



(h) 365 dias

Figura 43 - Aderentes metálico e compósito das juntas ensaiadas em cisalhamento nas condições sem degradar e expostas ao ambiente externo por 30, 60, 90, 120, 180, 270 e 365 dias.

Ainda na Figura 43, pode-se observar que a corrosão nas bordas da região colada aumenta com o tempo de exposição ao ambiente externo. Apesar disso, não foi percebido que a queda na resistência ao cisalhamento da junta acompanhou esse aumento da corrosão. Para justificar esse comportamento, vale lembrar que as juntas possuem comprimento efetivo de sobreposição, a partir do qual um aumento na sobreposição não aumenta a resistência da junta, ou seja, a resistência ao cisalhamento é estabilizada, mesmo com aumento da região colada (GUALBERTO, 2021 NGUYEN *et al.*, 2012 SILVA; BISCAIA; RIBEIRO, 2019). Portanto, acredita-se que as juntas possuem área maior que a necessária, e que até 365 dias a área corroída não foi suficiente para reduzir a área colada a ponto de atingir a área efetiva. Portanto, para que a corrosão nas bordas comece a ter mais influência na redução da resistência ao cisalhamento da junta, são necessários tempos de exposição mais longos.

A degradação provoca outras alterações nos materiais da junta, como pode ser observado na Figura 44, que apresenta a imagem de uma junta em cada tempo de degradação. Nota-se que o aderente metálico sofre bastante com a maresia, apresentando processo corrosivo desde 30 dias de exposição. Em relação aos aderentes compósitos, é observado com o tempo de exposição um amarelamento da matriz. Como no ambiente externo há a presença da radiação ultravioleta (UV) proveniente do sol, espera-se uma alteração de cor em função da foto-oxidação provocada pela radiação UV no polímero da matriz do compósito. Faria *et al.* (2011) e Panchal *et al.* (2019) destacam que a radiação UV, além de provocar a foto-oxidação, também tem potencial para quebrar as cadeias poliméricas, gerar trincas na superfície do material e provocar perda de massa, fatos que podem contribuir para a redução das propriedades mecânicas. Também pode ser observado que, com o tempo de degradação, as fibras do compósito começam a ficar expostas. Esse fato, além de estar relacionado com a radiação UV, que provoca perda de massa, também pode estar relacionado com o processo de dilatação provocado pelo aumento de temperatura e de umidade que variam ao longo do tempo e podem favorecer o surgimento de microfissuras e a perda de massa do polímero da matriz do compósito (LIU; LIU; FENG, 2020). Comparando a Figura 44 com a Figura 32, que apresenta as juntas expostas apenas ao UV, nota-se um menor amarelamento das juntas expostas ao ambiente externo. Tal fato pode ser correlacionado à menor quantidade de radiação incidente. No entanto, a evidência superficial das fibras é maior nas amostras degradas ao ambiente externo, devido à perda de massa provocadas por outros agentes externos além da radiação UV.



Figura 44 - Juntas não degradadas e degradadas por 30, 60, 90, 120, 180, 270 e 365 dias de exposição UV.

Pela observação da Figura 44, a presença expressiva de corrosão no aderente metálico revela uma contribuição da proposta desta degradação, que expõe as juntas a um ambiente que tem proximidade com o mar. Na literatura, no conhecimento da autora, não se observam degradações externas, que expõe os materiais a ambientes com maresia. Como visto, as regiões de degradação proposta na literatura não são locais em que há presença de maresia, ou que esta seja um agente de degradação significativo (HUNTER-ALARCÓN *et al.*, 2018; BELEC, 2015; ABU-SHARKH; HAMID, 2004; SOUSA *et al.*, 2019). Exposição a um ambiente com maresia é significativa para juntas que possuem aderente metálico, uma vez que a maresia favorece a corrosão e a presença do sal também altera a resistência das juntas e seus modos de falha. Como observado anteriormente, a corrosão permeia a região colada é pode ser um dos responsáveis pela redução de resistência das juntas.

5.2.4. Análise dinâmico mecânica do adesivo exposto ao ambiente externo

O gráfico com o comportamento médio da temperatura de transição vítrea (Tg) obtido pelo *onset* do modulo de armazenamento (E') para cada condição é apresentado na Figura 45. Nesta figura, observa-se que a Tg diminui com o aumento do tempo de degradação. Após 30 dias de exposição houve redução de 12,25% da Tg, chegando a uma redução de 22,5% após 90 dias de exposição, menor valor obtido para a Tg dos adesivos degradados. A partir de 90 dias verifica-se um aumento da Tg nos tempos seguintes de degradação, mas ainda menores que a Tg encontrada para o adesivo sem degradar. Após 365 dias de exposição a redução da Tg fica em 7,8%, menor redução observada.

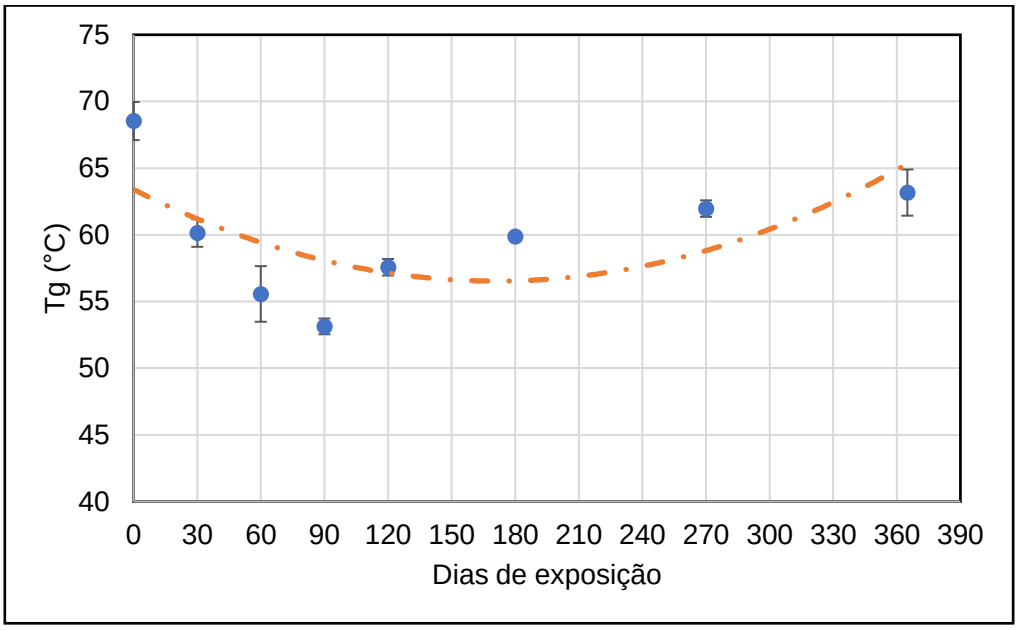


Figura 45 - Variação da Tg com o tempo de exposição ao ambiente externo.

Durante a exposição externa as amostras são sujeitas à radiação UV provenientes do sol, à umidade e à chuva. A radiação UV provoca a quebra das cadeias moleculares em função da foto-oxidação, o que aumenta a mobilidade das cadeias poliméricas, contribuindo para a redução da Tg. Já a absorção de água da chuva proporciona a plastificação do adesivo, fato que também aumenta a mobilidade molecular, favorecendo a redução da Tg (L. DA ROCHA, 2021; BARBOSA, 2017

BELEC, 2015; FARIA, 2011). Comportamento semelhante foi observado por Belec *et al.* (2015) que observaram a redução da Tg da resina epóxi do compósito GRFP que foi exposto ao ambiente externo do Vietnã.

Os aumentos da Tg observados a partir de 90 dias, podem estar relacionados aos limites dos efeitos das degradações provocados pela absorção de água e pela exposição à radiação UV. Belec *et al;* (2015) também notaram que, a partir de um determinado tempo de exposição, a redução na Tg passou a ser expressivamente menor que quando comparado com as reduções da Tg dos menores tempos, chegando a se observar uma estabilidade. Eles relacionaram este comportamento ao fato de que as cisões das cadeias, que ocorrem com o tempo de exposição, alcançam uma taxa crítica. No entanto, na Figura 45 observa-se um aumento, que pode ser associado ao efeito de pós-cura que é favorecido por exposição em elevadas temperaturas, que ocorre paralelamente aos demais fatores de degradações presentes na exposição externa. Assim, os efeitos da pós-cura, que provocam aumento da Tg, começam a superar os efeitos das degradações que reduzem a Tg.

5.3. Degradação Combinada

Além da condição de degradação envolvendo apenas a exposição à radiação UV, foram propostas, adicionalmente, condições de degradação que também envolvem imersões em água destilada e salgada. Essas degradações foram realizadas individualmente e, também, combinadas com exposição à radiação UV por 60 dias antes das imersões, para verificar se a radiação UV intensificava a absorção de água e, consequentemente, seus efeitos de degradação. Nesta seção são apresentados os resultados da variação de massa das juntas, compósito e adesivo, e dos testes mecânicos de tração e flexão do compósito e de cisalhamento das juntas, bem como a análise do modo de falha das juntas.

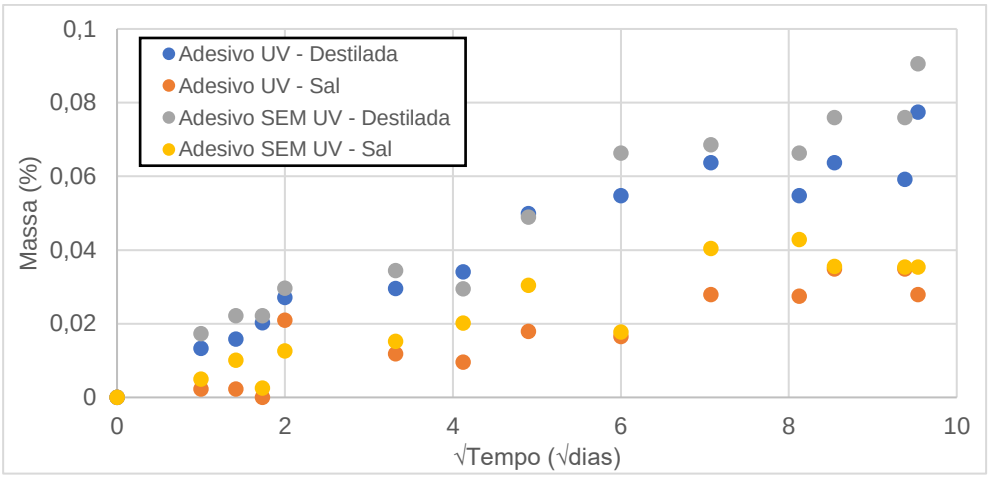
5.3.1. Variação da massa

Os materiais imersos sofrem variação de massa em função da absorção da água. Como esta absorção é função da temperatura de imersão, foram feitos gráficos

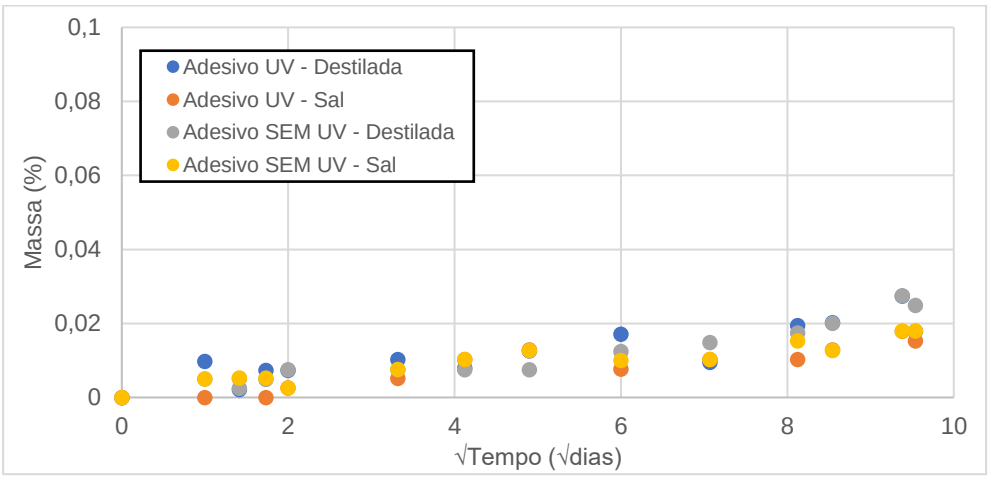
do ganho de massa percentual ao longo do tempo de imersão para cada temperatura. Cada gráfico é relacionado a uma das três temperaturas de imersão usadas (40 °C, ambiente e 4 °C). Foi utilizada a mesma escala para facilitar a comparação. Nas próximas subseções, são discutidos os ganhos de massa do adesivo, do compósito usado para tração e flexão, e finalizando com os dados das juntas.

5.3.1.1. Variação de massa do adesivo

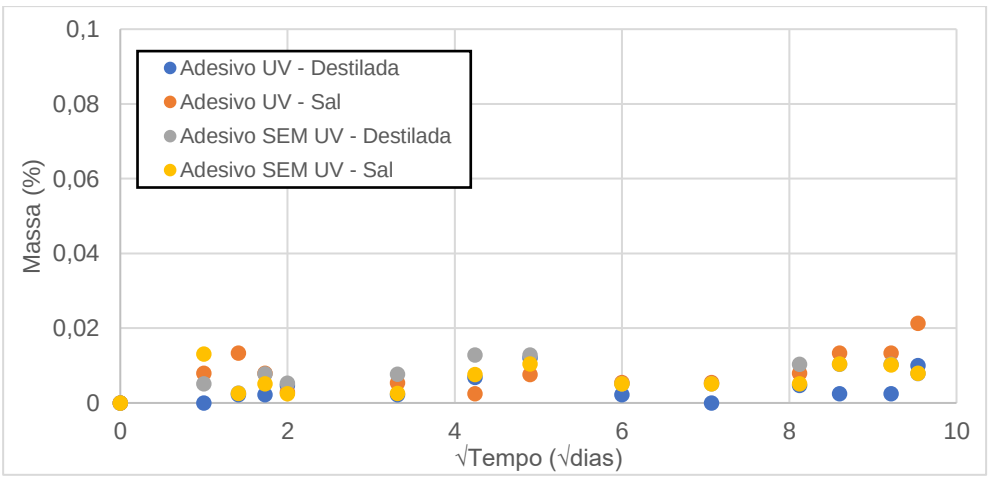
Na Figura 46, tem-se as curvas de variação de massa para as amostras de adesivo imersas, sendo que, na Figura 46 (a), tem-se os dados das imersões em 40 °C, na Figura 46 (b), os das imersões em temperatura ambiente e, na Figura 46 (c), os dados das imersões em 4 °C. Comparando esses três gráficos, nota-se que o aumento de temperatura favoreceu o ganho de massa das amostras, visto que temperaturas mais elevadas favorecem a difusão. Os maiores ganhos ocorreram em 40 °C e os menores em 4 °C, maior e menor temperatura de imersão adotadas. Outra observação que pode ser feita é a comparação entre o meio de imersão, considerando uma mesma temperatura de imersão. Em 40 °C e na temperatura ambiente, as amostras imersas em água destilada apresentaram maior absorção de água que as amostras imersas em água salgada. O mesmo não pode ser dito para as amostras imersas em 4 °C, pois os ganhos em todos os casos foram muito pequenos, a ponto de se sobrepor em quase todos os tempos de imersão. Como destacado por Souza *et al.* (2019), a água destilada tem maior capacidade de penetrar no material que a água com sais. O polímero da matriz pode atuar como membrana semipermeável e interromper a passagem de íons inorgânicos grandes, assim, em água salgada, há menor absorção, por isso, geralmente, é menos agressiva ao compósito (SOUSA *et al.*, 2019 YAN; CHOUW, 2015). Vale destacar que as amostras de adesivo usada nas imersões são do mesmo tamanho das adotadas nos testes de DMA, ou seja, bem menores que as usadas para flexão e para tração dos compósitos.



