



ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTÁTICO E À FADIGA DE JUNTA COLADA
COMPÓSITO POLIMÉRICO E AÇO EM DIFERENTES TRATAMENTOS DE
SUPERFÍCIE E SUJEITA À NÉVOA SALINA APLICADA COMO REPARO NA
INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

Valber Azevedo Perrut

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientador: Marysilvia Ferreira da Costa

Rio de Janeiro
Junho de 2018

ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTÁTICO E À FADIGA DE JUNTA COLADA
COMPÓSITO POLIMÉRICO E AÇO EM DIFERENTES TRATAMENTOS DE
SUPERFÍCIE E SUJEITA À NÉVOA SALINA APLICADA COMO REPARO NA
INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

Valber Azevedo Perrut

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA
DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Examinada por:

Prof. Marysilvia Ferreira da Costa, D. Sc.

Prof. Bluma Guenther Soares, D.Sc.

Prof. Heraldo Silva da Costa Mattos, D.Sc.

Prof. Eduardo Martins Sampaio, D.Sc.

Dr. Luiz Cláudio de Marco Meniconi, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2018

Perrut, Valber Azevedo

Estudo do Comportamento Estático e à Fadiga de Junta Colada Compósito Polimérico e Aço em diferentes Tratamentos de Superfície e sujeita à Névoa Salina aplicada como Reparo na Indústria do Petróleo/ Valber Azevedo Perrut. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XVII, 129 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marysilvia Ferreira da Costa

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 120-129.

1. Reparo. 2. Junta colada. 3. Material Compósito. I. Costa, Marysilvia Ferreira da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

Dedico esta tese aos meus pais Edilsa e Altair, meus irmãos Wiliam e Jaqueline e minha amada esposa Alana.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me guiar e abençoar durante essa trajetória, tornando possível a concretização desta etapa da minha vida.

À minha amada esposa Alana pela paciência, companheirismo. Minha fonte de inspiração e motivação.

Aos meus pais Altair e Edilsa pelo amor e pela educação recebida.

À minha orientadora Marysilvia pela oportunidade que me foi dada, amizade, ensinamentos e incentivo.

Aos amigos do Laboratório de Ensaios Mecânicos do Centro de Pesquisas da Petrobras, Almir, Chiapim, Daniel, Benedito e Edílson pela ajuda na realização dos ensaios mecânicos e pela amizade.

Ao professor Heraldo da Universidade Federal Fluminense pelas aulas, pela oportunidade de trabalharmos juntos e por repassar um pouco de sua experiência.

Ao professor Eduardo Sampaio da Universidade do Estado do Rio de Janeiro e toda equipe do Laboratório de Adesão e Aderência do Estado do Rio de Janeiro pelo apoio, amizade e pela oportunidade de trabalharmos juntos e pelo apoio na confecção dos corpos de prova.

Ao Professor Ney do Instituto Federal Fluminense pelo apoio na fabricação dos corpos de prova.

Ao amigo Luiz Meniconi pelos anos de convivência na Petrobras, pelo aprendizado, pelo apoio e pela amizade. Exemplo de profissional e amigo.

À secretaria do PEM pela ajuda quando necessário.

A todos da gerência de Tecnologia de Materiais Não-Metálicos e Ensaios Não Destrutivos que direta ou indiretamente participaram dessa etapa da minha vida. Em especial aos amigos do grupo de Materiais Não-Metálicos: Luiz Daniel, Ana Fampa, Nara Berry, Antônio, Michele, Fernando, Kasama e Regina.

À Petrobras por me conceder a oportunidade de realização deste trabalho.

Enfim, a todos que de certa forma contribuíram no decorrer dessa longa caminhada.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTÁTICO E À FADIGA DE JUNTA COLADA
COMPÓSITO POLIMÉRICO E AÇO EM DIFERENTES TRATAMENTOS DE
SUPERFÍCIE E SUJEITA À NÉVOA SALINA APLICADA COMO REPARO NA
INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

Valber Azevedo Perrut

Junho/2018

Orientador: Marysilvia Ferreira da Costa

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Este trabalho avalia o comportamento mecânico de juntas coladas compósito de fibra de carbono e aço, utilizados como reparos de estruturas metálicas com perda de espessura devido ao processo corrosivo em ambiente marinho. Além disso, investiga o efeito de diferentes preparações de superfície no substrato metálico e da degradação por névoa salina e raios ultravioleta quando submetido a carregamentos estáticos e dinâmicos. Ensaio experimentais em juntas coladas foram executados de forma a avaliar a resistência estática e a vida à fadiga sem e com degradação e com diferentes tratamentos superficiais, jateamento e máquina rotativa de impacto. Além disso, foram utilizados dois tipos de chapas metálicas, sem e com corrosão, cujo objetivo foi avaliar a influência do perfil geométrico do aço no comportamento mecânico da junta colada.

Os resultados mostraram que o desempenho da máquina é semelhante ao jateamento e que o perfil geométrico mais complexo da junta com corrosão afetou negativamente a resistência estática e a vida à fadiga. A maior contribuição deste trabalho é a determinação do comportamento mecânico de juntas coladas em termos de resistência mecânica e vida à fadiga envelhecidas em névoa salina em dois tipos de tratamento superficial, jateamento e máquina rotativa de impacto. Sendo esta segunda, a possibilidade de reparos em regiões onde não é possível aplicação do jato.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

STUDY OF STATIC AND FATIGUE BEHAVIOR OF POLYMERIC COMPOSITE AND STEEL ADHESIVE JOINT IN DIFFERENT SURFACE TREATMENT AND SUBJECT TO SALT SPRAY APPLIED AS REPAIR IN THE OIL INDUSTRY

Valber Azevedo Perrut

June/2018

Advisor: Marysilvia Ferreira da Costa

Department: Metallurgical and Materials Engineering

This study evaluates the mechanical behavior of carbon fiber composite and steel adhesive joint used as repair of metallic structures with thickness loss due to corrosion in a marine environment. Furthermore, it investigates the effect of different surface preparations on the metallic substrate and degradation by salt spray and UV when subjected to static and dynamic loads. Experimental tests on bonded joints were performed in order to evaluate the static strength and fatigue life with and without degradation and with different surface treatments. Moreover, two types of steel plates were used: with and without corrosion, in order to assess the influence of the geometric profile of the steel surface on the mechanical behavior of the joint.

The results showed that the performance of the machine treatment is similar to blasting and that the corroded joint geometry negatively affected the static strength and the fatigue lifetime. The main contribution of this work is the determination of the mechanical behavior of bonded joints in terms of mechanical strength and fatigue lifetime, when degraded in salt spray with two types of surface treatment, blasting and rotary impact machine. The second contribution was to address the possibility of repairing areas where it is not possible to apply blasting.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS.....	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação	3
1.2. Objetivo	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Utilização de Materiais Compósitos Poliméricos para o Reparo de Estruturas Metálicas na Indústria de Óleo e Gás	6
2.2. Adesivos Estruturais	8
2.3. Materiais Compósitos	10
2.3.1. Fibras de Reforço	10
2.3.1.1. Fibras de Vidro	11
2.3.1.2. Fibras de Carbono.....	12
2.3.2. Matrizes	14
2.4. Adesão	15
2.4.1. Mecanismos de Adesão.....	17
2.4.1.1. Interligação Mecânica.....	17
2.4.1.2. Teoria da Adsorção	18
2.5. Preparação de Superfície do Substrato Metálico	21
2.6. Tipos de Juntas Coladas para Avaliação da Resistência ao Cisalhamento... 24	
2.7. Análise de Tensões em Juntas Coladas	25
2.7.1. Efeito do comprimento de ancoragem “L”	27
2.7.2. Efeito do adocamento da extremidade do reparo e da espessura do adesivo	30
2.8. Fadiga de Juntas Coladas	32
2.9. Degradação de Juntas Coladas	36
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1. Materiais e Equipamentos.....	42
3.2. Metodologia Experimental.....	44
3.2.1. Chapa de Aço Carbono.....	48
3.2.2. Adesivo de Preenchimento	48
3.2.3. Resina de Impregnação	50
3.2.4. Manta de Fibra de Vidro.....	50

3.2.5. Tecido de Fibra de Carbono	52
3.2.6. Preparação de Superfície	53
3.2.7. Confeção dos Corpos de Prova de Juntas Coladas Aço/Compósito	55
3.2.7.1. Juntas Coladas para a Primeira Bateria de Testes	55
3.2.7.2. Envelhecimento das Juntas Coladas da Primeira Bateria de Testes.....	59
3.2.8. Juntas Coladas para a Segunda Bateria de Testes	60
3.2.8.1. Envelhecimento das Juntas Coladas da Segunda Bateria de Testes	64
3.2.8.2. Envelhecimento do Laminado de Compósito de Fibra de Carbono da Segunda Bateria de Testes	65
3.2.9. Ensaio de Tração e Fadiga nas Juntas Coladas	67
3.2.10. Análise Micrográfica e Macrográfica das Juntas	68
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA PRIMEIRA BATERIA DE TESTES.....	68
4.1. Ensaio de Tração em Corpos de Prova da Resina de Impregnação, Compósito de Fibra de Vidro e Fibra de Carbono	69
4.2. Ensaio Estático em Juntas Coladas na Primeira Bateria de Testes.....	71
4.3. Ensaio Dinâmico em Juntas Coladas da Primeira Bateria de Testes.....	78
4.4. Análises Macrográficas e Micrográficas na Primeira Bateria de Testes	82
5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA SEGUNDA BATERIA DE TESTES	87
5.1. Análise de Superfície e Interface na Segunda Bateria de Testes.....	87
5.2. Propriedades Mecânicas dos Materiais da Segunda Bateria de Testes.....	91
5.3. Avaliação da Degradação do Compósito de Fibra de Carbono.....	92
5.4. Avaliação das Juntas Coladas da Segunda Bateria de Testes após Exposição em Névoa Salina	96
5.5. Ensaio Estático em Juntas Coladas da Segunda Bateria de Testes.....	97
5.6. Ensaio Dinâmico em Juntas Coladas da Segunda Bateria de Testes....	100
5.7. Análise da Propagação do Descolamento por Fadiga.....	104
5.8. Modo de Falha da Segunda Bateria de Testes	112
6. CONCLUSÕES.....	116
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	118
8. REFERÊNCIAS	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração de um reparo por material compósito em um substrato metálico numa região com defeito tipo perda de espessura.....	3
Figura 2: Reparo por soldagem no costado de uma plataforma tipo FPSO.....	4
Figura 3: Exemplo de perfil geométrico em tubo metálico com defeito tipo perda de espessura externa.	5
Figura 4: Reparo de tubulação metálica por meio de laminado de compósito polimérico em região com perda de espessura [10].....	7
Figura 5: Reparo de tanque de armazenamento por meio de laminado de compósito polimérico [15].	7
Figura 6: Reparo de tanque de lastro de plataforma semissubmersível por meio de laminados de compósitos poliméricos [16].....	8
Figura 7: Estrutura hexagonal da fibra de carbono.	13
Figura 8: Ângulo de contato entre um líquido e um sólido.....	19
Figura 9: Influência do ângulo de contato com a energia de superfície.....	19
Figura 10: Molhabilidade de um adesivo epóxi sobre diferentes substratos [18].....	20
Figura 11: Tipos de falhas em juntas coladas.	23
Figura 12: Principais tipos de juntas de cisalhamento.....	24
Figura 13: Junta colada do tipo SLJ: (a) modelo de junta com substratos rígidos [51] e (b) modelo com substratos elásticos [52].....	25
Figura 14: Rotação numa junta simples (SLJ).....	26
Figura 15: Momentos internos numa junta tipo DBS.	27
Figura 16: Ilustração da resposta mecânica de uma junta colada com comprimento de ancoragem L curto e longo [57].	29
Figura 17: Ilustração do comportamento de junta colada com comprimento de ancoragem curto e longo. Linha tracejada representa um adesivo com menor tensão de cisalhamento [57].	30
Figura 18: Representação esquemática de juntas tipo DBS com redução gradual de espessura e seu efeito na distribuição de tensões ao longo da ancoragem.	31
Figura 19: Energia de fratura em função da espessura do adesivo. Adaptada de [68].	31