(a) 40 °C



(b) Temperatura ambiente



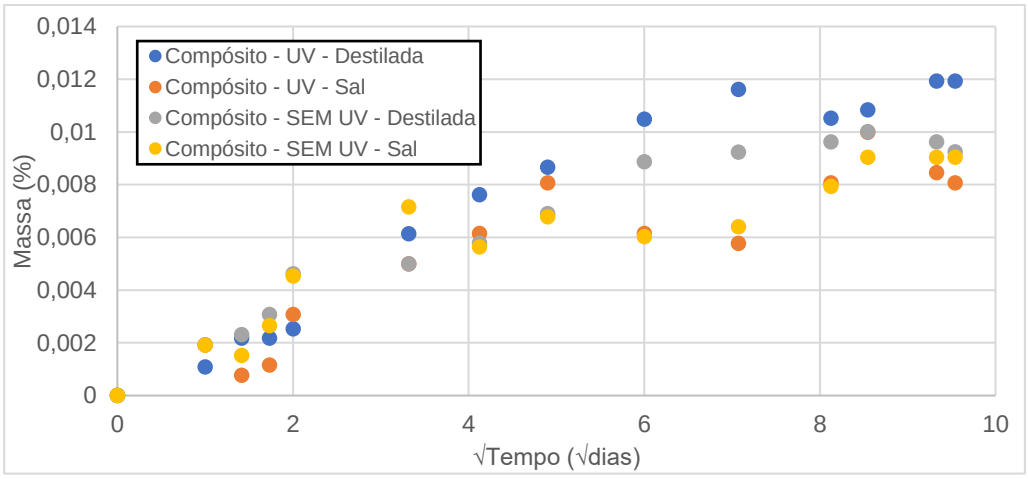
(c) 4 °C

Figura 46 - Variação de massa dos adesivos imersos em: (a) 40 °C, (b) temperatura ambiente e (c) 4 °C.

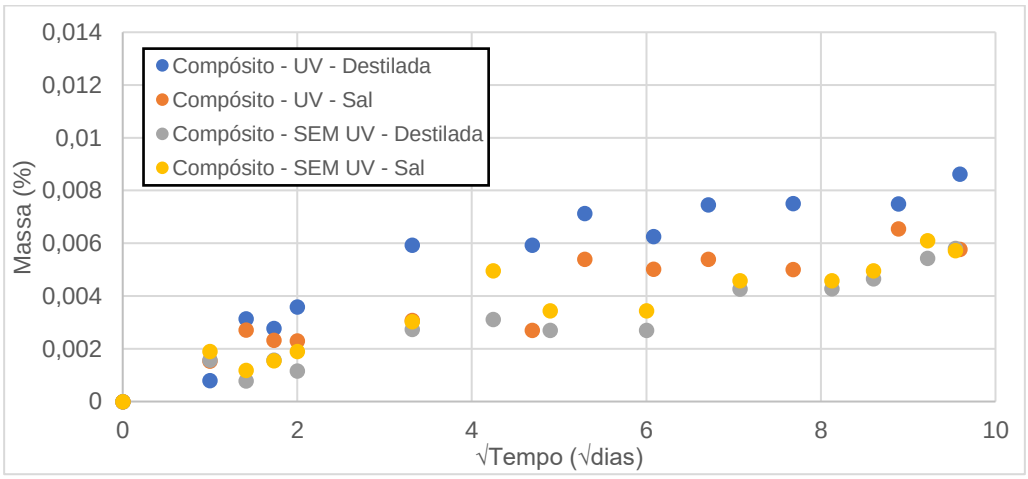
5.3.1.2. Variação de massa dos compósitos de tração e de flexão

De semelhante modo, na Figura 47, tem-se os gráficos da variação de massa dos compósitos usados para teste de flexão, em que (a) é relativo às imersões em 40 °C, (b) às imersões na temperatura ambiente e (c) às imersões em 4 °C. Assim como ocorreu para o adesivo, as maiores absorções ocorreram em 40 °C e as menores em 4 °C. O mesmo não pode ser destacado para comparação entre as imersões em água destilada e salgada. Apenas na temperatura de 40 °C que as amostras em água destilada absorveram mais água que as amostras em água salgada. No entanto, outra comparação pode ser feita, das amostras que foram degradadas com UV antes da imersão com aquelas que não foram expostas. Para a maioria das condições de imersão das amostras de compósito que foram combinadas com radiação UV, tem-se um ganho de massa maior que o observado para as amostras não degradadas pela ação combinada. Esse fato condiz com os efeitos provocados pela radiação UV, pois a radiação UV tem potencial para produzir microfissuras na superfície dos materiais poliméricos, sendo que essas microfissuras podem favorecer a entrada de água, aumentando assim, a capacidade de absorção do material (BAZLI *et al.*, 2020; BREBU, 2020). O fato de não se observar o mesmo comportamento nas amostras de adesivo pode ser relacionado ao tamanho da amostra usada que foi menor que a do compósito, havendo assim menor área de exposição aos efeitos da radiação UV.

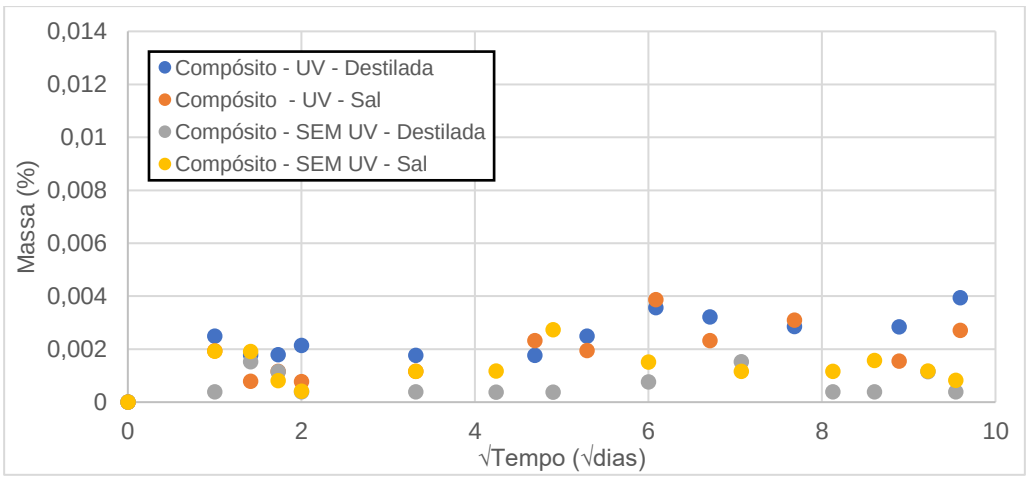
Na Figura 48, tem-se os dados de ganho de massas para os compósitos usados para o teste de tração e que foram imersos na temperatura de 40 °C em (a), temperatura ambiente em (b), e 4 °C em (c). Comparando esses três gráficos, nota-se que os maiores ganhos também ocorrem em 40 °C, e os menores em 4 °C. Outra observação é que as amostras expostas ao UV antes das imersões absorveram mais água que as amostras na mesma condição de imersão. Como já mencionado, este ocorrido pode ser devido à radiação UV gerar micro trincas na superfície do compósito, que atuam como caminhos que facilitam a absorção de água pelo material. Também se percebe, que em todas as condições, as amostras imersas em água destilada absorvem mais água que aquelas imersas em água salgada, mesmo para aquelas expostas ao UV. Isso foi evidenciado por outros pesquisadores que degradaram compósitos com imersões em água destilada e salgada (SOUSA *et al.*, 2019; FANG *et al.*, 2017).



(a) 40 °C

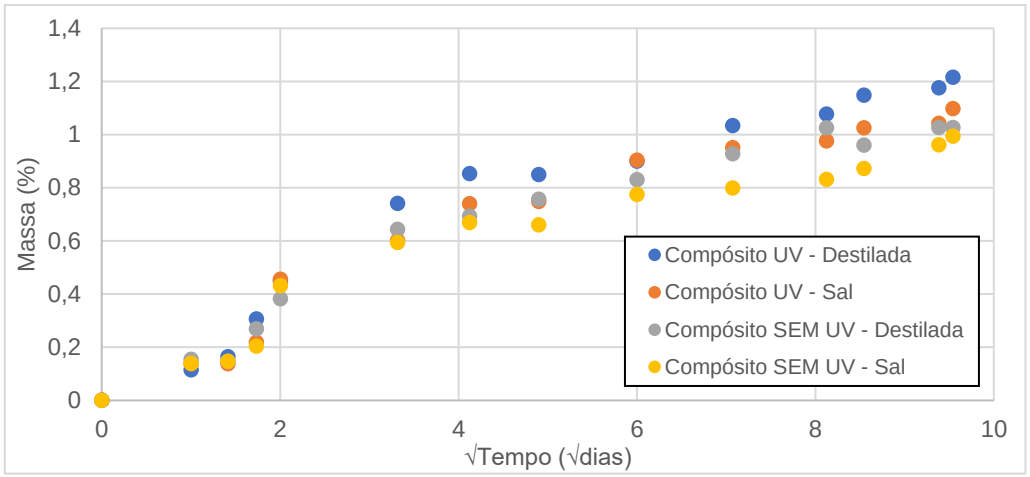


(b) Temperatura ambiente

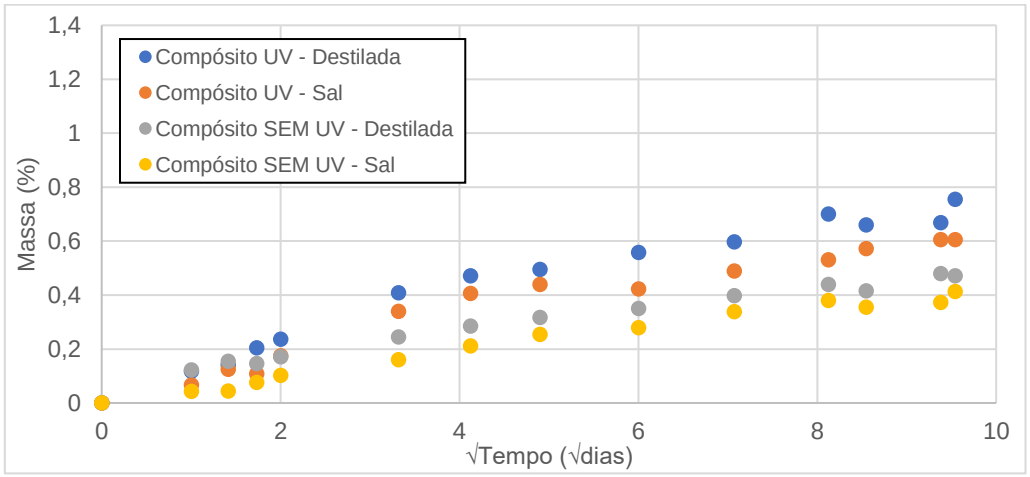


(c) 4 °C

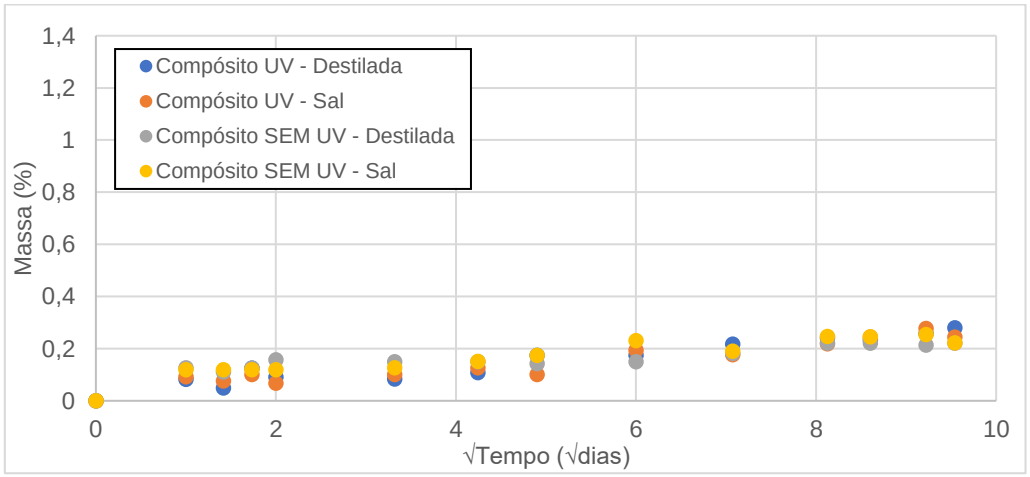
Figura 47 - Variação de massa dos compósitos de flexão imersos em: (a) 40 °C, (b) temperatura ambiente e (c) 4 °C.



(a) 40 °C



(b) Temperatura ambiente

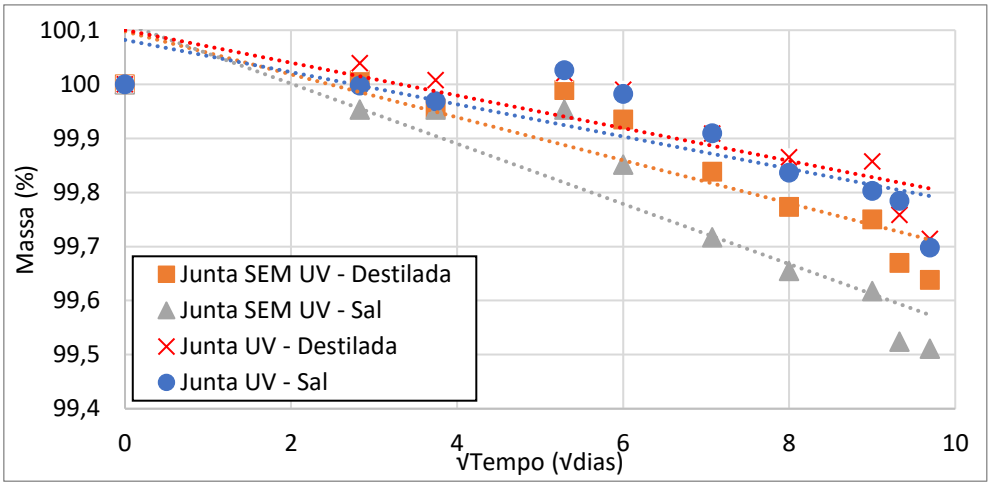


(c) 4 °C

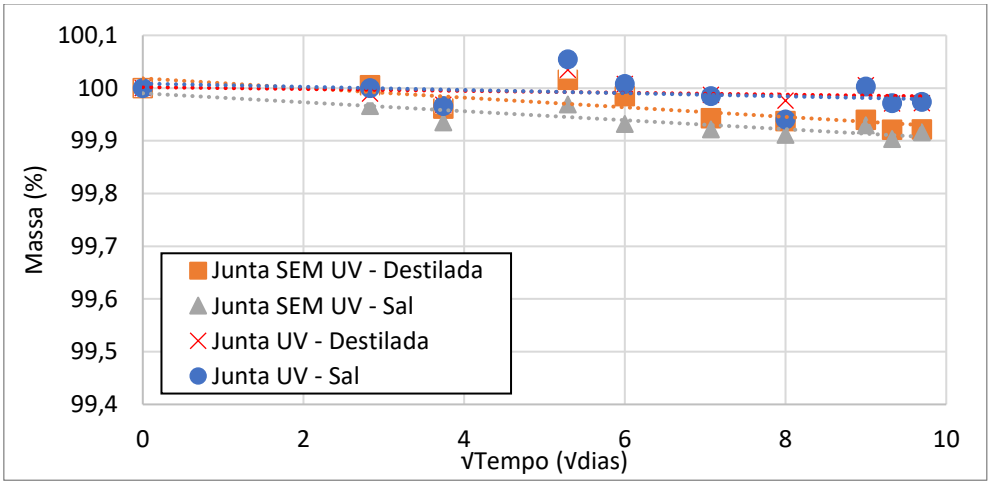
Figura 48 - Variação de massa dos compósitos de tração imersos em: (a) 40 °C, (b) temperatura ambiente e (c) 4 °C.