Figura 20: Curva S-N de aço estrutural AASHTO E com pontos de falha das juntas coladas com 90% e 95% de queda de rigidez. a) razão de tensão de 0,1 b) razão de tensão de 0,4 [3].	34
Figura 21: Redução da rigidez durante teste de fadiga [3].	35
Figura 22: Representação esquemática das extremidades da junta tipo DBS CFC/Aço.	35
Figura 23: Ilustração da interface compósito/aço sujeita às intempéries do meio num tanque metálico de armazenamento [15].	37
Figura 24: Exemplos de reparos por compósitos em plataformas de petróleo que possuem corrosão na extremidade do reparo.....	38
Figura 25: Detalhe do isolamento elétrico por meio de uma camada de fibra de vidro em reparo por fibra de carbono num tubo e costado de plataforma [87].	40
Figura 26: Habitáculo na lateral da plataforma para realização do reparo por compósito.	44
Figura 27: Interior do habitáculo com destaque para laminação do reparo por compósito.	45
Figura 28: Fluxograma da metodologia experimental para avaliação das juntas.....	47
Figura 29: Chapa metálica com corrosão acentuada e imagem tridimensional da região corroída.	48
Figura 30: Corpos de prova de tração segundo a ASTM D638.	49
Figura 31: Laminação de placa de compósito de fibra de vidro para confecção de corpos de prova.	51
Figura 32: Corpos de prova de tração de fibra de vidro.	51
Figura 33: Dimensões do corpo de prova de tração.....	52
Figura 34: Laminação de placa de compósito de fibra de carbono para confecção de corpos de prova.....	52
Figura 35: Corpos de prova de tração de compósito de fibra de carbono.	53
Figura 36: Máquina rotativa com impacto.	54
Figura 37: Chapa metálica sendo jateada.....	55
Figura 38: Medição da rugosidade na chapa metálica.	56
Figura 39: Limpeza com acetona, preenchimento de adesivo no rasgo da chapa e aplicação do tecido peel-ply.....	56
Figura 40: Remoção do peel-ply e aplicação de uma camada de manta de fibra de vidro.	57
Figura 41: Laminação das camadas de fibra de carbono, com aplicação de peel-ply entre a 7 ^o e 8 ^o camada.	58
Figura 42: Junta colada tipo SBS utilizada na primeira bateria de testes.	58

Figura 43: Placa colada com compósito em equipamento para exposição de UV e névoa salina durante um ano e seis meses.....	60
Figura 44: Chapa metálica com detalhe de região com corrosão acentuada.	60
Figura 45: Medição da rugosidade na chapa metálica.	61
Figura 46: Chapa tratada com máquina com impacto e com corrosão acentuada.	61
Figura 47: Limpeza com acetona, aplicação de adesivo e da manta de fibra de vidro.	62
Figura 48: Impregnação da resina Pipefix no tecido de fibra de vidro e laminação das camadas de fibra de carbono.	62
Figura 49: Geometria da junta colada tipo CFC/Aço.	63
Figura 50: Juntas coladas da segunda bateria de testes para degradação.	65
Figura 51: Corpos de prova imersos na água a 80oC para envelhecimento.	66
Figura 52: Corpos de prova de compósitos de fibra de carbono na câmara UV.....	67
Figura 53: Par de juntas tipo SBS coladas na máquina universal de ensaios para teste de cisalhamento.	71
Figura 54: Detalhe do corte do compósito de fibra de carbono para obtenção de diferentes comprimentos de ancoragem.	72
Figura 55: Testes de cisalhamento com diferentes comprimentos de ancoragem	73
Figura 56: Curvas de carga máxima em função do comprimento de ancoragem.	74
Figura 57: Testes de cisalhamento em juntas sem e com envelhecimento com L=185 mm. Curva média dos testes.	75
Figura 58: Modo de falha por delaminação entre as camadas do laminado de fibra de carbono de uma junta colada envelhecida.	76
Figura 59: Substrato metálico após envelhecimento.....	77
Figura 60: Retirada de amostra de junta colada na região mais próxima da extremidade da chapa pintada após envelhecimento.....	77
Figura 61: Curva de vida à fadiga referente à primeira bateria de ensaios.....	79
Figura 62: Trincas de fadiga	80
Figura 63: Crescimento da trinca em função do número de ciclos em um ensaio com baixo número de ciclos. Corpo de prova 2.....	80
Figura 64: Crescimento da trinca em função do número de ciclos em um ensaio com alto número de ciclos. Corpo de prova 5.	81
Figura 65: Crescimento do deslocamento em função do número de ciclos do corpo de prova 5. Representação da queda de rigidez da junta.....	81
Figura 66: Vista lateral de uma junta sem processo de degradação com a trinca de fadiga.....	82
Figura 67: Região 1 - Início da trinca. Aumento de 7,5x.....	82
Figura 68: Mudança de plano da trinca com interrupção. Aumento de 7,5x.	83

Figura 69: Mudança de plano da trinca sem interrupção. Aumento de 7,5x.	83
Figura 70: Micrografia da junta colada nova compreendendo o aço, camada de fibra de vidro e duas camadas de fibra de carbono. Aumento de 50 vezes.	84
Figura 71: Micrografia da junta colada envelhecida compreendendo o aço, camada de fibra de vidro e 1 camada de fibra de carbono. Aumento de 50 vezes.	85
Figura 72: Arranjo da fibra de carbono na matriz polimérica. Aumento de 1000 vezes.	85
Figura 73: Adesão entre o Aço e o laminado compósito após o teste de fadiga de uma junta nova e de uma junta envelhecida. Aumento de 200 vezes.	86
Figura 74: Trinca em junta nova após o teste de fadiga. Aumento de 50 vezes.	86
Figura 75: trinca em um corpo de prova novo após o teste de fadiga. Aumento de 50 vezes – lado esquerdo e aumento de 100 vezes - lado direito.	87
Figura 76: Placa corroída antes e após o tratamento pela máquina rotativa com impacto.	88
Figura 77: Imagens típicas das superfícies metálicas antes do tratamento: (a) Sem Corrosão, (b) Corroídas. Imagens típicas das superfícies metálicas após o tratamento: (c) Junta JSC, (d) Junta JC, (e) Junta MSC e (f) Junta MC.	89
Figura 78: Imagem da interface de uma junta colada em aço sem corrosão e com corrosão.	91
Figura 79: Temperatura de transição vítrea (Tg) do compósito de fibra de carbono (resina Pipefix).	93
Figura 80: Saturação dos corpos de prova de compósito de fibra de carbono.	94
Figura 81: Avaliação do módulo de elasticidade em diferentes tempos e temperatura.	95
Figura 82: Módulo de elasticidade antes da exposição UV e após 60 dias em UV.	95
Figura 83: Juntas coladas da segunda bateria de testes após 6 meses na névoa salina.	96
Figura 84: Juntas coladas da segunda bateria de testes após 12 meses na névoa salina.	96
Figura 85: Juntas coladas da segunda bateria de testes após 18 meses na névoa salina.	97
Figura 86: Curvas de testes estáticos - carga por comprimento (N/mm).	98
Figura 87: Resistência ao carregamento estático das juntas coladas antes (novo) e após envelhecimento de 12 meses em névoa salina.	99
Figura 88: Curva de vida à fadiga de todos os tipos de juntas coladas, novas e envelhecidas na névoa salina por 12 meses.	103
Figura 89: Propagação do descolamento na interface	105

Figura 90: Crescimento de descolamento por fadiga – Junta JSC02.....	106
Figura 91: Taxa de crescimento do descolamento por taxa de liberação de energia das juntas novas.	108
Figura 92: Taxa de crescimento do descolamento por taxa de liberação de energia das juntas novas e envelhecidas.....	109
Figura 93: Taxa de liberação de energia no ponto de threshold (Gth) das juntas novas e envelhecidas após 12 meses em névoa salina.....	110
Figura 94: Falha nas juntas sem corrosão, estáticos e fadiga, sem degradação.....	112
Figura 95: Falha nas juntas com corrosão, estáticos e fadiga, sem degradação.....	113
Figura 96: Falha das juntas coladas sem corrosão após degradação de 12 meses em juntas coladas sem corrosão (chapas lisas).....	114
Figura 97: Falha das juntas coladas com corrosão após degradação de 12 meses na névoa salina.	115
Figura 98: Falha das juntas coladas após 18 meses de envelhecimento em névoa salina.	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química aproximada de fibras de vidro (% peso) [24].	12
Tabela 2: Propriedades típicas de fibras de vidro tipo E [24].....	12
Tabela 3: Propriedades da resina NORPOL FI 184-70	49
Tabela 4: Propriedades mecânicas da resina de impregnação DION 9500-800.	69
Tabela 5: Propriedades mecânicas do compósito de fibra de vidro.....	70
Tabela 6: Propriedades mecânicas do compósito de fibra de carbono 0/90º.	70
Tabela 7: Resultado dos testes de cisalhamento de junta colada com diferentes comprimentos de junta colada.	72
Tabela 8: Cargas e número de ciclos até a falha nos ensaios de fadiga.	78
Tabela 9: Valores dos Parâmetros de Rugosidade.	89
Tabela 10: Propriedades Mecânicas dos Materiais utilizados na Segunda Bateria de Teste.	92
Tabela 11. Carga mínima, máxima e número de ciclos até a falha de cp's novos. ...	100
Tabela 12: Carga mínima, máxima e número de ciclos até a falha de corpos de prova envelhecidos.....	101
Tabela 13: Valores dos parâmetros m e B e equação do N de cada junta.	104
Tabela 14: Valores dos parâmetros m e B e taxa de liberação G de cada junta.	111

LISTA DE SÍMBOLOS

CFC	Compósito de fibra de carbono
DBS	Double butt strap
DLJ	Double lap joint
$E_{aço}$	Módulo de elasticidade do aço
E_r	Módulo de elasticidade da resina
f	Carga de falha por largura
f_{max}	Carga de falha máxima por largura
F	Carga
G	Taxa de liberação de energia
G_{max}	Taxa de liberação de energia máxima
G_{th}	Taxa de liberação de energia no threshold
JC	Jateamento corroído
JSC	Jateamento sem corrosão
L	Comprimento de ancoragem
L_{em}	Comprimento efetivo máximo
MC	Máquina rotativa de impacto corroída
MSC	Máquina rotativa de impacto sem corrosão
N	Número de ciclos
R	Razão de carga
SBS	Single butt strap
SLJ	Single lap joint
$t_{aço}$	Espessura do aço
t_{lam}	Espessura do laminado compósito
T_g	Temperatura de transição vítrea
UV	Ultravioleta
W	Largura
θ	Ângulo de contato

τ	Tensão máxima cisalhante
ν_r	Coefficiente de Poisson da resina

1. INTRODUÇÃO

A técnica de reparo por meio de materiais compósitos poliméricos para reabilitação de estruturas metálicas consiste em colar os laminados na região que sofreu deterioração, ou seja, que se encontra com sua integridade estrutural comprometida. Estes laminados são constituídos de fibras contínuas de elevada resistência e rigidez impregnadas numa matriz de resina polimérica. Estas fibras são orientadas de modo a otimizar o projeto a fim de recompor a rigidez e resistência que foi perdida pelo aço.

A utilização de materiais compósitos poliméricos como reparo de estruturas metálicas está sendo vastamente aplicada nos últimos anos em diferentes segmentos industriais, tais como: aeronáutica, civil e petroquímica. Isto tem sido objeto de estudo por vários pesquisadores, conforme pode ser visualizado nos trabalhos de revisões [1, 2]. Metodologias de projeto foram propostas [3, 4, 5] para o dimensionamento deste tipo de reparo. Esta tecnologia tem se tornado mais importante à medida que novos adesivos estruturais são desenvolvidos, tornando eficiente a colagem de laminados de compósitos poliméricos em substratos metálicos [3]. Depois da união, o substrato (material a ser ligado) é frequentemente designado por aderente, embora esses dois termos sejam usados sem distinção.

O uso desta técnica de reparo teve início na indústria aeronáutica, depois se observou um grande aumento na aplicação de componentes estruturais na área civil, principalmente na reabilitação de pontes. Mais recentemente, estes materiais estão sendo aplicados na restauração da integridade de tubulações e estruturas de plataformas marítimas [3, 6].

Reparos tradicionais por meio de soldagem de chapas metálicas apresentam uma série de desvantagens que podem ser evitadas quando se utilizam materiais compósitos poliméricos, tais como: reparo realizado a frio, fator muito importante quanto aos requisitos de segurança; adição de peso à estrutura muito pequeno devido à elevada rigidez específica destes materiais; logística muito mais simples quando comparado aos reparos tradicionais por soldagem e facilidade de aplicação, permitindo o uso em estruturas com geometrias complexas [1].

Porém, uma desvantagem deste tipo de reparo é a possibilidade de degradação por meio de mecanismos químicos e mecânicos que podem afetar a durabilidade e a eficiência do reparo. Os mecanismos químicos ocorrem devido à presença de água, óleo, fluidos com elevada acidez ou muito básicos, radiação ultravioleta, etc. Os mecânicos são função do tipo de carregamento, elevadas tensões que podem promover a fluência ou carregamento cíclico que conduzem a falhas por fadiga [7]. Além dos

fenômenos químicos e físicos supracitados, a preparação de superfície também é um parâmetro que pode influenciar na durabilidade do reparo, pois poderá afetar a adesão entre o laminado compósito e o substrato. A durabilidade desta adesão ao longo do tempo de vida do projeto é fundamental para garantir a integridade da região reparada.

Assim, justifica-se o interesse no estudo do comportamento mecânico de juntas coladas compósito de matriz polimérica e aço, simulando reparos estruturais de componentes que sofreram processo corrosivo e estão com a integridade estrutural afetada. Além disso, o entendimento da evolução do comportamento do reparo em função do tempo de exposição no ambiente marinho torna-se crucial para evitar falhas prematuras do reparo e conseqüentemente da estrutura metálica como um todo.

O sistema de reparo por material compósito está ilustrado na Figura 1. O procedimento de reparo inicia-se por meio da preparação de superfície, seguida da aplicação de um adesivo estrutural tipo pasta, de elevada viscosidade, para regularizar a geometria corroída. Posteriormente, tem-se a utilização de uma camada de fibra de vidro, cujo objetivo é promover o isolamento elétrico entre o aço e a fibra de carbono, para preservar a proteção catódica, que por ventura possa existir, e evitar a formação de pilha galvânica, tendo em visto a fibra de carbono ser condutora de eletricidade. Em seguida, as camadas de fibra de carbono são aplicadas até a espessura determinada no projeto a fim de repor a rigidez perdida pelo aço. Finalmente, é realizada uma pintura sobre o reparo como proteção e também para que sua cor seja igual a estrutura metálica adjacente.

O critério básico de projeto, de reposição de rigidez perdida pelo aço, garante que o material compósito esteja sujeito a tensões reduzidas em serviço, o que privilegia a durabilidade do reparo e a integridade da interface adesiva.

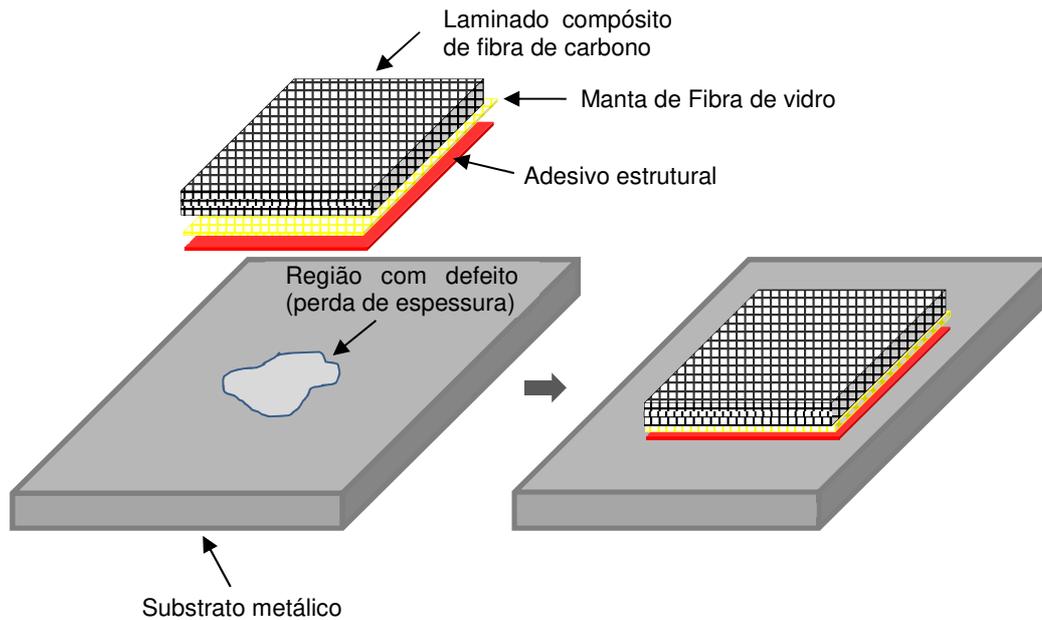


Figura 1: Ilustração de um reparo por material compósito em um substrato metálico numa região com defeito tipo perda de espessura.

1.1. Motivação

A indústria de óleo e gás utiliza a técnica de soldagem há muitos anos para restabelecer a integridade de estruturas com defeitos causados pela corrosão do substrato metálico. A Figura 2 mostra um reparo tradicional por soldagem em uma plataforma tipo FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*), na lateral do costado, o qual consiste em remover parte da chaparia com defeito e aplicação de um novo painel de chapa por meio de soldagem, técnica denominada *insert plate*. É possível observar a elevada dificuldade da aplicação deste tipo de reparo, onde é necessário a completa parada de produção da unidade, pois a enorme geração de calor eleva bastante o risco de incêndio. Além disso, a soldagem desta chapa afeta a estanqueidade do navio plataforma, então este reparo deve ser realizado em estaleiro, causando uma demora grande para retorno da produção. Logo, a utilização de materiais compósitos estruturais coladas na estrutura pode ser uma excelente alternativa, face não ser necessário a interrupção da produção, por ser um trabalho a frio.



Figura 2: Reparo por soldagem no costado de uma plataforma tipo FPSO.

A utilização de materiais compósitos poliméricos como reparo de estruturas metálicas tem sido objeto de estudo por muitos pesquisadores na indústria civil e aeronáutica, especialmente na avaliação de critérios de projeto para carregamento estático e em menor escala para avaliação de comportamento à fadiga.

Em relação à degradação promovida pela presença da ação do ambiente marinho é possível encontrar poucos estudos na área civil e aeronáutica [8]. Em ambiente *offshore*, há um número bastante reduzido de estudos para avaliação do comportamento estático e à fadiga deste tipo de reparo [8].

Foi possível identificar na literatura [8] a influência da preparação da superfície na durabilidade da junta colada quanto a carregamentos estáticos, porém não foi possível encontrar estudos avaliando este parâmetro na vida à fadiga.