5.3.1.3. Variação de massa da junta

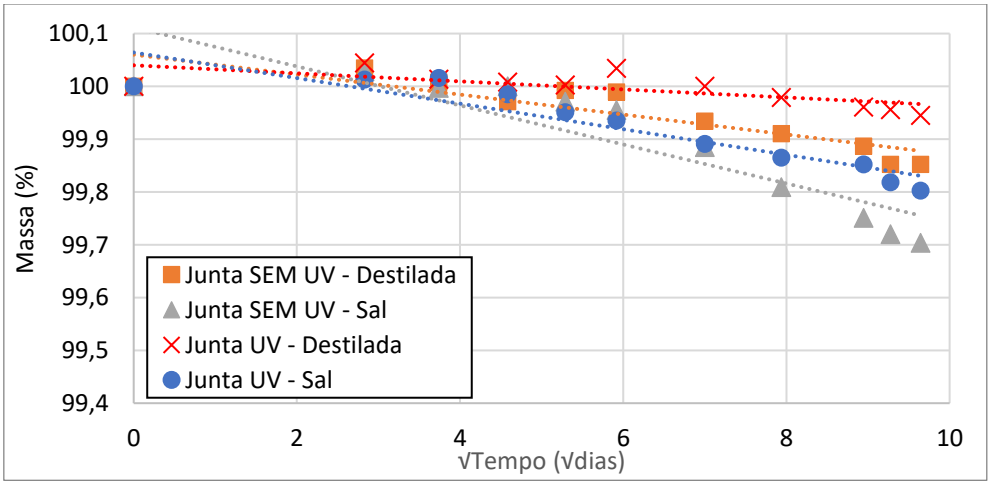
Na Figura 49, tem-se os ganhos de massa das juntas imersas, em (a) na temperatura de 40 °C, em (b) na temperatura ambiente e em (c) na temperatura de 4 °C. Quando comparados esses gráficos com os das outras imersões, observa-se um comportamento oposto ao ocorrido para o adesivo e para o compósito, ou seja, para as juntas tem-se uma redução de massa. Tal fato parece estranho, uma vez que o compósito e o adesivo que são componentes das juntas ganham massa quando imersos. Porém, além destes, as juntas possuem um componente metálico que se degrada quando na presença de umidade. Assim, provavelmente, a corrosão que ocorre no metal durante a degradação gera perda de massa maior que os ganhos oriundos da absorção do adesivo e do compósito da junta. Rocha (2021) também observou redução de massa em suas juntas metal/GFRP que foram degradadas em imersão em água do mar. Eles associaram essa redução a perda de massa no aderente metálico provocada pela corrosão ser maior que a absorção de água ocorrida no compósito. Mesmo havendo redução na massa, nota-se que as juntas que foram expostas à radiação UV possuem menor redução de massa, fato que é condizente com o maior ganho de massa dos compósitos que foram expostos ao UV, conforme observado na imersão individual deste material.



(a) 40 °C



(b) Temperatura ambiente



(c) 4 °C

Figura 49 - Variação de massa das juntas imersas em: (a) 40 °C, (b) temperatura ambiente e (c) 4 °C.

5.3.2. Propriedades mecânicas de tração do compósito imerso

As propriedades mecânicas de tração dos compósitos degradados com imersão são apresentadas na Tabela 11. Já os dados do compósito não degradado e do apenas exposto ao UV foram apresentados na seção 5.1.1, e serão utilizados como referência. O resultado considerado da degradação com exposição apenas ao UV é aquele com 60 dias de exposição, sendo semelhante a radiação total de um ano de exposição UV em Niterói, RJ. Nesta condição de degradação, vale recordar que o compósito teve uma redução de resistência de 13%, apresentando uma resistência à tração de 235,24 MPa. Na Figura 50, tem-se um gráfico de barras com os dados das tensões de tração máximas de todos as condições de imersões propostas, bem como os dados do compósito não degrado e exposto apenas ao UV por 60 dias, buscando facilitar a comparação entre as condições.

Tabela 11 - Propriedades mecânicas do compósito em tração degradado em todas as condições de imersão.

Temperatura de imersão	Condição de imersão	Tensão (MPa)	Máxima deformação (mm/mm)	Módulo de elasticidade E_t (GPa)
40 °C	Água destilada	193,55 ± 14,08	0,0173 ± 0,0013	12,60 ± 0,08
	UV+Água destilada	206,00 ± 4,12	0,0181 ± 0,0006	13,59 ± 0,06
	Água salgada	213,12 ± 4,69	0,0193 ± 0,0004	12,62 ± 0,15
	UV+Água salgada	206,99 ± 10,14	0,0197 ± 0,0013	12,50 ± 0,25
Ambiente	Água destilada	230,18 ± 12,44	0,0196 ± 0,0017	13,78 ± 0,19
	UV+Água destilada	244,55 ± 19,15	0,0194 ± 0,0018	15,00 ± 0,08
	Água salgada	245,88 ± 10,84	0,0196 ± 0,0017	14,70 ± 0,58
	UV+Água salgada	242,08 ± 13,00	0,0191 ± 0,0013	15,19 ± 0,10
4 °C	Água destilada	219,51 ± 13,35	0,0196 ± 0,0017	13,04 ± 0,15
	UV+Água destilada	216,79 ± 7,63	0,0184 ± 0,0006	14,16 ± 0,06
	Água salgada	233,19 ± 9,61	0,0186 ± 0,0009	15,01 ± 0,07
	UV+Água salgada	206,03 ± 14,75	0,0195 ± 0,0016	12,23 ± 0,15

Quando observada a tensão de ruptura das imersões em 40 °C, tem-se, de uma maneira geral, os menores valores. Nessa temperatura, a imersão em água destilada,

a que obteve o menor valor em relação a todas as demais condições de imersão, apresentou redução de 28,5% em relação ao compósito não degradado. Quando essa imersão foi combinada com exposição UV, há uma resistência um pouco maior, mas como os desvios padrão criam intervalos de confiança que se sobrepõem, pode-se dizer que o UV trouxe uma intensificação pouco significativa na degradação combinada com imersão em água. Nessa mesma temperatura, analisando os dados das imersões em água salgada, tem-se que a redução na resistência foi um pouco menor, de 21,2%. Tal fato se deve à menor absorção de água quando imerso em água salgada. Mas quando a imersão foi combinada com exposição ao UV, a redução na resistência foi um pouco maior, 23,5%. O que pode ser relacionado à maior absorção de água que ocorre quando é exposto ao UV, pois a exposição pode gerar micro trincas na superfície que podem facilitar a passagens da água e seus sais e, dessa forma, aumentar a degradação.

Em relação à resistência à tração dos compósitos imersos em temperatura ambiente, de uma maneira geral, há redução de resistência, porém menor que as encontradas nas imersões em 40 °C. Essa diferença é devida à maior absorção de água na temperatura de 40°C. Cabe destacar que, nessa temperatura, as amostras que foram expostas ao UV e submetidas à imersão, tanto nos meios destilado e salgado, apresentaram resistência à tração maior que o compósito exposto apenas ao UV, ou seja, maior que 235,24 MPa. Mesmo assim, os resultados de todas as condições de imersão na temperatura ambiente são próximos e os desvios padrão criam intervalos de confiança que se sobrepõem, mostrando que a combinação do UV com a imersão nesta temperatura não alterou a resistência de forma significativa.

Na literatura, verifica-se que Heshmati *et al.* (2017) degradaram GFRP com imersão em água destilada e salgada na temperatura de 45 e 20°C. Eles também observaram maiores reduções na resistência à tração do compósito quando imerso na maior temperatura e nas imersões em água destilada.

Em 4 °C, os resultados da resistência à tração são maiores que os encontrados para as imersões em 40 °C, o que é devido à menor absorção de água em 4 °C. No entanto, em relação às imersões na temperatura ambiente, que é uma temperatura maior que 4 °C, cerca de 25 °C, os resultados foram menores, mesmo as amostras em 4 °C absorvendo menos água que aquelas que foram imersas em temperatura ambiente. Assim, outro feito pode atuar na degradação do compósito, que é a temperatura baixa. Temperaturas mais baixas fragilizam e aumentam a rigidez da resina da matriz o que reduz a resistência à tração do compósito (RIVERA; KARBHARI, 2002).

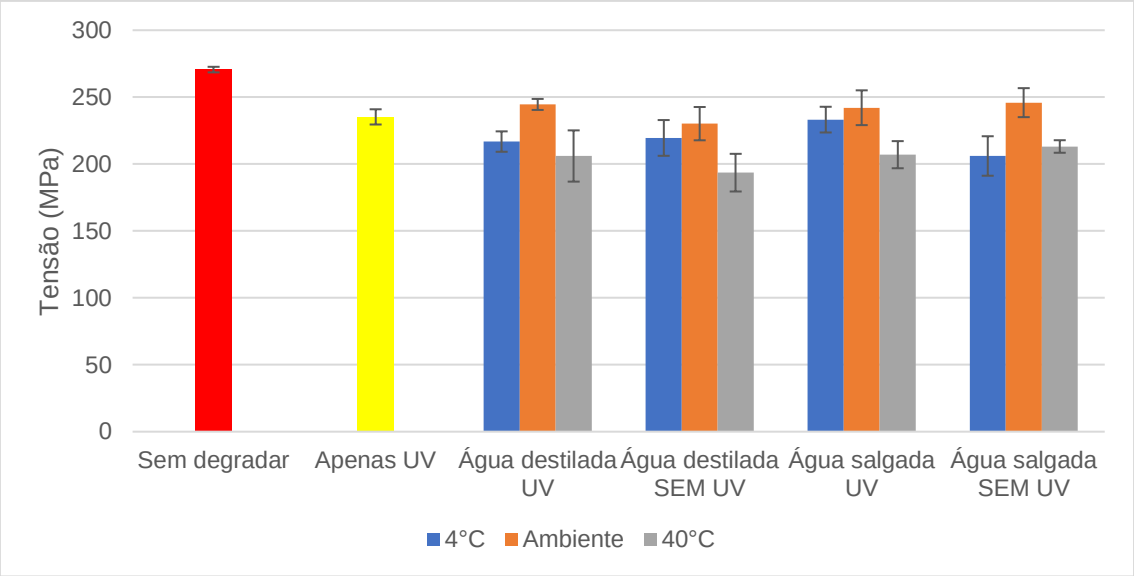
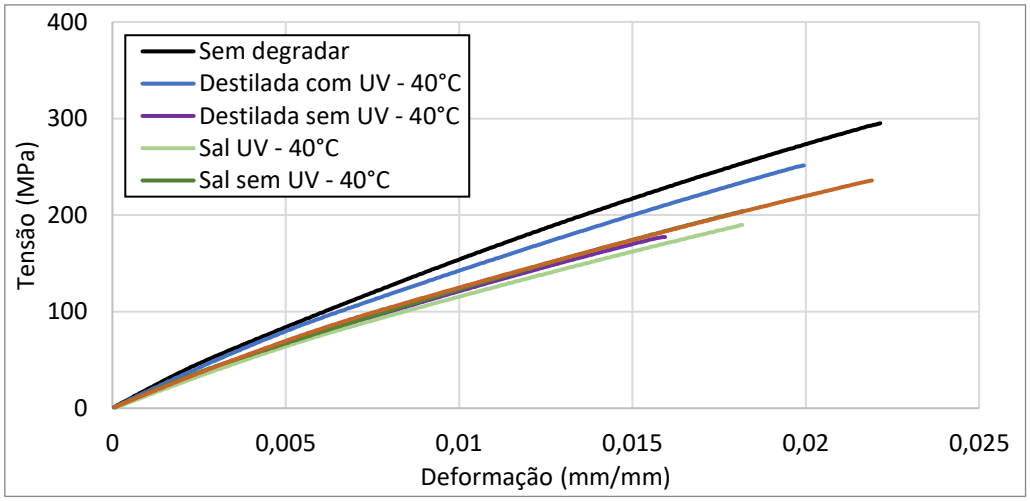
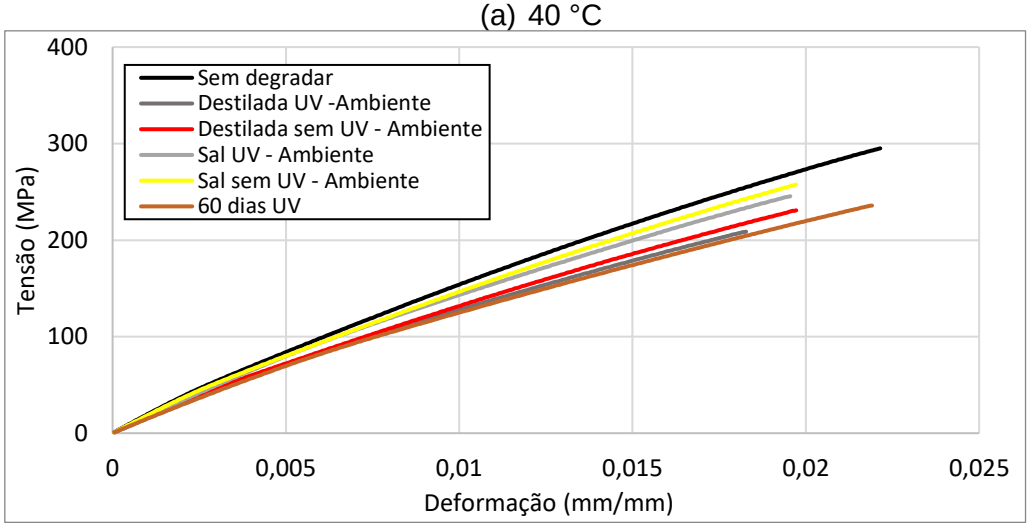


Figura 50 - Média da máxima tensão de tração dos compósitos imersos em água salgada e destilada, e combinados com exposição ao UV.