Outro fator importante que pode influenciar no comportamento em longo prazo da adesão é o nível de corrosão que se encontra o substrato metálico. Os estudos encontrados na literatura [8] realizaram os testes de adesão em substratos metálicos sem a presença de alvéolos ou pites, ou seja, em substratos metálicos lisos, sem corrosão. Este fato torna-se importante à medida que as estruturas metálicas a serem reparadas no campo são constituídas de tais irregularidades. A Figura 3 mostra uma tubulação com defeito tipo corrosão externa, na qual pode-se visualizar o perfil geométrico irregular no tubo metálico, ocasionado pelo processo corrosivo externo, devido ao ambiente marinho.



Figura 3: Exemplo de perfil geométrico em tubo metálico com defeito tipo perda de espessura externa.

Nesse contexto, encontra-se a grande motivação para o desenvolvimento desta tese. O intuito é contribuir para o desenvolvimento da tecnologia de aplicação de reparos compósitos em campo, visando entender como este tipo de reparo se comporta quando submetido a carregamento estático e de fadiga e sujeito às intempéries do ambiente marinho, associado a grau severo de corrosão e diferentes modos de preparação de superfície. Este último parâmetro é de suma importância para ambientes de plataformas de petróleo, tendo em vista que a melhor preparação de superfície relatada na literatura [9], por meio de jateamento, apresenta dificuldade de execução devido à logística necessária. Face ao exposto, será estudado o comportamento estático e à fadiga em juntas coladas, que simulam reparos, sob diferentes preparações de superfície. Para tanto, serão realizados testes experimentais estáticos e cíclicos.

1.2. Objetivo

Esta tese tem como objetivo estudar o comportamento estático e à fadiga sob esforços cisalhantes de junta colada compósito polimérico/aço em quatro condições diferentes, a saber: junta colada com preparação de superfície tipo jateamento em chapa metálica sem corrosão (chapa lisa); junta colada com preparação de superfície tipo jateamento em chapa metálica com processo corrosivo elevado; junta colada com preparação de superfície com máquina rotativa de impacto em chapa de aço sem

corrosão e junta colada com preparação de superfície com máquina rotativa de impacto em chapa de aço com processo corrosivo elevado.

Esta tese também se propõe a avaliar o comportamento mecânico de juntas coladas após envelhecimento em névoa salina e estabelecer uma previsão de vida útil da junta sob diferentes condições de preparação de superfície.

Outro objetivo deste estudo é a avaliação do efeito das irregularidades geométricas ocasionadas pelo processo corrosivo na resistência estática e dinâmica de juntas.

Por fim, este trabalho visa investigar a utilização de uma máquina rotativa de impacto como metodologia de preparação de superfície nos substratos metálicos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Utilização de Materiais Compósitos Poliméricos para o Reparo de Estruturas Metálicas na Indústria de Óleo e Gás

O uso de materiais compósitos poliméricos na indústria de óleo e gás tem sido amplamente aplicado para reparar tubulações metálicas, e em menor escala, tanques de armazenamento e estruturas metálicas marítimas. A utilização desta tecnologia iniciou-se na restauração da integridade de tubulações de transporte de petróleo com defeitos tipo perda de espessura devido ao processo corrosivo [10]. Uma ilustração desta aplicação está mostrada na Figura 4.



Figura 4: Reparo de tubulação metálica por meio de laminado de compósito polimérico em região com perda de espessura [10]

Reparos por compósitos podem ser empregados em situações em que a tubulação esteja furada e com vazamento de hidrocarboneto [11] ou com fluido em temperaturas elevadas, conforme mostrado no estudo de MATTOS *et al.* [12]. Além de defeitos tipo perda de espessura e furo, esta tecnologia também é utilizada em dutos com defeitos tipo amassamento que comprometem a vida à fadiga de oleodutos e gasodutos enterrados [13, 14]. Esta técnica também é empregada para o reparo de tanques de armazenamento de petróleo e derivados, mostrado na Figura 5 [15].



Figura 5: Reparo de tanque de armazenamento por meio de laminado de compósito polimérico [15].

Mais recentemente, estruturas danificadas de plataformas marítimas tem sido restauradas com esta técnica de reparo [6, 16, 17]. A Figura 6 mostra o reparo de um tanque de lastro de uma plataforma semissubmersível que apresentava elevada perda de espessura.



Figura 6: Reparo de tanque de lastro de plataforma semissubmersível por meio de laminados de compósitos poliméricos [16].

De uma maneira resumida, o reparo inicia-se através da preparação de superfície, seguida da aplicação de uma camada de adesivo estrutural com posterior laminação do material compósito.

2.2. Adesivos Estruturais

Os adesivos são usados há muitos séculos, no entanto, este método de união só evoluiu significativamente nos últimos 60 anos. A principal razão deste fato é que os adesivos utilizados em aplicações tecnicamente avançadas são baseados em polímeros sintéticos, cujo desenvolvimento ocorreu em meados dos anos de 1940. Os polímeros sintéticos possuem propriedades que lhes permitem aderir facilmente à maioria dos materiais e uma resistência capaz de transmitir esforços elevados [18]. Um adesivo pode ser definido como um material polimérico que, quando aplicado em superfícies pode ligá-los e resistir à sua separação [19]. Um adesivo estrutural é um tipo de adesivo que resiste a elevados esforços e possui resistência ao cisalhamento mínima de 7 MPa [19].

Os adesivos estruturais são polímeros termofixos ou elastômeros rígidos formados pela reação de dois componentes que apresentam elevadas propriedades mecânicas e boa resistência química [20]. Atualmente vários materiais poliméricos são utilizados como adesivos estruturais, dentre eles os mais importantes são:

Uretano: formado pela reação de polióis com blendas de isocianatos, possui elevada aderência sobre metais, plásticos e compósitos, apresentando baixa contração, alta deformação e baixa exotermia na polimerização (cura). Apresenta elevada propriedade adesiva, coesiva e resistência química. Exige, no entanto, boa preparação de superfície e não são indicados para temperaturas elevadas, superiores a 80° C [18, 20].

Epóxi: derivado da epícloridrina, polimerizável por endurecedores amínicos, amídicos, mercaptanos ou anidridos, possui elevada resistência coesiva e tenacidade, adesão sobre enorme gama de substratos e resistência química. No entanto é, em geral, muito rígido [20].

Metacrilato: derivado de monômeros acrílicos e polimerizado por peróxidos orgânicos, possui excelente adesão em materiais plásticos com pequena ou nenhuma preparação de superfície, tempos de cura curtos e permite preenchimentos com elevada espessura, porém apresenta forte odor, alta exotermia e deve ser armazenado sob refrigeração [20].

Fenólico: derivado da condensação de fenol e formaldeído. Possui boa resistência à água e elevadas temperaturas [18].

As ligações adesivas oferecem muitas vantagens quando comparadas com os métodos tradicionais de ligação, tais como parafusos, soldagem, rebites e outras ligações mecânicas. As principais vantagens apontadas às ligações adesivas são: distribuição mais uniforme das tensões; amortecimento de vibrações; união de materiais diferentes; ausência de calor; simplicidade na aplicação e resistência à corrosão. As principais desvantagens inerentes à ligação com adesivos são: baixa resistência ao esforço de arrancamento; limitada resistência a temperaturas elevadas; tempo de cura; dificuldade de inspeção; necessidade de preparação de superfície; reduzida disponibilidade de curvas de vida à fadiga na literatura e dificuldade de desmontagem [18].

Em geral, adesivos estruturais possuem elevado teor de carga e são de viscosidade elevada e a matriz do compósito são resinas de baixa viscosidade que facilitam a fabricação dos laminados. Neste estudo, dois adesivos foram utilizados, sendo o menos viscoso usado como resina de impregnação na manta de fibra de vidro e das camadas de fibra de carbono. Adesivos pastosos, de elevada viscosidade, foram utilizados na primeira camada que promove a regularização da superfície metálica corroída. A utilização de adesivos pastosos nesta região deve-se ao fato da necessidade

de tixotropia na localização do defeito, ou seja, o adesivo não pode escoar pela ação da gravidade, pois nas áreas corroídas haverá necessidade de espessuras de adesivos maiores. Por exemplo, o reparo na lateral do costado de uma plataforma tipo navio ficaria inviável, pois um adesivo de baixa viscosidade escoaria pela ação da gravidade, quando aplicado em regiões de elevada perda de espessura. Porém, ambos adesivos necessitam da preparação de superfície do substrato para uma boa adesão. SAMPAIO *et al.* [21] avaliaram a diferença entre juntas coladas com adesivos de baixa viscosidade e alta viscosidade, segundo os parâmetros de rugosidade e tipo de granalha no jateamento. Os autores identificaram que, para estes últimos, um aumento nos valores dos parâmetros de rugosidade R_a e R_t é acompanhado de um aumento da resistência mecânica da junta colada. Para adesivos de baixa viscosidade não houve diferença significativa na resistência mecânica ao se elevar os parâmetros de rugosidade R_a e R_t . Isto é atribuído ao fato destes adesivos menos viscosos serem mais influenciados pela microrrugosidade, que pode ser obtida por meio de tratamento ácido, enquanto que os adesivos mais viscosos são mais afetados pela macrorrugosidade. Os autores também constataram que os maiores níveis de rugosidade média foram observados para os substratos atacados com a granalha com maior diâmetro médio de grão (granalha G25).

2.3. Materiais Compósitos

Um material compósito é formado pela união de dois materiais de naturezas diferentes, resultando em um material de desempenho superior àquela de seus componentes tomados separadamente. O material resultante é um arranjo de fibras, contínuas ou não, de um material resistente, denominado reforço, onde são impregnados em uma matriz de resistência mecânica inferior às fibras [22].

2.3.1. Fibras de Reforço

A fibra é o elemento constituinte que confere ao material compósito suas características mecânicas: rigidez, resistência à ruptura, etc. Os tipos mais comuns de fibras são: de vidro, de aramida, carbono, boro, etc. As fibras podem ser definidas como sendo unidirecionais, quando orientadas segundo uma mesma direção; bidimensionais, com as fibras orientadas segundo duas direções ortogonais (tecidos); ou com as fibras

orientadas aleatoriamente (manta); e tridimensionais, quando são orientadas no espaço tridimensional [22].

Uma das razões para o uso de fibras como reforço consiste no fato conhecido experimentalmente de que a resistência e rigidez de um material, quando em forma de fibra, são algumas ordens de magnitude maiores que os valores obtidos para o mesmo material em bloco. Por exemplo, um vidro comum como o da janela apresenta valores de resistência à ruptura na faixa de 0,7 GPa. Já em forma de fibras, a resistência vai a 3,5 GPa ou até a 4,6 GPa, dependendo do tipo da fibra [22].

Aparentemente, esse fenômeno foi primeiro demonstrado por Griffith [23]. Em 1920, ele mediu a resistência de barras de vidro e identificou que a resistência crescia com a redução da espessura da fibra: com uma espessura de 0,1 mm, o corpo de prova já apresentava uma resistência quase tão baixa quanto o vidro em bloco. Análise desses resultados foi feita por Gordon [24]. Os altos valores de resistência observados para as fibras se aproximam dos valores teóricos, sendo a discrepância entre os valores de fibras e em bloco explicadas pela presença de imperfeições ou falhas no material. Um bloco de material possui uma população de trincas inerentes ao processo de fabricação. Já uma fibra de vidro, por exemplo, é fabricada com diâmetros na faixa de 0,010 mm. Esse diâmetro diminuto torna inviável o desenvolvimento excessivo de trincas durante a fabricação. Isso explicaria os altos valores de resistência das fibras comparados aos dos materiais em bloco. Também, em virtude do próprio processo de fabricação, a estrutura da fibra tende a ser muito mais bem organizada, mesmo nos casos não-cristalinos, que o mesmo material em bloco [22].

2.3.1.1. Fibras de Vidro

Fibras de vidros possuem como base a sílica (~50-60% SiO₂) e uma variedade de óxidos de cálcio, boro, sódio, alumínio, ferro, etc. A Tabela 1 mostra a composição de algumas fibras de vidro típicas. Estas podem ser classificadas em tipo E, C e S. A designação “E” representa as boas propriedades de isolamento elétrico; “C” indica boa resistência à corrosão e “S” a boa resistência a temperaturas elevadas. A fibra de vidro mais utilizada, cerca de 90%, é a tipo E [25].

Tabela 1: Composição química aproximada de fibras de vidro (% peso) [25].

Fibras/Composição	Tipo E (%)	Tipo C (%)	Tipo S (%)
SiO ₂	55,2	65,0	65,0
Al ₂ O ₃	8,0	4,0	25,0
CaO	18,7	14,0	-
MgO	4,6	3,0	10,0
Na ₂ O	0,3	8,5	0,3
K ₂ O	0,2	-	-
B ₂ O ₃	7,3	5,0	-

O vidro possui uma estrutura amorfa, isto é, isento de um ordenamento longo característico de material cristalino. As fibras de vidro são isotrópicas, o módulo de elasticidade e o coeficiente de expansão térmica são os mesmos ao longo do eixo da fibra e perpendicular a ela. A fibra de vidro tipo E foi a utilizada na primeira camada do reparo deste estudo e suas propriedades típicas estão ilustradas na Tabela 2. É possível notar a sua baixa densidade e sua elevada resistência, enquanto que o valor do módulo é moderado, quando comparado com um aço típico, por exemplo, SAE 1045, no qual o valor da densidade é 7,8 g/cm³, a resistência mecânica é aproximadamente 560 MPa e o módulo de elasticidade é dado por 210 GPa.

Tabela 2: Propriedades típicas de fibras de vidro tipo E [25].

Densidade (g/cm ³)	Limite de resistência (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coeficiente de expansão térmica (K ⁻¹)
2,55	1750	70	4,7 x 10 ⁻⁶

2.3.1.2. Fibras de Carbono

São fibras constituídas predominantemente de átomos de carbono (93 a 95%). São obtidas a partir de um precursor, que pode ser poliácridonitrila (PAN), piche ou

celulose (Rayon). Essas fibras apresentam como características elevado módulo (100-400 GPa) e elevada resistência específica [25]. Sua estrutura apresenta-se na forma gráfica, no qual os átomos de carbono são arranjados em planos paralelos segundo um arranjo hexagonal, conforme Figura 7.

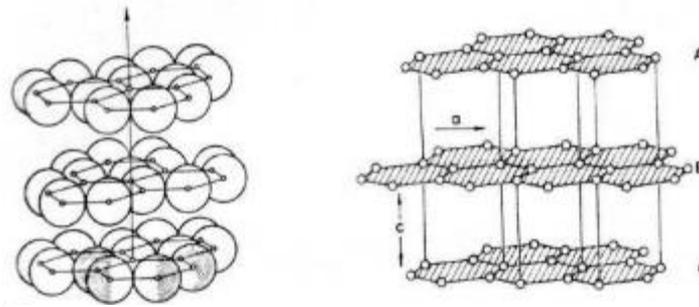


Figura 7: Estrutura hexagonal da fibra de carbono.

As fibras de carbono podem ser encontradas em quatro principais tipos, a depender de suas propriedades [25]:

- Alta Resistência (HS - *High Strength*)
- Módulo Intermediário (IM - *Intermediary Modulus*)
- Alto Módulo (HM - *High Modulus*)
- Módulo Superior (UHM - *Ultra High Modulus*).

Pode-se destacar como suas vantagens: maior módulo específico comparado com materiais metálicos; boa resistência aos solventes, ácidos, bases e umidade; baixo coeficiente de expansão térmica; baixa densidade específica ($1,66 \text{ g/cm}^3$) e alta resistência à fadiga. Suas principais desvantagens são: baixa resistência ao impacto; alta condutividade elétrica e elevado custo [25]. Foi utilizada a fibra de carbono de alta resistência nesta tese.

O processo de fabricação dessas fibras envolve basicamente as seguintes etapas [26]:

- 1- Tratamento de estabilização, para prevenir a fibra de sofrer fusão em tratamentos térmicos subsequentes.
- 2- Tratamento térmico de carbonização, que remove a maioria dos elementos não-carbônicos.

3- Tratamento térmico de grafitação (opcional), que melhora as propriedades da fibra obtidas na etapa 2.

2.3.2. Matrizes

As matrizes têm como função principal transferir as solicitações mecânicas às fibras e protegê-las do ambiente externo. As matrizes podem ser resinosas (poliéster, epóxi, etc.), minerais e metálicas [22]. As principais matrizes em compósitos de fibras de vidro e carbono utilizadas como reparos em substratos metálicos são as resinas poliéster e epóxi. Apresentam como vantagens a resistência à uma variedade de produtos químicos e relativo baixo custo. Resinas a base de poliéster contraem entre 4 e 8% durante a cura. Resinas epóxis são mais caras que as poliéster, porém possuem melhor resistência à absorção de umidade, a temperaturas elevadas, boa adesão com as fibras de vidro e carbono e menor contração durante o processo de cura (cerca de 3%) [25].

Muitas propriedades físicas (viscosidade, resistência ao calor, módulo de elasticidade e coeficiente de expansão térmica) das matrizes poliméricas mudam abruptamente com o alcance da temperatura de transição vítrea (T_g). A T_g é uma temperatura acima da qual o polímero deixa de ter um comportamento rígido e passa a ter um comportamento borrachoso, perdendo suas características estruturais. A T_g é função da estrutura química do polímero [25]. Salienta-se que nos materiais termorrígidos a queda de propriedades mecânicas acima da T_g é menor que nos termoplásticos, face aos primeiros possuírem cadeias cruzadas mais rígidas. O que se observa nos termorrígidos é uma maior movimentação entre as redes de cadeias cruzadas.

Um problema importante a ser destacado nas matrizes poliméricas é o efeito do ambiente sobre estas. Polímeros podem sofrer degradação em temperaturas elevadas e pela absorção de umidade, que pode levar a um inchamento do polímero e uma redução da T_g . Em compósitos de fibra de vidro, assim como em outros tipos de compósitos, podem ocorrer inchamento devido aos efeitos higrotérmicos, e com isto provocar altas tensões no compósito [25].

Resinas termofixas (poliéster, epóxis, etc) possuem uma estrutura molecular bastante rígida, que fornecem boas propriedades mecânicas, porém torna o material um pouco frágil, com uma tenacidade a fratura baixa, ou seja, uma baixa resistência à

propagação de trincas [25]. A adição de agentes tenacificantes é uma alternativa para aumentar a tenacidade à fratura.

A escolha do tipo de fibra e da matriz depende fundamentalmente da aplicação que será dada para o material compósito: características mecânicas elevadas, resistência à alta temperatura, resistência à corrosão, etc. O custo em muitos casos pode também ser um fator de escolha entre um ou outro componente. Deve ser observada também a compatibilidade entre as fibras e as matrizes. Para melhorar a adesão entre uma fibra e uma matriz, é necessário que as fibras, após sua fabricação, passem por um processo de silanização. O silano é um componente químico que possui um radical inorgânico, que reage com a fibra e um radical orgânico, que reage com a matriz [25].

2.4. Adesão

Adesão é uma técnica para unir materiais que se mostra capaz de substituir ou suplementar métodos convencionais de junção, tais como rebiteamento, soldagem e fixação mecânica, numa grande variedade de aplicações.

O entendimento das forças atrativas presentes em átomos e moléculas, que estão presentes no processo de adesão, é necessário para explicar como um adesivo se adere a um substrato. As forças de união podem ser classificadas em dois tipos: primárias, que são de fato as ligações químicas, como as covalentes e iônicas; e secundárias, representadas pelas interações químicas, como forças de dispersão (van der Waals), pontes de hidrogênio e dipolo-dipolo. É importante destacar que todas elas são efetivas somente quando a distância é inferior a 10 Angstroms e reduzem rapidamente à medida que a distância entre os componentes aumenta [27].

Forças dipolo-dipolo ou eletrostáticas ocorrem entre átomos ou moléculas que apresentam carga. Estas forças propiciam uma forte interação e contribuem significativamente para o processo de adesão [28].

As ligações de hidrogênio são forças intermoleculares mais fortes que as do tipo dipolo-dipolo e são oriundas da força de atração entre o átomo de hidrogênio e átomos de oxigênio, flúor e nitrogênio, devido a diferença de eletronegatividade.

Estes dois tipos de forças supracitados estão presentes somente em moléculas polares, cujo dipolo é permanente. Por outro lado, como observado por van der Waals, certas moléculas apolares também eram influenciadas por algum tipo de força intermolecular, chamadas forças de dispersão. Estas forças são devido à separação de

cargas temporária ou instantânea em uma molécula apolar provocada por movimentos desordenados dos elétrons na molécula, como ocorre no gás hidrogênio (H_2), por exemplo [29].

O somatório das forças de ligação e intermoleculares citadas anteriormente formam a força de coesão, fenômeno que mantém juntas as partículas de uma substância.