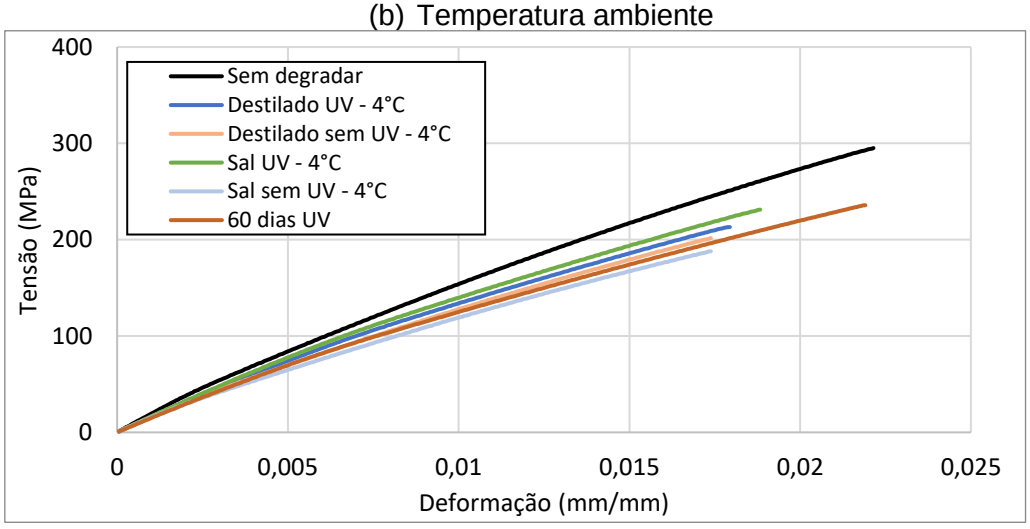
Em relação à deformação, observa-se na Tabela 11 que, após as imersões, os compósitos apresentam redução de deformação, sendo a menor deformação obtida na imersão em água destilada em 40 °C, que também foi a condição de menor resistência à tração. Neste caso, em relação à deformação por tração do compósito sem degradar, que foi 0,0219 mm/mm, houve uma redução de 21%. Essa redução também é nitidamente observada na Figura 51, em que se tem as curvas de tensão e deformação das imersões em 40 °C em a), temperatura ambiente em b) e em 4°C em c). Além das curvas associadas às imersões, tem-se as curvas do compósito não degradado e exposto apenas ao UV para fins de comparação. Nesta figura, é visível a redução na deformação depois da imersão em todas as condições. Essa redução após a degradação em água também foi observada por Yan e Chouw (2015), que avaliaram a resistência à tração em compósitos imersos em água destilada, salgada e básica.



(a) 40 °C



(b) Temperatura ambiente



(c) 4 °C

Figura 51 - Curvas tensão e deformação em tração dos compósitos imersos em: (a) 40 °C, (b) temperatura ambiente e (c) 4 °C.

Assim como a deformação é reduzida, o módulo de elasticidade em tração também sofre uma redução depois de imerso, quando comparado com o compósito não degradado, fato que também é evidenciado na Figura 51. Os menores valores são encontrados nas condições que obtiveram as menores resistências. Essa redução revela que a degradação com as imersões reduziu a rigidez do compósito. A rigidez do compósito é regida principalmente pela rigidez das fibras (*NGUYEN* et al*., 2012 BAZLI* et al*., 2020*), assim não há grandes reduções, sendo as reduções observadas relativas à capacidade da água absorvida degradar a matriz e a interação matriz/fibra, reduzindo com isso o módulo de elasticidade do compósito. A absorção de água gera inchamento do material, criando micro trincas na matriz e degradando a interação matriz/ fibra, esses fatores têm grande influência nas propriedades mecânicas em tração de um compósito (*YAN; CHOUW, 2015*).

5.3.3. Propriedades mecânicas de flexão do compósito imerso

Os compósitos também foram degradados com a finalidade de caracterizar as alterações em suas propriedades de flexão em três pontos com os diferentes tipos de imersão. O limite de resistência à flexão de imersão em todas as condições é apresentado na Tabela 12. Nela, tem-se o limite de resistência em flexão e o módulo de elasticidade. Para comparar essas alterações, na Figura 52, tem-se os resultados do teste de flexão dos compósitos imersos, juntamente com os resultados nas condições sem degradar e exposto apenas à radiação UV. Diferente do que ocorreu para o compósito em tração, após a exposição ao UV, o compósito apresentou aumento de resistência, fato que pode ser relacionado aos efeitos de pós-cura e ao menor efeito das degradações superficiais nos tempos de exposição menores, sendo os efeitos de superfície muito influentes no comportamento mecânico em flexão.

Em relação a imersão em 40 °C, o limite de resistência à flexão apresentou melhoria em relação ao compósito não degradado (242,2 MPa) em todas as condições de imersão, sendo a condição sem UV imersa em água salgada a de menor aumento, com apenas 2,5% em média, apresentando 248,16 MPa. Por outro lado, os resultados obtidos de resistência à flexão na condição de degradação combinada de UV mais imersão, independente do meio ser água salgada ou destilada, foram inferiores ao obtido com o compósito apenas exposto ao UV por 60 dias, ou seja, menores que o

valor médio de 363,53 MPa. Essa redução pode ser associada à absorção da água em função da imersão e pela degradação UV gerar micro trincas na superfície que podem atuar como caminhos para a entrada da água facilitando a sua absorção (LIU *et al.*, 2020). Já o aumento observado nos dois meios de imersão sem a exposição previa do UV pode ser associado à pós-cura proporcionada pela elevação da temperatura. A pós-cura promove o aumento das ligações cruzadas e, consequentemente, da resistência do material. Assim, a melhoria pode ter superado os efeitos de redução provocados pela absorção da água.

Tabela 12 – Limite de resistência à flexão do compósito degradado com imersão.

Condição de imersão	Limite de resistência (MPa)		
	40 °C	Ambiente	4 °C
Água destilada	263,35 ± 9,16	209,93 ± 14,41	194,83 ± 43,43
UV + água destilada	289,58 ± 7,17	296,21 ± 22,38	338,35 ± 14,90
Água salgada	248,16 ± 2,82	235,05 ± 34,73	189,68 ± 38,84
UV + água salgada	294,68 ± 6,45	304,90 ± 13,50	313,95 ± 35,67

Quando o compósito foi imerso em temperatura ambiente, o limite de resistência à flexão foi reduzido em 13,3 e 2,95% nas imersões em água destilada e salgada, respectivamente, em relação ao limite de resistência à flexão na condição sem degradação (242,2 MPa). Todavia, verifica-se uma redução de 42,1 e 35,2%, nesta ordem, em comparação com o compósito exposto apenas ao UV por 60 dias, de resistência à flexão média de 362,52 MPa. Como o compósito foi imerso na temperatura ambiente, aproximadamente a mesma em que ele já estava após ser produzido, uma pós-cura nessa temperatura provavelmente não ocorreu durante a imersão ou, se ocorreu, foi pouco significativa. Assim, os efeitos da degradação pela imersão em água são identificados na redução da resistência à flexão, havendo redução nas imersões não combinadas com UV. Quando a imersão foi combinada com a exposição à radiação UV, houve melhorias em relação ao compósito não degradado, porém menores que as observadas no material exposto apenas ao UV. Em relação ao compósito exposto apenas ao UV por 60 dias (362,52 MPa), há uma redução de 18,3% no valor da resistência à flexão para a condição de degradação com água destilada combinada com

UV. Já para a condição de degradação com imersão em água salgada combinada com UV, redução de 15,9%.

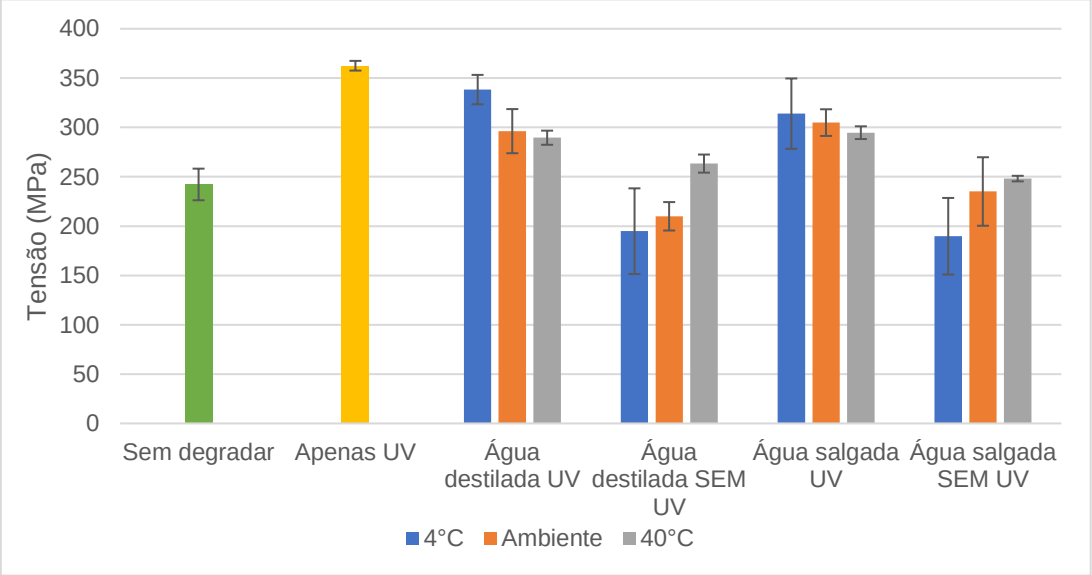


Figura 52 - Média da tensão de flexão dos compósitos imersos em água salgada ou destilada, e expostos ao UV.

Já comparando os resultados da resistência à flexão da condição de imersão em água na temperatura ambiente combinada com UV aos respectivos da condição em 40 °C, verifica-se que as reduções observadas são menores na temperatura ambiente. Isto pois, como já houve a pós-cura devido à exposição UV, observa-se o efeito da temperatura sobre a influência na difusão da água. Assim, em temperaturas maiores, como observado na seção de ganho de massa, a difusão é maior. Portanto, em 40°C mais água é absorvida, logo há mais degradação do compósito que em temperatura ambiente. Portanto, após o UV, tem-se redução maior da resistência em condições de imersão em temperaturas mais elevadas, o que ocorre em 40°C.

A mesma tendência de comportamento se observa quando adotada a temperatura de 4 °C. Ou seja, tem-se valores mais baixos para a condição de apenas imersão em água e valores maiores para a condição de imersão em água combinada com UV. Contudo, é válido observar que, na temperatura de 4 ºC, ocorrem os menores e maiores valores de resistência à flexão em relação a todas as demais condições de degradação da Tabela 12. Em 4 °C obtém-se uma redução, em relação ao compósito

exposto apenas ao UV por 60 dias (362,52 MPa), de 6,7% e 13,4% nas imersões combinadas com UV em água destilada e salgada, respectivamente. Na degradação apenas em imersão, em relação à resistência à flexão do compósito não degradado (242,2 MPa), a redução alcançou valores de 19,56 e 21,7%, em água destilada e salgada, respectivamente.

Analisando de forma integrada os resultados, percebe-se que, com menores temperaturas, independente da imersão ser em água salgada ou destilada, existem as seguintes tendências nos resultados de limite de resistência à flexão:

- Há uma tendência de redução do limite de resistência à flexão na condição de apenas imersão em água;
- Há uma tendência de aumento do limite de resistência à flexão quando na condição combinada de exposição ao UV e imersão em água.

Diante dessas observações, nos resultados com a temperatura de 4 ºC obteve ambos os extremos de mais baixos e mais altos limites de resistência à flexão. As causas e fenômenos físicos envolvendo essas tendências precisam ser melhor investigadas em um estudo mais rigoroso sobre a ação individual de cada agente de degradação. Entretanto, algumas hipóteses podem ser levantadas, conforme listado a seguir.

- Quando o compósito é degradado apenas com a imersão em água, em temperaturas mais elevadas, foram obtidos os maiores resultados de resistência à flexão. Neste caso, a hipótese é que as temperaturas mais altas permitiram algum efeito de pós-cura. Esse efeito, provavelmente, compensou o efeito da alta degradação em função da difusão elevada da água, que tende a ser maior nas temperaturas maiores. Nesta perspectiva, as menores temperaturas não favorecem a pós-cura, restando a redução da resistência em flexão devido à absorção de água. Ademais, como destacado por Rivera e Karbhari (2002), temperaturas baixas geralmente fragilizam o compósito, endurecendo e aumentando a rigidez da matriz. Essa situação extrema, quando associada com imersão em água, pode resultar em redução significativa de resistência à flexão. Isso justifica, por exemplo, o fato de se encontrar as menores resistências em 4 °C quando há somente imersão em água.
- Nas condições de degradação de exposição ao UV combinadas com imersão em água, há a obtenção dos maiores valores de resistência à flexão nas

> temperaturas mais baixas. Essa ocorrência pode ser relacionada ao fato da exposição ao UV ter permitido um efeito de pós-cura no compósito e a um possível aumento da ductilidade pela maior absorção de água na superfície em função do UV. O efeito de pós-cura melhorou a resistência à flexão dos compósitos expostos ao UV. Adicionalmente, uma maior absorção de água ocorreu na superfície pelo surgimento de microfissuras por conta da ação do UV. Este aumento de água na superfície do material pode fazer com que os efeitos do endurecimento da resina devido às baixas temperaturas sejam minimizados, uma vez que a absorção de água aumenta a ductilidade. Neste aspecto, os efeitos da degradação na superfície são mais significativos nas alterações da resistência mecânica em flexão (SOUSA; CORREIA; CABRAL-FONSECA, 2016). Logo, os efeitos da fragilização da resina em função da baixa temperatura são minimizados na superfície. Já os efeitos de pós-cura, proporcionados pela exposição ao UV, fazem com que, nas temperaturas mais baixas, se obtenham as melhores resistências à flexão.

Ao se buscar fatos na literatura, a maior parte dos trabalhos não realiza imersões em temperaturas baixas, mas focam em estudar os efeitos da exposição em temperatura ambiente (25 ºC) e mais elevadas, geralmente perpassando a região de transição vítrea da matriz do compósito estudado (HESHMATI; HAGHANI; AL-EMRANI, 2017; SOYKIK, 2017; SOUSA *et al.*, 2019). Alguns autores focam em caracterizar compósitos em temperaturas abaixo de zero ou em ciclos de temperatura variadas entre ambiente e abaixo de zero, por conta de aplicações em ambientes ou locais que exibem esse intervalo de temperaturas sazonais ao longo do ano (RIVERA; KARBHARI, 2002). O que se verifica nesses trabalhos é que a condição cíclica de temperatura e as imersões tendem a trazer maiores degradações, sobretudo em água salgada, com pioras nas propriedades mecânicas, comumente avaliadas em testes de tração e compressão. O ponto em questão é que o efeito da exposição combinada ao UV não é comumente avaliado nesses estudos. Neste panorama, uma investigação mais rigorosa sobre a ação individual de cada agente de degradação é necessária quando analisada a condição combinada de UV e imersão em água em diferentes temperaturas. As principais hipóteses foram suscitadas nos parágrafos anteriores.

Na Tabela 13, tem-se o módulo de elasticidade em flexão obtido após as degradações com imersão. Como já visto na seção 5.1.1.1, o compósito não degradado apresenta, em média, o módulo de elasticidade de 15,44 GPa e, após exposição ao UV

por 60 dias, de 16,66 GPa. De uma maneira geral, não houve alterações de módulo de elasticidade significativas. Quase todos os módulos foram menores que o módulo do compósito apenas exposto ao UV, mostrando que a absorção de água reduz a rigidez em flexão do material. A exceção foi a condição de imersão em água destilada em 40 °C sem a combinação com exposição UV, pois esta apresentou o maior módulo de elasticidade de flexão, com 17,25 GPa. Comparando as mesmas condições de imersão com aquelas que foram combinadas com exposição ao UV, pode-se notar uma tendência das amostras que foram combinadas com exposição UV apresentarem, em média, módulos maiores do que aquelas que não foram expostas ao UV. Fato coerente, pois o compósito exposto apenas ao UV apresenta módulo maior que o compósito não degradado. Logo, espera-se que as amostras que foram combinadas com exposição UV apresentem maior módulo.

Tabela 13 – Módulo de elasticidade em flexão do compósito degradado com imersão.

Condição de imersão	Módulo de elasticidade de flexão - E_f (GPa)		
	40 °C	Ambiente	4 °C
Água destilada	17,25 ± 1,04	14,72 ± 1,14	14,60 ± 1,00
UV + água destilada	15,00 ± 0,68	14,60 ± 0,89	15,85 ± 0,85
Água salgada	15,04 ± 0,31	13,67 ± 2,19	14,75 ± 3,07
UV + água salgada	16,49 ± 1,37	16,60 ± 1,82	15,65 ± 0,40

5.3.4. Teste de cisalhamento das juntas degradadas por imersão

Os resultados mecânicos dos testes de cisalhamento das juntas degradadas nas condições de imersão são apresentados na Tabela 14. Esses resultados são comparados com os resultados obtidos das propriedades mecânicas de cisalhamento das juntas não degradas e degradadas apenas com a exposição UV por 60 dias, conforme apresentado na subseção 5.1.2.1. Esses são plotados no gráfico da Figura 53, juntamente com os dados da resistência ao cisalhamento das juntas imersas. Estes dados são importantes para a compreensão do efeito da imersão no comportamento da junta, distinguindo o efeito do UV, visto que, em algumas condições, o UV é associado

à imersão. O resultado de tensão máxima de cisalhamento das juntas não degradadas foi 12,96 MPa e, quando expostas ao UV por 60 dias, de 10,66 MPa, ou seja, 17,7% menor. O deslocamento máximo e a rigidez também são resultados discutidos no final desta seção.

Tabela 14 - Propriedades mecânicas de cisalhamento das juntas degradadas com imersão em todas as condições.

Temperatura de imersão	Condição de Imersão	Deslocamento máximo (mm)	Tensão (MPa)	K (kN/mm)
40 °C	Água destilada	2,57 ± 0,26	11,78 ± 0,52	5,00 ± 0,69
	UV + Água destilada	1,86 ± 0,16	10,64 ± 0,16	6,71 ± 0,41
	Água salgada	2,45 ± 0,01	11,98 ± 0,35	6,10 ± 0,27
	UV + Água salgada	2,08 ± 0,30	10,59 ± 0,92	5,66 ± 0,78
Ambiente	Água destilada	2,32 ± 0,13	12,70 ± 0,36	5,65 ± 0,69
	UV + Água destilada	2,20 ± 0,22	11,85 ± 0,08	6,54 ± 1,00
	Água salgada	2,75 ± 0,06	13,37 ± 0,29	4,45 ± 0,56
	UV + Água salgada	2,06 ± 0,03	10,77 ± 0,27	5,94 ± 0,39
4 °C	Água destilada	2,42 ± 0,004	13,35 ± 0,29	6,73 ± 0,31
	UV + Água destilada	1,78 ± 0,09	10,49 ± 0,65	7,29 ± 0,21
	Água salgada	2,65 ± 0,28	13,63 ± 0,53	6,27 ± 0,66
	UV + Água salgada	1,53 ± 0,13	10,38 ± 0,01	7,37 ± 0,47

Quando as juntas foram apenas imersas em água na temperatura de 40 °C, sem degradação por UV, tem-se, para o limite de resistência ao cisalhamento, pela imersão na água destilada uma redução de 9,1% e, pela imersão na água salgada, uma queda de cerca de 7,6%, considerando a tensão de cisalhamento da junta não degradada (12,96 MPa). A pequena diferença de redução da tensão de cisalhamento entre os dois meios de imersão, água destilada e água salgada, pode ser associada à quantidade de água absorvida nesses dois casos. Esse fato está de acordo com a literatura, pois é reportado por outros autores que a umidade geralmente causa uma redução na resistência mecânica do material (VIANA G *et al.*, 2017; BANEA *et al.*, 2011; DA SILVA L, 2007; GU *et al.*, 2021; KADIOGLU; PUSKUL, 2016). A absorção de água reduz a Tg, causa plastificação e inchamento do adesivo, fenômenos que reduzem a resistência

mecânica da junta (PANG *et al.*, 2019; NGUYEN *et al.*, 2012; HEGDE; SHENOY; CHETHAN, 2019; GHOLAMI *et al.*, 2013). Ademais, como observado na seção 5.3.1, amostras de adesivo e compósito absorveram mais água quando imersas em água destilada do que quando imersas em água salgada. Em concordância, houve uma menor redução de resistência nas amostras imersas em água salgada.

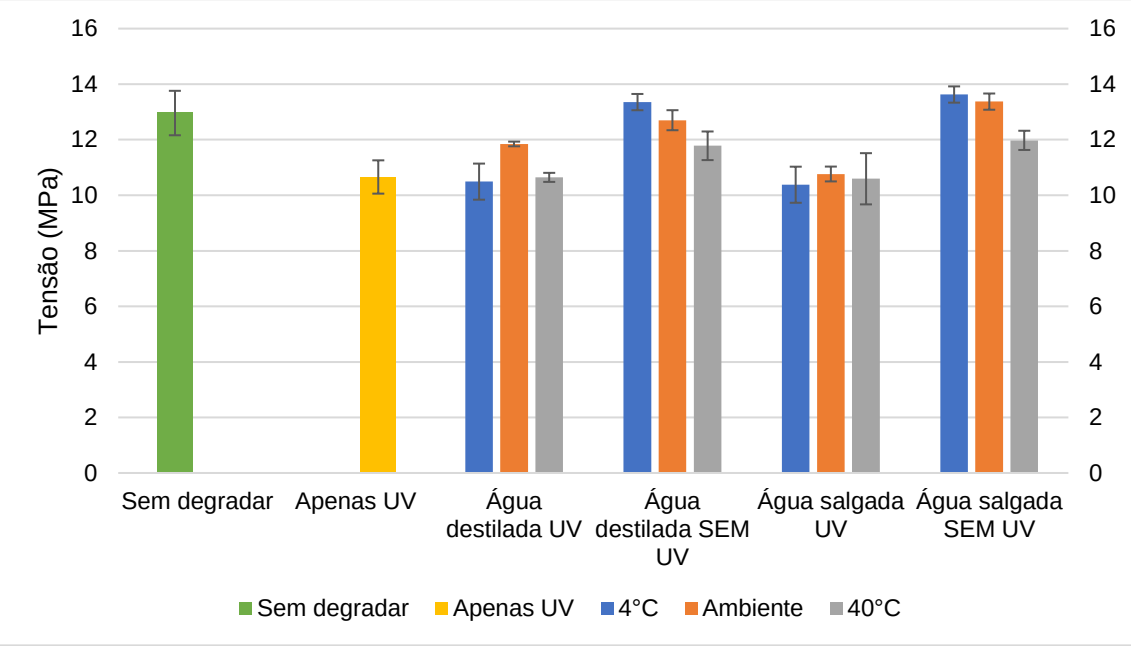


Figura 53 – Média da tensão de cisalhamento das juntas imersas em água salgada e destilada, combinada com exposição UV.

Quando a imersão em 40 ºC foi combinada com a exposição UV, a redução da resistência ao cisalhamento foi maior, porém com valores próximos aos obtidos para a junta exposta apenas ao UV por 60 dias, isto é, valores próximos de 10,66 MPa. Isso revela que, neste caso, essa combinação não trouxe uma degradação significativamente mais intensa que somente a exposição ao UV, sem imersão. Já quanto aos efeitos do meio de imersão, destilado ou salgado, na temperatura de 40 °C também não se observa diferenças muito significativas entre os resultados com exposição ao UV.

Quando as juntas foram apenas imersas em água na temperatura ambiente, sem degradação por UV, em relação à resistência ao cisalhamento da junta sem degradar (12,96 MPa), foram obtidos valores similares, uma melhoria de 3,2% na imersão em

água salgada e uma redução de 2% na imersão em água destilada. Em relação à diferença entre as resistências ao cisalhamento, obtidas da imersão em meios diferentes: água salgada e destilada, pesquisadores observaram que seus materiais absorvem menos a água salgada que a água destilada (SOUSA *et al.*, 2019 FANG *et al.*, 2017). Portanto, se justifica a diferença de redução de resistência ao cisalhamento, novamente, pela maior absorção quando se imerge em água destilada.

Pela combinação de exposição à radiação UV com imersão em água na temperatura ambiente, há uma redução de 8,6% e de 16,9% para as imersões em água destilada e salgada, respectivamente, em relação à resistência ao cisalhamento da junta sem degradar (12,96 MPa). Essas reduções são menores que a obtida quando exposto apenas ao UV por 60 dias, ou seja, foram obtidos valores de resistência ao cisalhamento maiores que 10,66 MPa. Isso quer dizer que, com a imersão em água, uma parte dos efeitos da radiação UV foram minimizados, mostrando que a absorção da água em temperatura ambiente pode resultar em melhorias nas propriedades mecânicas.

Já na temperatura de 4 °C, as amostras que foram apenas imersas em água apresentaram um pequeno aumento na tensão de resistência ao cisalhamento, sendo de 3% e 5,2% para as imersões em água destilada e salgada, respectivamente. Quando as amostras foram expostas ao UV antes da imersão em 4 °C, a tensão de resistência ao cisalhamento foi próxima à obtida para as juntas apenas expostas ao UV por 60 dias, próximas de 10,66 MPa, variando menos de 3%. Em relação aos efeitos dos meios de imersão, na temperatura de 4 °C as diferenças entre a imersão em água destilada e salgada não foram muito significativas na resistência ao cisalhamento. Ao mesmo tempo que nesta temperatura foram gerados os melhores resultados de resistência ao cisalhamento, a imersão nesta temperatura, quando associada ao UV, também produziu o pior cenário de redução da resistência ao cisalhamento.

Analisando de forma integrada os resultados, considerando apenas as condições de degradação sem exposição ao UV, podendo ser observado melhor pela Figura 53, tem-se que as temperaturas maiores resultaram nas menores tensões de cisalhamento suportadas, ou seja, em 40 °C tem-se os menores valores e, em 4 °C, os maiores. As diferenças de resultado para as diferentes temperaturas adotadas podem ser relacionadas à influência da temperatura na difusão da água no material, que, como observado nos dados da absorção de água para o adesivo e para o compósito, a absorção foi maior na temperatura de 40 °C e menor em 4 °C. Assim, as juntas imersas

em 40 °C devem apresentar as menores resistências e, as imersas em 4 °C, as maiores, fato que foi observado.

O fato observado no parágrafo anterior não é uma realidade nos resultados obtidos nas condições de degradação combinando imersão em água e exposição ao UV. Ou seja, as amostras em 4 °C apresentam os menores resultados médios e, as imersas na temperatura ambiente, os melhores. Apesar disso, deve se destacar que os desvios se sobrepõem, sendo os resultados das imersões combinadas com UV muito semelhantes, exceto para a condição de imersão em água destilada na temperatura ambiente. Quando exposto ao UV, as degradações tendem a ser maiores e menores tensões de cisalhamento máximas são apresentadas. Todavia, o efeito da degradação UV parece não estabelecer uma relação proporcional ou dependente da temperatura de imersão.

Ainda analisando de forma integrada os resultados, pode-se destacar que as amostras imersas em água salgada apresentaram tensões um pouco maiores que aquelas imersas em água destilada para a mesma condição, quando consideradas apenas as condições de degradação sem exposição ao UV. O mesmo comportamento não foi observado quando as amostras foram imersas após exposição à radiação UV. Nesses casos com a ação combinada do UV, os valores médios de tensão de cisalhamento obtidos na condição de imersão em água salgada são ligeiramente piores que os obtidos das imersões em água destilada, apesar de semelhantes para quase todas as condições. A exceção é a condição de imersão em água destilada na temperatura ambiente, que apresentou o melhor resultado dentre todos os casos em que a imersão foi combinada com a exposição UV. Esse comportamento pode ser relacionado ao fato de os cátions e ânions do NaCl, dissolvidos na água, poderem ser absorvidos junto com a água, causando danos à matriz, fibra e sua interface (YAN; CHOUW, 2015). Assim, a exposição UV pode facilitar a absorção desses íons e, com isso, intensificar a degradação em algum nível.

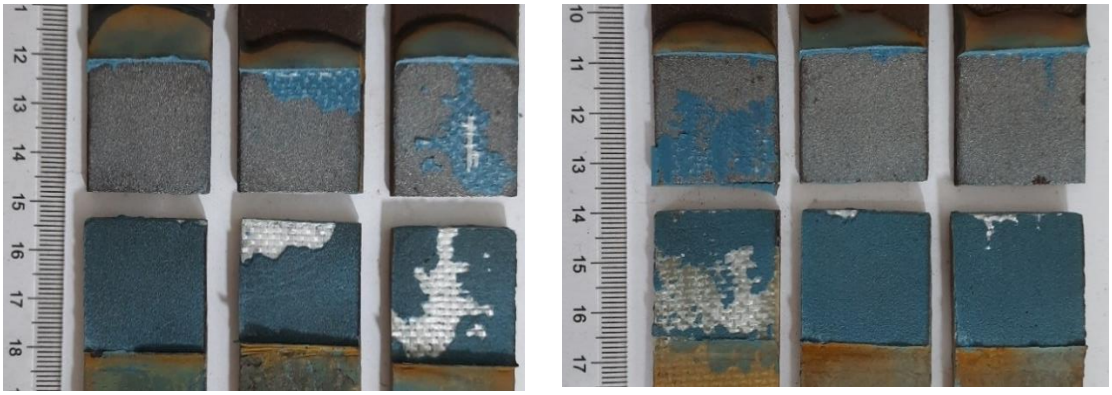
Em relação aos deslocamentos máximos, quando a junta não foi degradada, o deslocamento alcança o valor médio de 2,17 mm, caindo para 1,52 mm após 60 dias de exposição ao UV, redução de aproximadamente 30%. Como já destacado, essa redução é associada à pós-cura, que aumenta o número de ligações cruzadas e, consequentemente, reduz a mobilidade. Quando as juntas foram imersas, o valor do deslocamento, no geral, aumentou para todos os meios de imersão e temperaturas, alcançando o maior valor em imersão em água salgada na temperatura ambiente, valor

27% maior que o da junta não degradada. Esse aumento de deslocamento é devido ao aumento da ductilidade do adesivo com a absorção da água, que aumenta a sua mobilidade (BUDHE; BANEA; DE BARROS, 2018; BORGES *et al.*, 2020 GUALBERTO, 2021). Tendo em vista esse aumento, espera-se que as juntas que foram degradadas combinando com exposição UV ganhem algum aumento de deslocamento. Tal fato ocorreu para todas as condições de imersão combinada, sendo observados os menores deslocamentos na temperatura de 4 °C, que mesmo apresentado os menores deslocamentos, ainda foram superiores ao deslocamento médio obtido para as juntas apenas expostas ao UV.

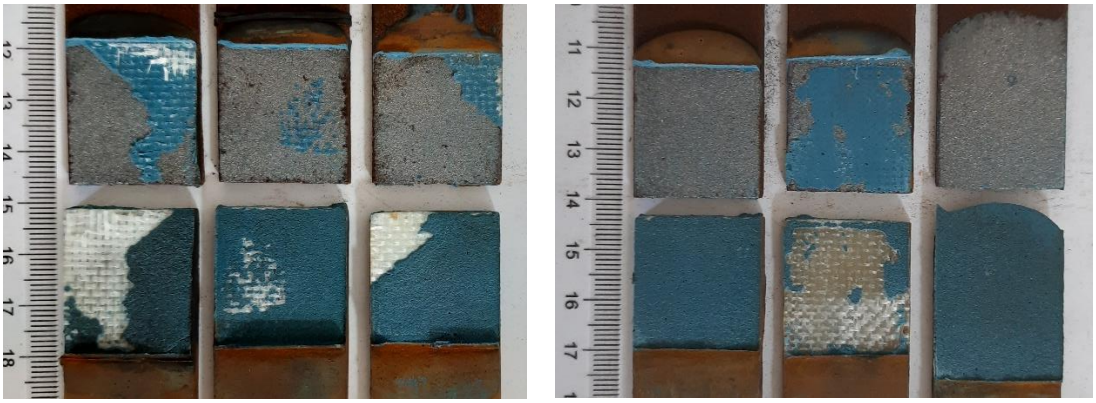
A rigidez da junta é de 6,43 GPa quando não degradada e de 7,44 GPa quando exposta apenas ao UV por 60 dias. Pela Tabela 14, nota-se um aumento da rigidez quando há imersão combinada com UV em relação à rigidez da junta não degradada. Já quando apenas degradado por imersão em água, há uma redução quando comparado com a rigidez da junta não degradada. O aumento da rigidez possui relação com a redução do deslocamento máximo, causado pelo efeito de pós-cura associado às temperaturas mais altas e à exposição ao UV. Já a redução devida à absorção de água é a que favorece a mobilidade e aumenta o deslocamento. Assim, a combinação do UV com a imersão resulta em uma rigidez intermediaria. A exceção foi a temperatura de 4 °C, em que as amostras não expostas ao UV apresentaram rigidez um pouco maior que a das juntas não degradadas, pois, em 4 ºC, as juntas apresentaram as maiores tensões médias.