A tensão superficial é uma medida direta das forças interatômicas / intermoleculares existentes na superfície dos materiais. De fato, a tensão superficial resulta da atração entre os átomos superficiais e aqueles dispostos no interior do material. Esta atração tende a reduzir o número de átomos ou moléculas na região superficial, resultando em um aumento da distância interatômica / intermolecular nesta região. Este aumento das distâncias eleva a energia de superfície em relação a uma energia equivalente no interior do material. Para que a superfície do material atinja uma configuração equivalente à configuração interna do material há necessidade, portanto, de realizar trabalho no sistema. Isto explica porque existe uma tensão superficial e porque há energia livre de superfície [19, 30]. A tensão superficial dos componentes de uma junta, somando-se com as forças de coesão das moléculas do adesivo, devem ser avaliadas antes de preparar uma junta colada. Neste caso, a tensão superficial do adesivo deve ser menor que a do substrato, caso contrário, o adesivo irá adquirir forma esférica e não se espalhará pela superfície.

As forças de interação entre o adesivo e o substrato podem ser medidas como o trabalho necessário para ocorrer uma separação das duas superfícies entre o adesivo e o substrato. Esta força é dependente das forças intermoleculares que existem no material e sobre o espaço intermolecular. Sendo, às vezes, chamada de energia de superfície (γ).

Um método de medir a energia de superfície de um dado material sólido foi desenvolvido por Zisman, que propôs que a tensão crítica de superfície (γ_c) de um sólido poderia ser estimada pela medida do ângulo de contato de uma série de líquidos, com tensão superficial (γ_{LV}) conhecida, formada por uma pequena gota do líquido sobre a superfície do sólido. Os dados dos cossenos das medidas de ângulo de contato são dispostos graficamente em função das tensões superficiais dos líquidos utilizados. A extrapolação da reta obtida até o cosseno igual a 1, dará a tensão crítica de superfície (γ_c), ou seja, seria a condição na qual um líquido de mesma tensão superficial formaria um ângulo 0° com a superfície do sólido, que também pode ser definido como molhabilidade [31, 32], detalhado mais adiante.

2.4.1. Mecanismos de Adesão

As teorias da colagem adesiva definem quatro mecanismos de interação distintos entre o adesivo e o substrato a ser colado. São eles: a interligação mecânica, as interações de adsorção, as forças eletrostáticas e os mecanismos de difusão. Estes mecanismos estão relacionados às forças intrínsecas que podem ocorrer entre a interface do adesivo e substrato [19]. Cada mecanismo, dependendo da área de aplicação, terá no estudo da colagem adesiva uma relevância maior ou menor [33].

Neste estudo são abordados os mecanismos que atuam nas juntas coladas de metal e compósitos poliméricos. O mecanismo de interligação mecânica, que está relacionado com a rugosidade da superfície do substrato, e de interação de adsorção que está relacionado com a capacidade do adesivo molhar o substrato, são os que proporcionam essa maior resistência nas juntas.

2.4.1.1. Interligação Mecânica

A ideia da ligação mecânica com irregularidade na superfície do aderente para todo fenômeno de colagem é antiga e intuitiva. Requerer uma rugosidade superficial para aumentar a adesão já é conhecida há tempos na colagem de papéis, couros e madeiras. Isso porque a maioria desses substratos são fibrosos e o sucesso da colagem deve envolver penetração e entranhamento do adesivo entre as fibras.

Alguns trabalhos demonstram que só a rugosidade em escala relativamente macroscópica, não promove uma boa aderência em estruturas coladas. Recentemente, particularmente com técnicas de avaliação mais sofisticadas, a atenção está focada para rugosidades em menor escala ou ao nível de micrômetros [33].

A interligação mecânica na microescala é um fator importante para conseguir uma alta resistência da cola adesiva. Para materiais fibrosos, a interligação mecânica pode parecer óbvia, embora para metais/óxidos metálicos ou em microescala é necessário um alto grau de sofisticação para exame da superfície.

A rugosidade responsável pelo mecanismo de adesão por ancoramento pode ser produzida tanto por tratamento mecânico da superfície do substrato ou por tratamento oxidativo, com soluções ácidas. Sampaio [33] mostra em seu trabalho que a

utilização destes dois tipos de tratamentos juntos promovem um controle maior da rugosidade associado a uma melhora nas propriedades de adesão do sistema.

A ancoragem mecânica do adesivo parece ser o fator primordial no processo de ancoragem de substratos porosos. Frequentemente a ligação entre o adesivo e o substrato não poroso melhora após o substrato receber um tratamento abrasivo. O efeito benéfico da rugosidade na superfície ocorre devido à ancoragem mecânica, formação de uma superfície mais limpa, formação de uma superfície mais reativa e aumento da área de contato [32].

2.4.1.2. Teoria da Adsorção

A teoria da adsorção estabelece que a adesão é resultado do contato molecular entre dois materiais e as forças de atração que se desenvolvem na superfície. A adesão resulta da adsorção de moléculas do adesivo pelo substrato e as forças secundárias de van der Waals passam a atuar. Para estas forças se desenvolverem as respectivas superfícies não devem ser separadas mais alguns nanômetros de distância. Portanto, o adesivo deve ter um contato molecular muito próximo com a superfície do substrato. Para que este contato ocorra é preciso que haja uma boa molhabilidade. Esta molhabilidade ocorre quando o adesivo consegue fluir entre as irregularidades existentes na superfície do substrato, preenchendo desta forma os vales da superfície. Quando isto não ocorre pode haver o acúmulo de minúsculas bolhas de ar ao longo da interface dando origem a regiões com falta de adesivo (7).

A molhabilidade é um parâmetro importante na superfície de um substrato para uma adesão satisfatória. Molhabilidade pode ser quantitativamente definida com referência a uma gota de líquido em repouso sobre uma superfície sólida. A formação desta gota na superfície sólida pode ser descrita pelo ângulo de contato, θ , entre a superfície sólida e a tangente à superfície do líquido no ponto de contato como mostrado na Figura 8. O molhamento de um sólido por um líquido ocorre quando a interação entre as moléculas do líquido com a interface sólida é maior do que a interação das moléculas entre si.

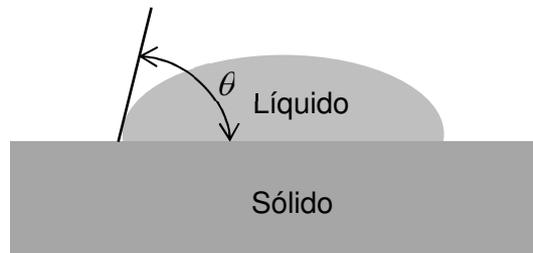


Figura 8: Ângulo de contato entre um líquido e um sólido.

O valor de θ pode variar de zero – molhagem completa pelo líquido – a 180° quando o líquido tem a forma de uma gota esférica e não molha de todo o sólido, como mostrado na Figura 9.

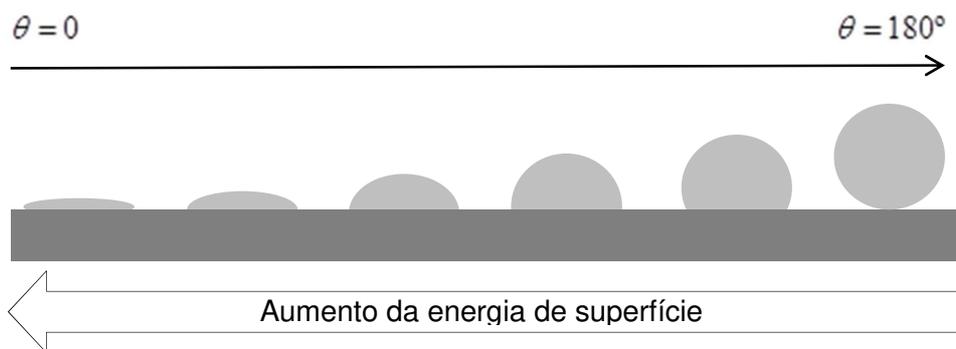


Figura 9: Influência do ângulo de contato com a energia de superfície.

Um líquido espalha-se mais num sólido com uma maior energia de superfície, e menos com uma menor energia de superfície, sendo tanto maior a molhabilidade quanto maior a diferença entre as energias de superfície. A Figura 10 ilustra este fenômeno, no qual se tem um adesivo epóxi em substrato metálico e poliméricos (PVC, Polietileno e Teflon). Observa-se que a maior molhabilidade obtida foi no substrato metálico, face à sua elevada energia de superfície quando comparada com a do adesivo epóxi e a mais baixa foi no Teflon [18]. Isto é uma indicação que materiais de reduzida energia de superfícies são difíceis de colar.

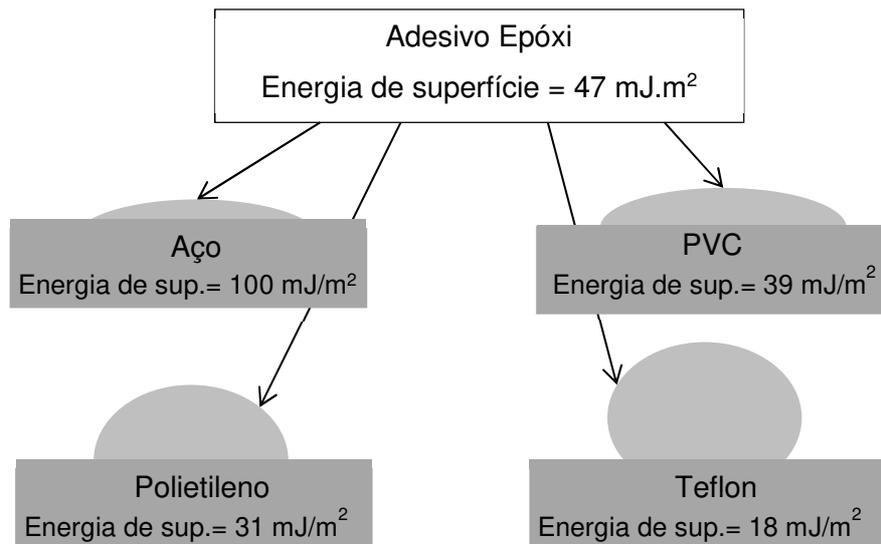


Figura 10: Molhabilidade de um adesivo epóxi sobre diferentes substratos [18].

Ressalta-se que apenas uma camada molecular de contaminantes pode impedir uma correta molhabilidade do substrato pelo adesivo. Este vai molhar os contaminantes que estão na superfície em vez do próprio substrato. Como a maior parte dos contaminantes (óleos, gorduras, impressões digitais, partículas soltas, etc.) possui uma baixa energia superficial, o adesivo não consegue molhar a superfície e formar um filme contínuo. Para tanto, é necessário a preparação da superfície, que consiste na limpeza, seguida de criação de rugosidade por meio de algum tipo de tratamento superficial.