5.3.5. Análise do modo de falha das juntas degradadas por imersão

Budhe *et al.* (2017) observaram que o percentual de umidade absorvida tem influência sobre o modo de falha das juntas, podendo alterar de uma falha adesiva para coesiva. Como as condições de imersão provocam alterações na absorção de umidade, por conseguinte, podem ocorrer mudanças nos modos de falha. Esta seção destina-se a avaliar o modo de falha para cada condição de imersão proposta.



(a) Água destilada (b) Água destilada + UV

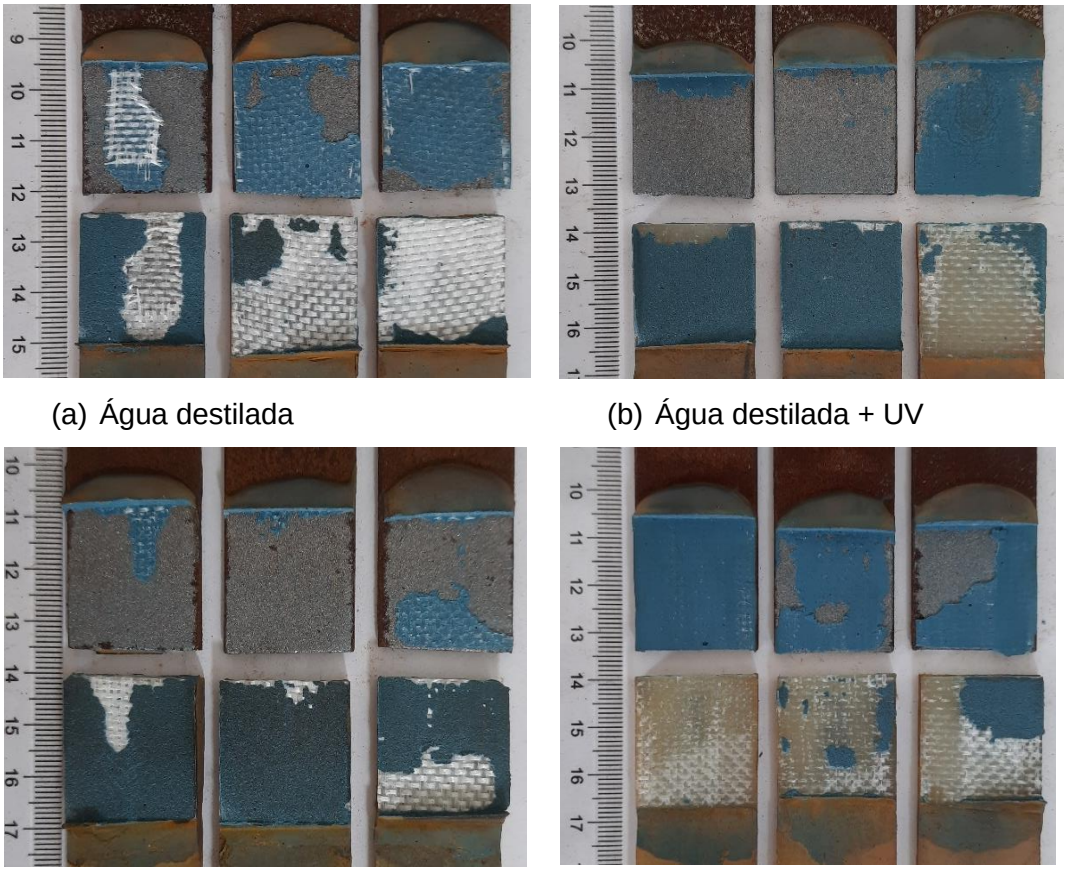


(c) Água salgada (d) Água salgada + UV

Figura 54 - Aderentes metálico e compósito das juntas ensaiadas em cisalhamento imersas em água destilada e salgada em 40 °C por 90 dias.

Na Figura 31, apresentou-se os modos de falhas ocorridos nas juntas não degradadas e das juntas expostas ao UV por 60 dias. Quando não degradadas, as falhas ocorrem predominantemente no compósito, arrancando as primeiras camadas. Já quando foi exposta ao UV, a falha passou a ocorrer na interface com o metal, resultando em um modo de falha adesiva. Esse fato é coerente com a literatura, uma vez que outros autores reportam encontrar aumento do percentual de falha adesiva com o tempo de degradação (GIAMPAOLI *et al.*, 2017 HESHMATI; HAGHANI; AL-EMRANI, 2017 STAZI *et al.*, 2015 SOUSA *et al.*, 2019). Nas Figura 54, Figura 55 e Figura *56*, tem-se os modos de falha das juntas imersas nas temperaturas de 40 °C, ambiente e 4 °C, respectivamente. De uma maneira geral, observa-se a existência de falha mista, ou seja, há falha adesiva na interface com o metal e falha do compósito em diferentes níveis. Em 40 °C, sem a exposição ao UV, tem-se na Figura 54 falha do compósito, com falha de delaminação das primeiras camadas. Já quando as juntas foram expostas antes

da imersão ao UV, o percentual de falha do compósito diminuiu e a falha no compósito passou a ser superficial. Hunter-Alarcón *et al.* (2018) observaram a delaminação do compósito com a absorção da água, fato também contemplado nas degradações imersas neste trabalho.



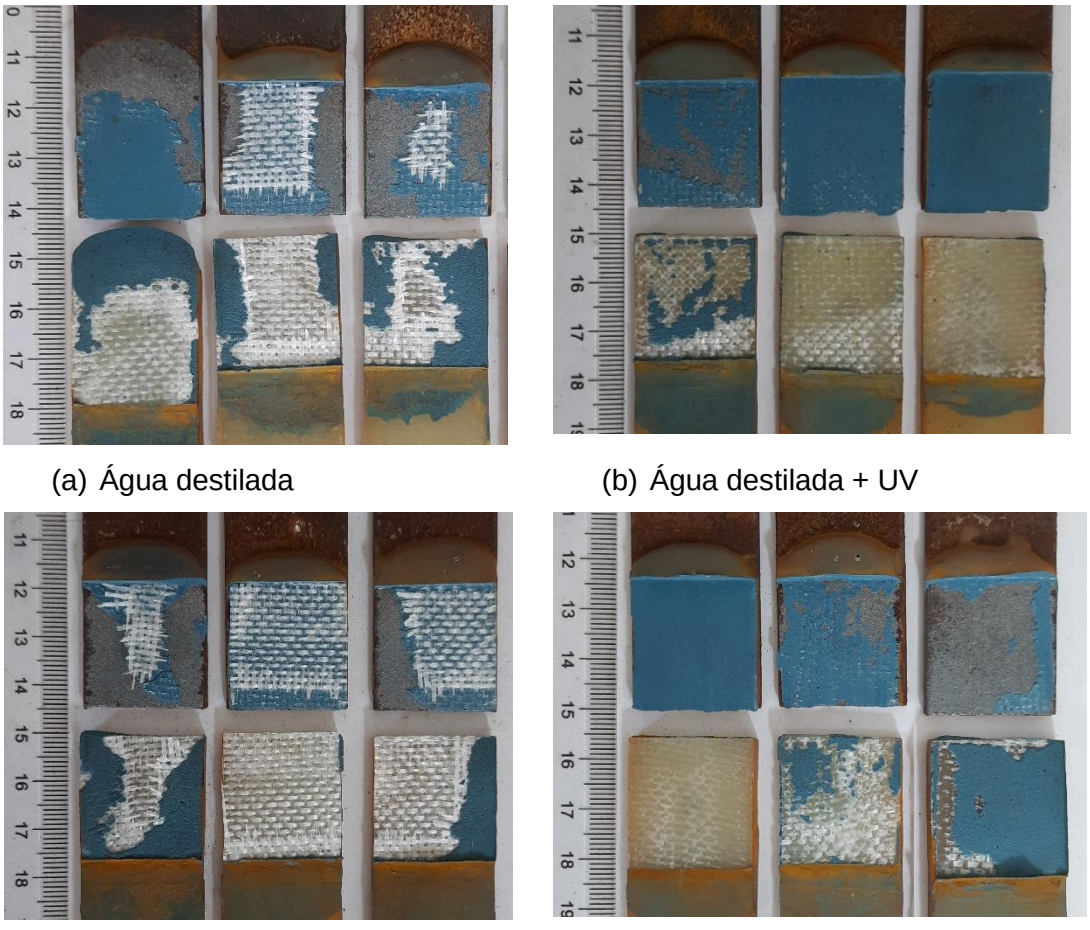
(a) Água destilada (b) Água destilada + UV

(c) Água salgada (d) Água salgada + UV

Figura 55 - Aderentes metálico e compósito das juntas ensaiadas em cisalhamento imersas em água destilada e salgada em temperatura ambiente por 90 dias.

À medida que foi reduzida a temperatura de imersão, há menos mudanças nos modos de falha em relação às juntas não degradadas, como observado nas Figura 55 e Figura 56. Há maior quantidade de falha de delaminação do compósito, principalmente na temperatura de 4 °C. No entanto, quando comparada às juntas expostas ao UV, tem-se a mudança de uma falha adesiva no metal para uma falha na interface com o compósito após a imersão. Por se tratar de juntas dissimilares, a ação da água também favorece a degradação do aderente metálico pela corrosão, como pode ser observado

nas figuras apresentadas. O aderente metálico, que foi imerso, está corroído e há corrosão permeando na região colada. As juntas que foram expostas ao ambiente externo também apresentaram aumento de corrosão que permeou entre a interface metal adesivo, reduzindo a resistência da junta e gerando uma falha adesiva. Assim, a imersão tende a provocar esse mesmo efeito e favorecer a falha adesiva na interface com metal. Deste modo, quando a imersão foi combinada com UV, há os efeitos da exposição ao UV e da corrosão que favorecem a falha adesiva com o metal e os efeitos da umidade que favorecem a falha de delaminação do compósito. Esta condição de degradação combinada resultou em uma falha mista (falha adesiva no metal e falha do compósito), sendo observada a redução da falha do compósito, passando para uma falha na superfície do compósito.



(a) Água destilada (b) Água destilada + UV

(c) Água salgada (d) Água salgada + UV

Figura 56 - Aderentes metálico e compósito das juntas ensaiadas em cisalhamento imersas em água destilada e salgada em 4 °C por 90 dias.

Conclusão

Nesta tese, juntas simples aço/GFRP coladas com adesivo epóxi foram degradadas de diversas formas, em especial com exposição à radiação UV. O objetivo principal foi avaliar os efeitos da radiação UV no comportamento da junta a longo prazo de exposição deste agente. Além disso, também foi estudado como a exposição UV pode influenciar a degradação hidrotérmica, visto que a radiação pode facilitar a absorção da água pelo material. A degradação das juntas em um ambiente externo também foi realizada para expô-las a uma condição real em que se tem diversos agentes de degradação atuando. Portanto nesta tese foram realizados três tipos de degradação: exposição UV, exposição externa e degradação hidrotérmica, sendo esta última combinada com exposição UV. Nos próximos parágrafos serão comentados os principais fatos identificados no trabalho e a sua contribuição.

Considerando a degradação com exposição UV, as juntas e os materiais dos seus componentes foram expostos por um período de até 180 dias de exposição artificial na câmara projetada, o que equivale a três anos de exposição à radiação solar, aproximadamente. Tal período é bastante superior ao proposto por outros pesquisadores. Esse longo período permitiu evidenciar a importância de se estudar os efeitos da degradação UV ao longo do tempo. Inicialmente houve uma redução da resistência ao cisalhamento da junta, que alcançou 32,5% de redução com 90 dias de exposição. Porém em maiores tempos de degradação, foi observada uma tendência de melhoria, visto que partir de 90 dias as juntas apresentam ligeiro aumento de resistência.

Em relação aos efeitos da radiação UV no comportamento mecânico do compósito, foram observadas influências distintas na resistência à tração e à flexão. Na tração, a radiação gerou redução de resistência já nos primeiros 30 dias, alcançando o menor valor em 90 dias, cerca de 18,7% menor, nos tempos seguintes tem-se reduções menores que a observada em 90 dias, levando a perceber uma tendência de melhora. Já em flexão, os compósitos apresentaram melhoria da resistência, alcançando o maior aumento (54,1%) em 30 dias, seguido de menores aumentos à medida que o tempo de exposição aumentou. Essa diferença de comportamento foi associada ao fato da degradação UV atuar superficialmente, sendo alterações superficiais mais influentes no comportamento em flexão. Portanto, ficou evidenciado que o tempo de degradação adotado nos estudos é importante para compreender o comportamento do material

quando degradado, pois maiores tempos permitem verificar se os efeitos que geram redução na resistência superaram os que melhoram ou o efeito contrário.

Em relação à degradação externa, em função da presença de diversos agentes de degradação, esta foi bem agressiva já nos primeiros 30 dias de exposição, apresentando queda máxima da tensão de cisalhamento da junta de 59,6% em 180 dias de exposição. Apesar da grande redução de resistência observou-se uma estabilidade, mostrando que a degradação alcançou um limite. Pela observação das regiões de falha, foi evidente a presença de corrosão, fato que já é presente desde os menores tempos de exposição, sendo reportado na literatura como um fator influente na resistência das juntas. A degradação externa gerou uma redução de resistência da junta maior que a degradação apenas com UV. Além disso, na literatura, não se verificou trabalhos que expõe os materiais a ambientes externos com maresia. Este tópico da tese contribuiu para evidenciar uma condição de degradação externa que favorece a corrosão e que tem potencial para redução da resistência de juntas com aderentes metálicos. Logo, a compreensão desta condição pode auxiliar a aplicação de reparos com adesivos em estruturas metálicas marítimas, por exemplo.

A análise da degradação provocada pelas imersões em água destilada e salgada nas temperaturas de 4 °C, ambiente e 40 °C evidenciaram que mesmo o adesivo e compósito individualmente aumentarem de peso devido a absorção de água, as juntas apresentam redução de peso, devido a perda de massa do aderente metálico que sofre corrosão com a imersão. Quando houve a combinação com a exposição ao UV antes das imersões, notou-se maior absorção de água pelos materiais imersos que quando não irradiado anteriormente. Tal fato revelou que a radiação UV facilitou a absorção da água em função da sua capacidade de gerar micro trincas na superfície dos polímeros.

Apesar disso, a ação combinada com UV não alterou significativamente os resultados da resistência ao cisalhamento das juntas, mas trouxe alterações no modo de falha das juntas. Nas demais degradações, o que era visto era predominância de falha adesiva na interface com o aderente metálico quando a junta era degradada. Na imersão sem a exposição UV, o modo de falha foi misto, com presença de falha de delaminação das primeiras camadas do compósito. Quando a imersão foi combinada com UV, passou-se a observar presença de falha adesiva na interface com o compósito, principalmente nas menores temperaturas. Portando, a exposição UV combinada com a imersão, é capaz de aumentar a absorção de água e alterar o modo de falha das juntas.

Muitos pesquisadores propõem degradar artificialmente seus materiais com UV utilizando câmaras que combinam exposição UV com condensação. No entanto, a maioria não estuda a ação individual de cada agente, o que permite distinguir o que são efeitos gerados por cada agente e efeitos que são intensificados ou minimizados pela ação combinada dos agentes de degradação. Assim, este trabalho permitiu comparar os efeitos apenas do UV, e das imersões individualmente com os efeitos das ações combinadas. Além disso, a temperatura de 4 °C, uma temperatura fria, não é abordada na literatura como uma temperatura a ser associada com imersão em água. No entanto, se mostrou capaz de gerar condição de degradação em imersão mais expressiva que a imersão em temperatura mais elevada.

Cabe destacar, como fruto deste trabalho, a construção da câmara de degradação UV, que foi de suma importância para o desenvolvimento da pesquisa, visto que o CEFET/RJ não dispõe de uma câmara de envelhecimento acelerado. A câmara projetada é semelhante à de outros pesquisadores que já desenvolveram pesquisas utilizando projetos semelhantes. O projeto permite emitir, em 60 dias ininterruptos de exposição à radiação, o equivalente a expor os materiais a 1 ano à radiação do sol.

Ao final, desta pesquisa cinco artigos já foram publicados, sendo o primeiro uma revisão da literatura (GUALBERTO; DO CARMO AMORIM; COSTA, 2021) que motivou o trabalho desta tese publicado na *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. O segundo, que abordou a degradação UV no comportamento das juntas (GUALBERTO *et al.*, 2023), foi publicado no *The Journal of Adhesion*. Um artigo, sobre o projeto da câmara UV, foi apresentado no Encontro de Ciência e Tecnologia dos Materiais (ECTM) de 2022 e uma versão adaptada (GUALBERTO *et al.*, 2023) foi publicada na revista VETOR - Revista de Ciências Exatas e Engenharias - da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). O quarto que trata da degradação UV no compósito (GUALBERTO *et al.*, 2023) foi publicado na Applied *Composite Materials*. O último artigo (GUALBERTO *et al.*, 2024), sobre a degradação externa, foi publicado na *The Journal of Adhesion* e outro sobre os resultados das imersões para ser elaborado. Portanto, a tese produziu resultados de significância para a comunidade acadêmica.

Atividades futuras

Após a discussão dos resultados algumas observações sugeriram a continuidade de algumas análises que poderiam auxiliar melhor a compreensão e discussão dos resultados obtidos. Na sequência são listados os principais tópicos a serem continuados:

- Exposição superior a 180 dias de exposição ao UV seria importante para confirmação da tendência de melhoria na resistência ao cisalhamento da junta. Durante a submissão do artigo publicado que tratou a degradação UV nas juntas, essa observação foi comentada por um revisor que avaliou o trabalho;
- Análise da degradação externa em tempos superiores a 365 dias. Aproveitar amostras que ainda estão em degradação;
- O estudo do comportamento mecânico do adesivo degradado com UV poderia complementar os resultados já obtidos e fundamentar melhor os resultados obtidos para as juntas exposta ao UV;
- Nas degradações realizadas com imersões, uma degradação com maior tempo de imersão poderia evidenciar melhor os efeitos do UV, quando combinado com as imersões, no comportamento mecânico das juntas e do compósito;
- Análise da Tg do adesivo por DMA quando degradado nas condições de imersão, visto que alterações de Tg podem ter ocorrido e influenciado significativamente o comportamento mecânico.
- Degradação individual do compósito e das juntas com as diferentes temperaturas estudadas na tese, principalmente a temperatura de 4 °C, visto que não ficou claro o efeito apenas da temperatura no comportamento mecânico desses materiais;
- Degradação com temperatura abaixo de zero pode completar o futuro estudo dos efeitos da temperatura nas juntas.
- Finalização e publicação dos resultados da tese que ainda não foram publicados.

Esta continuidade permitirá compreender melhor os resultados, consolidando as hipóteses de comportamento levantadas e ajudando na publicação dos resultados.

Referências

ABU-SHARKH, B.; HAMID, H. Degradation study of date palm fibre/polypropylene composites in natural and artificial weathering: mechanical and thermal analysis. **Polymer Degradation and Stability**, v. 3, p. 967-973, 2004.

ALDERUCCI, T. et al. Effect of different aging conditions on the shear performance of joints made between GFRP and glass with a UV absorbance coating. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 94, p. 76-83, 2019.

AL-SHAWAF, A.; AL-MAHAIDI, R.; ZHAO, X. Effect of elevated temperature on bond behaviour of high modulus CFRP/steel double-strap joints. **Australian Journal of Structural Engineering**, v. 10, n. 1, p. 63-74, 2009.

AMORIM, F. et al. Investigation of UV exposure in adhesively bonded single lap joints. **Applied Adhesion Science**, v. 6, n. 1, p. 2, 2018.

AROUCHE, M. et al. Effect of moisture on the adhesion of CFRP-to-steel bonded joints using peel tests. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 40, n. 1, p. 10, 2018.

AROUCHE, M. M. et al. International Journal of Adhesion and Adhesives. **Effect of salt spray ageing on the fracture of composite-to-metal bonded joints**, 2021. 102885.

ASHRAFI, H. et al. Effect of sequential exposure to UV radiation and water vapor condensation and extreme temperatures on the mechanical properties of GFRP bars. **Journal of composites for construction**, 1, 2018. 04017047.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **ASTM D904:** Standard Practice for Exposure of Adhesive Specimens to Artificial Light., West Conshohocken, v. 91, 1999.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **ASTM G154:** A. Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials, West Conshohocken, 2000.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **ASTM D790:** Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, 2003.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **ASTM D7028:** Standard Test Method for Glass Transition Temperature (DMA Tg) of Polymer Matrix Composites by Dynamic Mechanical Analysis (DMA), 2007.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **ASTM D1141:** Standard practice for the preparation of substitute ocean water, 2008.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **ASTM D1002:** Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal), 2010.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **ASTM D3039:** Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, 2014.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **ASTM D570**: Standard Test Method for water absorption of plastics, 2010.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **ASTM D5868**: Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding, 2014.

AVENDAÑO, R. et al. Effect of temperature and strain rate on single lap joints with dissimilar lightweight adherends bonded with an acrylic adhesive. **Composite Structures**, v. 152, p. 34-44, 2016.

BAI, Y. et al. Environment-assisted degradation of the bond between steel and carbon-fiber-reinforced polymer. **Journal of materials in civil engineering**, v. 26, n. 9, p. 04014054, 2014.

BANEA, M. et al. Effects of temperature and loading rate on the mechanical properties of a high temperature epoxy adhesive. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 25, n. 18, p. 2461-2474, 2011.

BARBOSA, A. et al. Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 110, p. 298-306, 2017.

BATISTA, N. L. E. A. Influence of water immersion and ultraviolet weathering on mechanical and viscoelastic properties of polyphenylene sulfide–carbon fiber composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, 3, 2015. 340-356.

BATUWITAGE, C. et al. Durability of CFRP strengthened steel plate double-strap joints in accelerated corrosion environments. **Composite Structures**, v. 160, p. 1287-1298, 2017.

BAZLI, M. et al. Effects of UV radiation, moisture and elevated temperature on mechanical properties of GFRP pultruded profiles. **Construction and Building Materials**, v. 231, p. 117137, 2020.

BAZLI, M. et al. Mechanical properties of pultruded GFRP profiles under seawater sea sand concrete environment coupled with UV radiation and moisture. **Construction and Building Materials**, p. 120369, 2020.

BELEC, L. et al. Comparative effects of humid tropical weathering and artificial ageing on a model composite properties from nano-to macro-scale. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, 61, n. 23, 2015.

BORDES, M. et al. Prediction of long term strength of adhesively bonded steel/epoxy joints in sea water. **International journal of adhesion and adhesives**, v. 29, p. 595-608, 2009.

BORGES, C. et al. Review on the effect of moisture and contamination on the interfacial properties of adhesive joints. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, p. 208, 2020.

BREBU, M. Environmental Degradation of Plastic Composites with Natural Fillers—A Review. **Polymers**, v. 12, n. 1, p. 166, 2020.

BREWIS, D.; COMYN, J.; SHALASH, R. The effect of moisture and temperature on the properties of an epoxide-polyamide adhesive in relation to its performance in single lap joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 2, n. 4, p. 215-222, 1982.

BUDHE, S. et al. An updated review of adhesively bonded joints in composite materials. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 72, p. 30-42, 2017.

BUDHE, S.; BANEA, M. D.; DE BARROS, S. Bonded repair of composite structures in aerospace application: a review on environmental issues. **Applied Adhesion Science**, v. 6, n. 1, p. 3, 2018.

BUDYNAS, R. G.; NISBETH, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 10ª ed. Porto Alegre: McGraw Hill Brasil, 2016.

CARBAS, R. et al. Effect of post-cure on the glass transition temperature and mechanical properties of epoxy adhesives. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 27, n. 23, p. 2542-2557, 2014.

CASTRO, R. G.; AMORIM, F. C.; REIS, J. M. L. Effects of fiber length on the performance of piassava-reinforced epoxy composites. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications**, 11, 2020. 1431-1438.

CEPEL, C. Potencial Solar - SunData v 3.0. Disponivel em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 14 abr. 2022.

CHANDRATHILAKA, E.; GAMAGE, J.; FAWZIA, S. Mechanical characterization of CFRP/steel bond cured and tested at elevated temperature. **Composite Structures**, v. 207, p. 471-477, 2019.

CHENNAREDDY, R. et al. UV-resistant GFRP composite using carbon nanotubes. **Construction and Building Materials**, p. 679-689, 2019.

CHIN, J. W. Durability of composites exposed to ultraviolet radiation. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2007. p. 80-97.

CORRES, M. et al. Thermal and thermo-oxidative degradation of poly (hydroxy ether of bisphenol-A) studied by TGA/FTIR and TGA/MS. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 2, p. 407-416, 2011.

COSTA, M. et al. Environmental effect on the fatigue degradation of adhesive joints: a review. The Journal of Adhesion, v. 93, n. 1-2, p. 127-146, 2017.

CRUZ, R. et al. Durability of epoxy adhesives and carbon fibre reinforced polymer laminates used in strengthening systems: Accelerated ageing versus natural ageing. **Materials**, v. 6, p. 1533, 2021.

DA SILVA L, A. R. Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 27, n. 3, p. 216-226, 2007.

DA SILVA, L. et al. Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 29, n. 6, p. 621-632, 2009.

DA SILVA, L. et al. Effect of material on the mechanical behaviour of adhesive joints for the automotive industry. **Journal of adhesion science and Technology**, v. 31, n. 6, p. 663-676, 2017.

DA SILVA, L. et al. Accelerated Ageing Effects on Short-Beam Strength Behavior of Pultruded CFRP Rods. **Applied Composite Materials**, v. 29, n. 2, p. 855-869, 2022.

DA SILVA, L.; DE MAGALHÃES, A. G.; DE MOURA, M. **Juntas adesivas estruturais**. Porto: Publindústria, 2007.

DARLA, V.; BEN, B. S.; SRINADH, K. S. Performance based evaluation of the bond strength between aluminum hub and CFRP propeller blade profiles under cyclic aging environments. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, p. 1-10, 2023.

DE'NE`VE, B.; SHANAHAN, M. Water absorption by an epoxy resin and its effect on the mechanical properties and infra-red spectra. **Polymer**, v. 34, p. 5099–5105, 1993.

DILLARD, D. A. **Advances in structural adhesive bonding**. [S.l.]: Elsevier, 2010.

DOĞAN, A.; ARMAN, Y. The effect of hygrothermal aging on the glass and carbon reinforced epoxy composites for different stacking sequences. **Mechanics**, v. 1,p. 19-25, 2018.

DOGAN, A.; ARMAN, Y. The effect of hygrothermal aging and UV radiation on the low-velocity impact behavior of the glass fiber-reinforced epoxy composites. **Iranian Polymer Journal**, p. 193-201, 2019.

DOGAN, A.; ARMAN, Y.; OZDEMIR, O. Experimental investigation of transverse loading on composite panels coated with different gelcoat colors subjected to UV radiation and hygrothermal aging. **Materials Research Express**, v. 2, p. 025301, 2018.

ELLIS, T.; KARASZ, F. Interaction of epoxy resins with water: the depression of glass transition temperature. **Polymer**, v. 25, p. 664–669, 1984.

ELLYIN, F.; MASER, R. Environmental effects on the mechanical properties of glass-fiber epoxy composite tubular specimens. **Composites Science and Technology**, 12, 2004. 1863-1874.

ESCOBEDO, J. F. et al. Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. **Renewable Energy**, v. 36, n. 1, p. 169-178, 2011.

FANG, Y. et al. Monitoring of seawater immersion degradation in glass fibre reinforced polymer composites using quantum dots. **Composites Part B: Engineering'**, p. 93-102, 2017.

FARIA, M. D. et al. The effect of the ocean water immersion and UV ageing on the dynamic mechanical properties of the PPS/glass fiber composites. **Journal of reinforced plastics and composites**, v. 20, p. 1729-1737, 2011.

GÁLVEZ, V. P. et al. Effect of moisture and temperature on thermal and mechanical properties of structural polyurethane adhesive joints. **Composite Structures**, v. 247, p. 112443, 2020.

GHASEMI-KAHRIZSANGI, A. et al. **Progress in Organic Coatings**, p. 199-207, 2015.

GHOLAMI, M. et al. A review on steel/CFRP strengthening systems focusing environmental performance. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 301-310, 2013.

GIAMPAOLI, M. et al. Mechanical performances of GFRP-steel specimens bonded with different epoxy adhesives, before and after the aging treatments. **Composite Structures**, p. 145-157, 2017.

GU, Z. et al. A parametric study of adhesive bonded joints with composite material using black-box and grey-box machine learning methods: Deep neuron. **Composites Part B: Engineering**, v. 217, p. 108894, 2021.

GUALBERTO, H. R.; AMORIM, F. C.; COSTA, H. R. M. A review of the relationship between design factors and environmental agents regarding adhesive bonded joints. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 43, n. 8, p. 1-19, 2021.

GUALBERTO, H. R. et al. Effect of Exposure Time to UV Radiation on Mechanical Properties of Glass/Epoxy Composites. **Applied Composite Materials**, p. 1-19, 2023.

GUALBERTO, H. R. et al. Influence of artificial UV degradation on the performance of steel/GFRP single-lap joints during exposure time. **The Journal of Adhesion**, p. 1-20, 2023.

GUALBERTO, H. R. et al. Projeto de Câmara de Degradação Ultravioleta de Baixo Custo. **VETOR - Revista De Ciências Exatas E Engenharias**, v. 33, n. 1, p. 105–113, 2023.

GUALBERTO, H. R. et al. Effect of outdoor environmental exposure on the mechanical behavior of steel/GFRP single-lap joints. **The Journal of Adhesion**, p. 1-24, 2024.

GUERMAZI, N. et al. On the durability of FRP composites for aircraft structures in hygrothermal conditioning. **Composites Part B: Engineering**, p. 294-304, 2016.

GÜRDAL, Z.; HAFTKA, R. T.; HAJELA, P. **Design and optimization of laminated composite materials**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1999.