HARRIS e BEEVERS [9] relatam que a mudança de rugosidade e limpeza promovida pela preparação de superfície são parâmetros que explicam a melhora na adesividade da junta. Outros fatores também são mencionados, tais como o aumento de área efetiva, alteração na molhabilidade medida através da técnica de ângulo de contato, modificando, desta forma, a energia superficial e também a presença de elementos químicos na superfície metálica, como exemplo, silano.

Vale salientar que o conceito de molhabilidade é aplicável em adesivos que possuem um valor de viscosidade que permitam que o adesivo se espalhe pelo substrato sem a ação de uma força externa. Este conceito não pode ser aplicado em adesivos mais viscosos, pastosos, cujo espalhamento dá-se somente mediante de aplicação de força externa.

2.5. Preparação de Superfície do Substrato Metálico

Uma das conclusões mais importantes que emergem da teoria da adesão é o fato de os tratamentos de superfície serem quase sempre necessários para adequar a rugosidade da superfície e/ou a energia de superfície. Esta operação é muito delicada e deve ser executada com muito cuidado para ter sucesso [18]. Os principais métodos para a preparação de superfície para reparo de componentes de aço na indústria do petróleo são: jateamento com granalha de aço, jateamento com esponja de poliuretano, lixamento com esmerilhadeira, lixamento manual, agulheiro e máquina rotativa. Segundo a literatura [33, 34, 35], o jateamento é o que fornece melhor perfil de rugosidade, embora o jateamento com esponja de poliuretano venha sendo cada vez mais utilizado por proporcionar um processo mais limpo [37]. Tem crescido também a utilização de máquina rotativa de impacto para a preparação de superfície [11, 38].

Embora existam muitas vantagens no reparo de estruturas de aço usando materiais compósitos, deve ser dada a devida atenção à interface de união entre o aço e compósito, que é considerada o ponto mais fraco do sistema de reforço e desempenha um papel crítico na integridade da junta adesiva [39, 40, 41]. Dentro desse contexto, uma das etapas mais importantes do procedimento de reparo é a preparação da superfície, que deverá manter o compósito unido ao aço durante a vida útil da estrutura, sem qualquer tipo de dano, como a corrosão sob o reparo ou descolamento. O desempenho de um adesivo é fortemente dependente da sua capacidade de aderir adequadamente ao substrato.

Na literatura [36, 42, 43, 44, 45, 46], o tratamento e a caracterização das superfícies do aço foram amplamente avaliados. O mau desempenho de uma junta está, em geral, associado à má preparação da superfície, o que leva à falha prematura da junta adesiva.

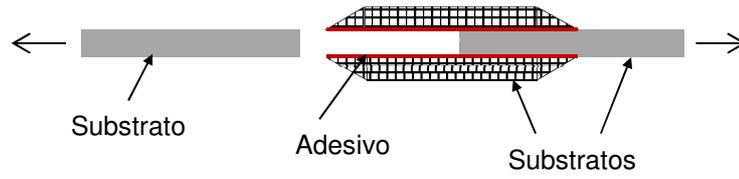
O jateamento é um tipo de tratamento que consiste em projetar sobre a superfície granalhas que impactam o metal e criam a rugosidade em função do ajuste de parâmetros (vazão, ângulo de ataque, distância da peça) e no tamanho da granulação da granalha. As partículas projetadas são, em geral, óxidos muito duros (Al_2O_3 por exemplo) ou certos carbonetos (ex: SiC) [18]. BALDAN [35] e HARRIS e BEEVERS [9] avaliaram a influência do jateamento com granalha na energia de superfície de substratos metálicos pela técnica de ângulo de contato, onde se constatou que ocorria uma elevação da energia de superfície à medida que se mudava a topografia através da gramatura da granalha, quando esta proporcionava um acréscimo de área. Além da eficiência na remoção de produtos de corrosão das superfícies, promove a melhor

rugosidade do perfil em comparação com outros tipos de preparação da superfície, como lixamento mecânico, lixamento manual, escovas de aço e agulheiros. Como resultado, atualmente, a maioria dos reparos *offshore* críticos são realizados usando jateamento [6, 16, 47, 48].

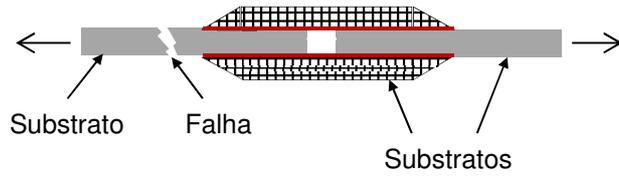
O processo de jateamento requer uma elevada logística complexa quando aplicada em plataformas de petróleo e, dependendo da localização da estrutura danificada, não pode ser usada. Além disso, os equipamentos de jateamento são robustos e, inevitavelmente, requerem máquinas pesadas, como um compressor de ar e andaimes para aplicações elevadas. A operação produz grandes quantidades de poeira e detritos no ambiente [49] e, uma vez que a gralha do jato não pode cair no mar, proteção adicional também deve ser fornecida. Jateamento é, então, um procedimento laborioso e de alto custo para o qual, até à presente data, não há substituto eficiente.

Este estudo busca contribuir com essa lacuna de conhecimento, avaliando um tratamento de superfície metálico alternativo por uma máquina rotativa, que usa impacto e rotação [49].

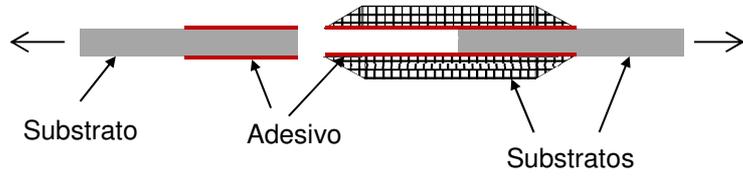
O principal objetivo da preparação da superfície é evitar que a falha da junta colada ocorra na interface entre o adesivo e o substrato metálico ou entre este segundo e o laminado compósito, designada como falha adesiva. A Figura 11a ilustra uma falha adesiva entre o substrato metálico e o adesivo, o qual caracteriza que a preparação de superfície foi o ponto mais fraco da união. O modo de falha desejado é quando esta ocorre no substrato metálico, fato que acontece somente quando a resistência adesiva e a resistência do laminado compósito é superior a do substrato, mostrado na Figura 11b. Outro tipo de modo de falha desejado é a coesiva, quando a ruptura dá-se no interior da camada adesiva, ilustrado na Figura 11c, cuja ocorrência está associada ao alcance do limite de resistência cisalhante do adesivo. Há ainda um quarto modo de falha, quando ocorre no substrato aderente colado, neste caso o compósito, mostrado na Figura 11. Nesta situação o limite de resistência à tração do laminado compósito foi o ponto mais fraco na junta colada. É importante salientar que poderá ocorrer uma combinação de modos de falha.



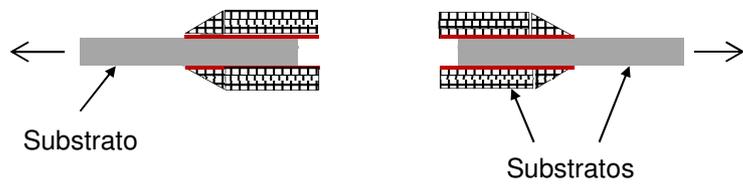
a) Falha adesiva de uma junta colada.



b) Falha no substrato de uma junta colada.



c) Falha coesiva de uma junta colada.



d) Falha no substrato aderente colado de uma junta colada.

Figura 11: Tipos de falhas em juntas coladas.

2.6. Tipos de Juntas Coladas para Avaliação da Resistência ao Cisalhamento

Os principais tipos de juntas coladas submetidas a esforços cisalhantes estão ilustradas na Figura 12, a saber: simples, também denominada SLJ do idioma inglês *Single Lap Joint*; simples com tira de compósito, SBS do inglês *Single Butt Strap*; dupla com tira de compósito, DBS do inglês *Double Butt Strap* e Dupla, DLJ do inglês *Double Lap Joint*. Os testes por meio de juntas coladas têm como objetivo avaliar a eficiência da união entre os substratos, representando o comportamento mecânico que está ocorrendo no componente estrutural. A Figura 12a e a Figura 12d representam ilustrações de colagem somente de substratos iguais, sejam metálicos ou compósitos poliméricos, enquanto que a Figura 12b e a Figura 12c ilustram sistemas colados híbridos, nos quais os substratos metálicos são unidos por materiais compósitos.

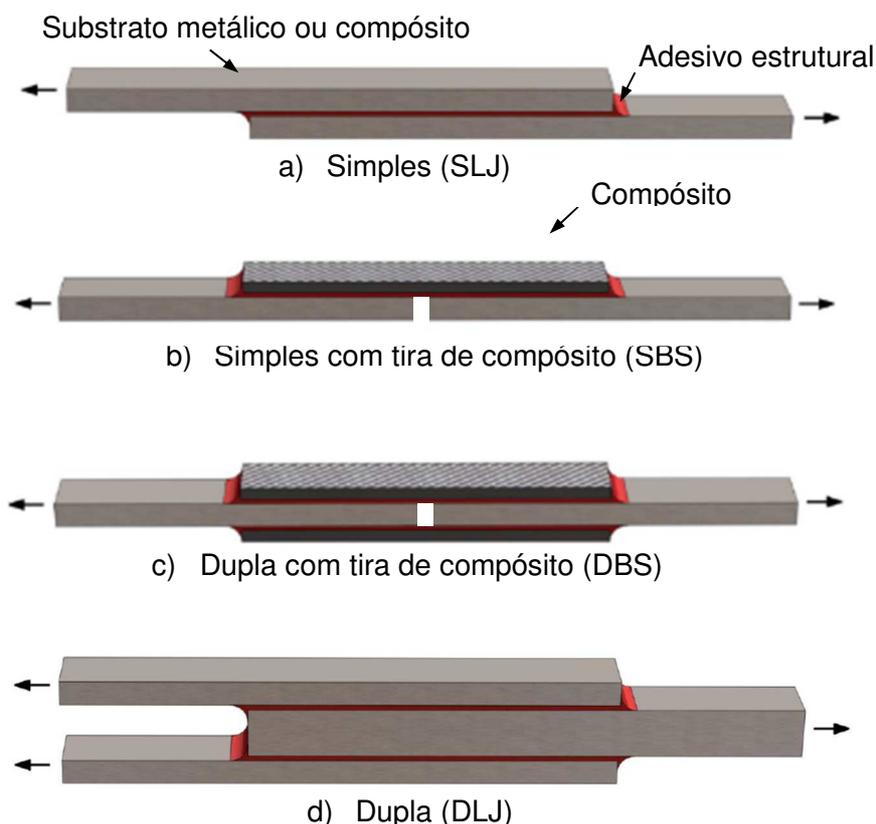


Figura 12: Principais tipos de juntas de cisalhamento.