HAN, X. et al. Characterisation of moisture diffusion and strength degradation in an epoxy-based structural adhesive considering a post-curing process. **Journal of adhesion science and Technology**, v. 32, n. 15, p. 1643-1657, 2018.

HE, J.; XIAN, G.; ZHANG, Y. Effect of moderately elevated temperatures on bond behaviour of CFRP-to-steel bonded joints using different adhesives. **Construction and Building Materials**, v. 241, p. 118057, 2020.

HEGDE, S.; SHENOY, B.; CHETHAN, K. Review on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and their mechanical performance. **Materials Today: Proceedings**, v. 19, p. 658-662, 2019.

HESHMATI, M.; HAGHANI, R.; AL-EMRANI, M. Effects of moisture on the long-term performance of adhesively bonded FRP/steel joints used in bridges. **Composites Part B: Engineering**, v. 92, p. 447-462, 2016.

HESHMATI, M.; HAGHANI, R.; AL-EMRANI, M. Durability of bonded FRP-to-steel joints: Effects of moisture, de-icing salt solution, temperature and FRP type. **Composites Part B: Engineering**, v. 119, p. 153-167, 2017.

HUNTER-ALARCÓN, R. et al. Effect of the natural aging process on the shear strength of FRP composite single lap joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 86, p. 4-12, 2018.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. Solar and ultraviolet radiation Solar and ultraviolet radiation, p. 316-316, 1992. Disponivel em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK304366/>.

JEEVI, G.; NAYAK, S. K.; ABDUL KADER, M. Review on adhesive joints and their application in hybrid composite structures. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 33, n. 14, p. 1497-1520, 2019.

JIA, Z.; HONG, R. Anticorrosive and photocatalytic properties research of epoxy-silica organic–inorganic coating. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, p. 126647, 2021.

JIANG, X. et al. Effects of hygrothermal aging on glass-fibre reinforced polymer laminates and adhesive of FRP composite bridge: Moisture diffusion characteristics. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, p. 49–58, 2014.

KADIOGLU, F.; PUSKUL, K. Effects of different fiber orientations on the shear strength performance of composite adhesive joints. **World Academy of Sci., Engg. and Etching J. Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engg**, v. 10, p. 65-68, 2016.

KARATAş, M.; GÖKKAYA, H. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. **Defence Technology**, v. 14, n. 4, p. 318-326, 2018.

KATNAM, K. et al. Composite repair in wind turbine blades: an overview. **The journal of Adhesion**, v. 91, n. 1-2, p. 113-139, 2015.

KE, L. et al. Effects of Elevated Temperatures on Mechanical Behavior of Epoxy Adhesives and CFRP-steel Hybrid Joints. **Compos. Struct**, p. 111789, 2020.

KHALEEL, S. et al. Influence of Different UV Exposure Time on the CFRP/Aluminum Single Lap Joints Strength and Fracture Model. **International Journal of Automotive Technology**, v. 20, n. 2, p. 379-387, 2019.

KHALEEL, S. M. et al. Experimental Investigation of the UV Influence on the Fatigue Life of SLJ of CFRP/AL. **International Journal of Applied Mechanics**, v. 10, p. 1850071, 2018.

KHAN, Z. I. et al. Synthesis and Characterization of Composite Materials with Enhanced Thermo-Mechanical Properties for Unmanned Aerial Vehicles (Uavs) and Aerospace Technologies. **Pertanika Journal of Science & Technology**, v. 3, 2021.

KHOTBEHSARA, M. M. E. A. Synergistic effects of hygrothermal conditions and solar ultraviolet radiation on the properties of structural particulate-filled epoxy polymer coatings. **Construction and Building Materials**, p. 122336, 2021.

KORKMAZ, Y.; GÜLTEKIN, K. Effect of uv irradiation on epoxy adhesives and adhesively bonded joints reinforced with bn and b4c nanoparticles. **Polymer Degradation and Stability**, p. 110004, 2022.

KULKARNI, R.; OCHOA, O. Transverse and longitudinal CTE measurements of carbon fibers and their impact on interfacial residual stresses in composites. **Journal of Composite Materials**, v. 40, n. 8, p. 733-754, 2006.

KUMAR, B.; SINGH, R.; NAKAMURA, T. Degradation of carbon fiber-reinforced epoxy composites by ultraviolet radiation and condensation. **Journal of Composite materials**, v. 36, n. 24, p. 2713-2733, 2002.

L. DA ROCHA, M. E. A. Accelerated aging effects in composites used as repair for pipes in oil industry. **Polymer Composites**, v. 42, n. 11, p. 5918-5929, 2021.

LI, S. et al. Effect of temperature variation on bond characteristics between CFRP and steel plate. **International Journal of Polymer Science**, 2016.

LI, W. et al. Strength prediction of adhesively bonded single lap joints under salt spray environment using a cohesive zone model. **The Journal of Adhesion**, v. 11, p. 916-937, 2016.

LIU, J. et al. Bonding Behaviors of GFRP/Steel Bonded Joints after Wet–Dry Cyclic and Hygrothermal Curing. **Applied Sciences**, v. 16, p. 5411, 2020.

LIU, S. et al. An investigation of hygrothermal effects on adhesive materials and double lap shear joints of CFRP composite laminates. **Composites Part B: Engineering**, v. 91, p. 431-440, 2016.

LIU, T.; LIU, X.; FENG, P. A comprehensive review on mechanical properties of pultruded FRP composites subjected to long-term environmental effects. **Composites Part B: Engineering**, v. 191, p. 107958, 2020.

LOHANI, S.; PRUSTY, R. K.; RAY B. C. Effect of ultraviolet radiations on interlaminar shear strength and thermal properties of glass fiber/epoxy composites. **Materials Today: Proceedings**, n. 43, 2021. 524-529.

LUCA, C. R. **Caracterização e modelagem de juntas de cisalhamento simples e os efeitos das propriedades mecânicas de materiais compósitos no reparo de tubulações**. Tese (doutorado) - Universidade Federal Fluminense, Níteroi, p. 274, 2021.

MACHADO, J. et al. Effect of hygrothermal aging on the quasi-static behaviour of CFRP joints varying the overlap length. **Composite Structures**, v. 214, p. 451-462, 2019.

MAFALDA, A.; VENTURA, F. M. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 21, 2009.

MAILHOT, B. et al. Study of the degradation of an epoxy/amine resin, 1. **Macromolecular Chemistry and Physics**, v. 5, p. 575-584, 2005.

MARQUES, E. et al. Adhesive joints for low-and high-temperature use: an overview. **The Journal of Adhesion**, v. 91, n. 7, p. 556-585, 2015.

MEURE, S.; WU, D.-Y.; FURMAN, S. A. FTIR study of bonding between a thermoplastic healing agent and a mendable epoxy resin. **Vibrational Spectroscopy**, v. 1, p. 10-15, 2010.

MOUZAKIS, D.; ZOGA, H.; GALIOTIS, C. Accelerated environmental ageing study of polyester/glass fiber reinforced composites (GFRPCs). **Composites part B: engineering**, v. 39, n. 3, p. 467-475, 2008.

MUBASHAR, A. E. A. A method of predicting the stresses in adhesive joints after cyclic moisture conditioning.. **The Journal of Adhesion**, v. 87, p. 926-950, 2011.

NA, J. et al. Mechanical behavior of polyurethane adhesive bonded joints as a function of temperature and humidity. **Journal of adhesion science and Technology**, v. 32, n. 5, p. 57-472, 2019.

NAKAMURA, T.; SINGH, R.; VADDADI, P. Effects of environmental degradation on flexural failure strength of fiber reinforced composites. **Experimental mechanics**, v. 46, n. 2, p. 257-268, 2006.

NGUYEN, T. et al. Mechanical characterization of steel/CFRP double strap joints at elevated temperatures. **Composite Structures**, v. 93, n. 6, p. 1604-1612, 2011.

NGUYEN, T. et al. Effects of ultraviolet radiation and associated elevated temperature on mechanical performance of steel/CFRP double strap joints. **Composite Structures**, v. 94, n. 12, p. 3563-3573, 2012.

NIKAFSHAR, S. et al. The effects of UV light on the chemical and mechanical properties of a transparent epoxy-diamine system in the presence of an organic UV absorber. **Materials**, v. 10, n. 2, p. 180, 2017.

NIU, R. Y. Y. L. Z. D. Z. P. H. F. Y. Durability of Two Epoxy Adhesive BFRP Joints Dipped in Seawater under High Temperature Environment. **Polymers**, v. 5, p. 3232, 2023.

OSANAI K, R. J. Temperature effect on the strength of adhesively bonded single lap joints. **Revista de Engenharia Térmica**, v. 1-2, n. 11, p. 03-06, 2012.

PANCHAL, P. . &. M. T. H. Tailored cellulose nanocrystals as a functional ultraviolet absorbing nanofiller of epoxy polymers. **Nanoscale Advances**, v. 7, p. 2612-2623, 2019.

PANG, Y. et al. Interfacial bond-slip degradation relationship between CFRP plate and steel plate under freeze-thaw cycles. **Construction and Building Materials**, v. 214, p. 242-253, 2019.

PHILIPS. Ultraviolet purification application information: Perfection preserved by the purest of light. **https:** //www.assets.signify.com/is/content/PhilipsLighting/Assets/philips-lighting/global/20200504-philips-uv-purification-application-information.pdf., Acesso em: Fevereiro 2023.

PILLAY, S.; VAIDYA, U.; JANOWSKI, G. Effects of moisture and UV exposure on liquid molded carbon fabric reinforced nylon 6 composite laminates. **Composites Science and Technology**, v. 69, n. 6, p. 839-846, 2009.

RAY, B. C.; RATHORE, D. Environmental damage and degradation of FRP composites: A review report. **Polymer Composites**, v. 36, p. 410-423, 2015.

REBURN, A. Analysis of manufacturing parameters on the shear strength of aluminium/GFRP co-cured and adhesively bonded single-lap joints. **The Plymouth Student Scientis**, v. 9, n. 2, p. 195-230, 2016.

REITZ, V. et al. A comparison of IR-and UV-laser pretreatment to increase the bonding strength of adhesively joined aluminum/CFRP components. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 96, p. 18-27, 2017.

RIVERA, J.; KARBHARI, V. Composites Part B: Engineering. **Cold-temperature and simultaneous aqueous environment related degradation of carbon/vinylester composites**, v. 1, p. 17-24, 2002.

SHI, Z. et al. Analysis of the mechanical properties and damage mechanism of carbon fiber/epoxy composites under UV aging. **Materials**, v. 8, p. 2919, 2022.

SHOKRIEH, M. M.; BAYAT, A. Effects of ultraviolet radiation on mechanical properties of glass/polyester composites. **Journal of Composite materials**, v. 41, p. 2443-2455, 2007.

SILVA NETO, A. **Estudo de tensões e modos de falhas no desenvolvimento de adesivos**. Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p.131, 2016.

SILVA, M.; BISCAIA, H.; RIBEIRO, P. On factors affecting CFRP-steel bonded joints. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 360-375, 2019.

SOUSA, J. et al. Effects of thermal cycles on adhesively bonded joints between pultruded GFRP adherends. **Composite Structures**, v. 202, p. 518-529, 2018.

SOUSA, J. et al. Durability of adhesively bonded joints between pultruded GFRP adherends under hygrothermal and natural ageing. **Composites Part B: Engineering**, v. 158, p. 475-488, 2019.

SOUSA, J. M.; CORREIA, J. R.; CABRAL-FONSECA, S. Durability of glass fibre reinforced polymer pultruded profiles: comparison between QUV accelerated exposure and natural weathering in a Mediterranean climate. **Experimental Techniques**, p. 207-221, 2016.

SOYKIK, I. F. Degradation of single lap adhesively bonded composite joints due to hot water ageing. **The Journal of Adhesion**, v. 5, p. 357-374, 2017.

STANKIEWICZ, B. The resistance to UV radiation for GFRP pultruded bridge panels. **Advanced Materials Letters**, v. 3, 2022.

STAZI, F. et al. Environmental ageing on GFRP pultruded joints: comparison between different adhesives. **Composite Structures**, p. 404-414, 2015.

SUGIMAN, S. et al. Effect of adhesive layer thickness on the shear strength of adhesively bonded steel joints in wet environment. **In Applied Mechanics and Materials**, v. 836, p. 78-82, 2016.

SUGIMAN, S. et al. Experimental and numerical investigation of the residual strength of steel-composites bonded joints: effect of media and aging condition. **Composites Part B: Engineering**, p. 106977, 2019.

SUN, Z. E. A. Effect of additive phosphorus-nitrogen containing flame retardant on char formation and flame retardancy of epoxy resin. **Materials Chemistry and Physics**, p. 154-164, 2018.

TCHERBI-NARTEH, A. et al. Thermal stability and degradation of diglycidyl ether of bisphenol A epoxy modified with different nanoclays exposed to UV radiation. **Polymer degradation and stability**, v. 3, p. 759-770, 2013.

VIANA, G. et al. Behaviour of environmentally degraded epoxy adhesives as a function of temperature. **The Journal of Adhesion**, v. 1-2, p. 95-112, 2017.

VIANA, G. et al. A review on the temperature and moisture degradation of adhesive joints. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications**, v. 231, n. 5, p. 488-501, 2017.

YAN, L.; CHOUW, N. Effect of water, seawater and alkaline solution ageing on mechanical properties of flax fabric/epoxy composites used for civil engineering applications. **Construction and Building Materials**, p. 118-127, 2015.

YAN, L.; CHOUW, N.; KRISHNAN, J. Effect of UV and water spraying on the mechanical properties of flax fabric reinforced polymer composites used for civil engineering applications. **Materials & Design**, p. 17-25, 2015.

YANG, Y. et al. Thermal aging of an anhydride-cured epoxy resin. **Polymer degradation and stability**, p. 111-119, 2015.

ZHANG, L.; CAO, S.; TAO, X. Experimental study on interfacial bond behavior between CFRP sheets and steel plates under fatigue loading. **Materials**, v. 12, n. 3, p. 377, 2019.

ZHANG, Y.; ADAMS, R. D.; DA SILVA, L. F. Absorption and glass transition temperature of adhesives exposed to water and toluene. **International Journal of Adhesion and adhesives**, v. 50, p. 85-92, 2014.

ZHANG, Y.; VASSILOPOULOS, A.; KELLER, T. Effects of low and high temperatures on tensile behavior of adhesively-bonded GFRP joints. **Composite Structures**, v. 92, n. 7, p. 1631-1639, 2010.

ZHAO, X.; ZHANG, L. State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures. **Engineering structures**, v. 29, n. 8, p. 1808-1823, 2007.

ZHENG, G. et al. Mechanical behavior of AL/CFRP single-lap joint subjected to combined thermal and constant loading. **The Journal of Adhesion**, p. 1-19, 2019.

APÊNDICE A

TABLE X3.2 Irradiance for Benchmark Solar Spectrum

Bandpass	Benchmark Solar Spectrum
Irradiance (W/m^2) in stated bandpass	
$\lambda < 290$	0.000
$290 \leq \lambda \leq 320$	3.748
$320 < \lambda \leq 360$	25.661
$360 < \lambda \leq 400$	34.762
$290 \leq \lambda \leq 400$	64.171
$290 \leq \lambda \leq 800$	652.300
Percent of 290 to 400 nm irradiance	
$\lambda < 290$	0.0 %
$290 < \lambda \leq 320$	5.8 %
$320 < \lambda \leq 360$	40.0 %
$360 < \lambda \leq 400$	54.2 %
Percent of 290 to 800 nm irradiance	
$290 \leq \lambda \leq 400$	9.8 %

Tabela 15- Irradiância solar para diferentes faixas do espectro de radiação solar

Fonte: ASTM G154, 2000.