Neste estudo, numa primeira bateria de testes, avaliou-se a junta SBS, as quais foram ensaiadas aos pares para evitar flexão durante o teste, tornando-as próximas às juntas tipo DBS. Na segunda bateria de ensaios foram utilizadas juntas tipo DBS.

2.7. Análise de Tensões em Juntas Coladas

O primeiro tipo de junta utilizada para avaliação das tensões foi a simples (SLJ), como mostrado na Figura 12a, e pode ser considerada a mais importante para o entendimento do comportamento mecânico das tensões na interface adesiva, tendo em vista que a maioria das análises e testes experimentais tem sido realizados neste tipo de junta [50]. Numa junta do tipo SLJ, duas chapas separadas, denominadas substratos, são unidas por meio de uma camada adesiva. Esta configuração estrutural pode ser facilmente analisada se é assumido que os substratos são rígidos e o adesivo contém somente tensões de cisalhamento, conforme mostra a Figura 13a. VOLKERSEN [51] analisou uma junta similar, porém os substratos foram modelados com comportamento elástico. Esta condição de contorno implica que as deformações nos substratos não são uniformes ao longo do seu comprimento axial, ocasionando uma distribuição de tensões cisalhantes não-lineares ao longo da região colada, como mostrado na Figura 13b, cujo fenômeno é denominado cisalhamento diferencial [51]. Este foi o primeiro modelo de análise de tensões em juntas coladas.

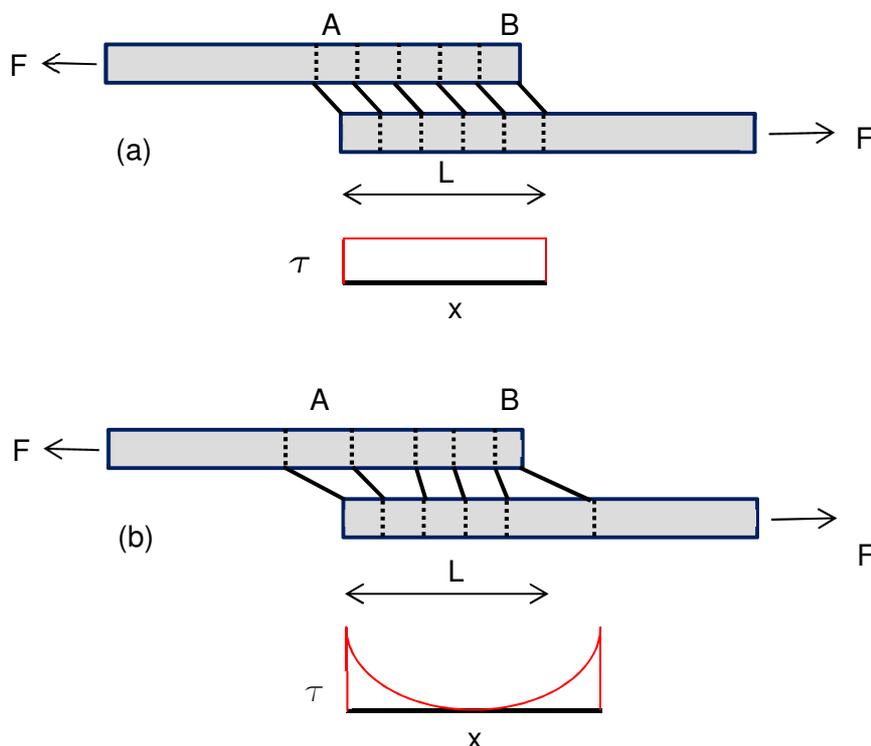


Figura 13: Junta colada do tipo SLJ: (a) modelo de junta com substratos rígidos [51] e (b) modelo com substratos elásticos [52].

Entretanto, não foi levado em consideração o fato das duas forças opostas não serem colineares [51], resultando em um momento fletor nos substratos nas extremidades do adesivo, permitindo dessa forma a rotação da junta, como mostra a Figura 14. Os substratos nas juntas coladas do tipo SLJ experimentam cargas de flexão, fato gerador de um estado de tensões complexos, promovendo tensões de arrancamento nas extremidades da junta [52].

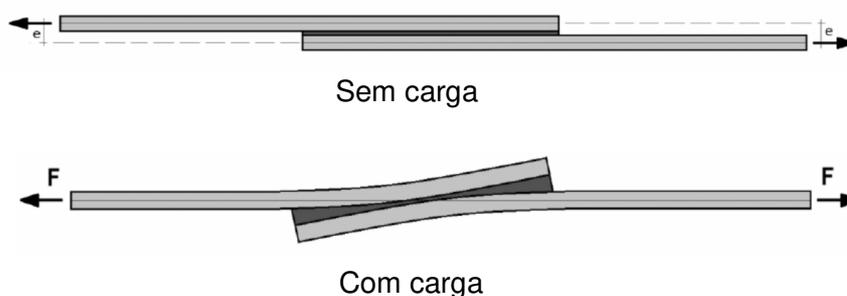


Figura 14: Rotação numa junta simples (SLJ)

Este efeito de rotação foi introduzido por GOLAND e REISSNER [53] em novo modelo, adicionando o efeito do momento fletor na junta colada. Uma correção foi proposta por HART-SMITH [54] na determinação do momento fletor crítico no modelo de GOLAND e REISSNER [53] e incluiu a plasticidade do adesivo, o desbalanço de rigidez entre os substratos e a influência de compósitos no lugar de metais isotrópicos aderentes. Em outro estudo, ZOU *et al.* [55] empregaram a teoria clássica de laminados planos e um modelo constitutivo de interface de adesivo para obter soluções analíticas para tensões de cisalhamento e arrancamento no adesivo em juntas balanceadas de compósito/metal tipo DBS. Posteriormente, os aderentes foram modelados por MORTENSEN e THOMSEN [56] pela teoria clássica de laminados e trataram os substratos como laminados ortotrópicos. Os substratos foram tratados como vigas ou placas largas em flexão, considerando comportamento linear e não-linear elástico. Desta forma, laminados compósitos assimétricos e desbalanceados podem ser avaliados utilizando-se este tipo de análise.

As juntas tipo DBS são carregadas somente em tração e não há momento externo, porque o carregamento é aplicado através do adesivo nos substratos fora do eixo neutro de forma simétrica, porém é possível verificar momentos internos, como ilustrado na Figura 15 [52].

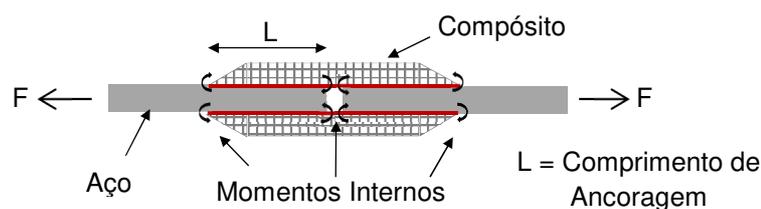


Figura 15: Momentos internos numa junta tipo DBS.

2.7.1. Efeito do comprimento de ancoragem “L”

Para o entendimento do comportamento mecânico de juntas coladas, é necessário dividi-las em dois tipos: juntas com comprimento de ancoragem (L) curtas e longas [16, 57]. Ancoragem é o comprimento da região colada a partir da partição do aço, como mostrado na Figura 15.

Em juntas de comprimento de ancoragem (L) curto, ilustrado no lado esquerdo da Figura 16, ao se aplicar uma carga (F) de baixa intensidade (por exemplo, 20% do limite de resistência), esta apresentará um deslocamento relativo entre suas extremidades, denotado por δ e a resposta é linear elástica, denotado por L.E, como mostrado no gráfico 1, *F versus* δ . Neste momento, as tensões cisalhantes na junta estão abaixo do limite linear elástico (L.E.) conforme ilustrado no gráfico 2 *τ versus x*. Neste gráfico, é possível observar que as tensões cisalhantes são maiores na extremidade da junta, ponto “e”, e no centro, ponto “c”. Quando a tensão alcança a máxima cisalhante no centro da área colada, região “c”, o adesivo começa a se deformar plasticamente, mostrado no gráfico 3, tem-se, então, o início do comportamento elasto-plástico nos pontos “e” e “c”. À medida que a carga cresce gradualmente, o comprimento da região que atingiu o estado plástico avança, enquanto que o restante da região com adesivo permanece na região elástica. Esta resposta elasto-plástica é denotada como E.P. A curva carga cisalhante por deslocamento torna-se ligeiramente não-linear devido ao avanço da zona plástica com o incremento de carga. A fratura da junta ocorrerá tão logo a tensão máxima cisalhante alcance toda a linha de colagem, momento em que o adesivo não será mais capaz de transferir a carga para o aderente. Este fato implica que a resistência da junta curta é proporcional ao comprimento de ancoragem “L”. Este comportamento está ilustrado na Figura 17 e foi observado nos trabalhos experimentais de alguns autores [15, 16, 52, 58, 59, 60]. A literatura sugere [60, 61, 62] que este comportamento, em juntas de comprimento de ancoragem curto, pode ser explicado por

dois efeitos: elevada sensibilidade a pequenos defeitos no comprimento de ancoragem, danos locais nas extremidades dos aderentes e elevadas tensões de arrancamento que ocorrem em reduzidos comprimentos de ancoragem.

Para o entendimento de juntas de comprimento de ancoragem longo, utiliza-se a mesma junta para análise, ilustrada no lado direito da Figura 16. Novamente, a resposta é elástica e linear sob baixo nível de carregamento. Devido aos longos comprimentos de ancoragem, as tensões nos aderentes os fazem alongar de maneira diferente, de modo que o deslocamento relativo entre eles varia ao longo da região colada. Desta forma, as tensões cisalhantes são localizadas nas extremidades enquanto que a região mediana da área colada encontra-se descarregada, mostrado no gráfico 5. Estas tensões crescem com o incremento de carga até alcançar a tensão cisalhante máxima. Neste instante inicia-se o comportamento plástico no adesivo, ilustrado no gráfico 6. O comprimento da zona plástica cresce à medida que a carga se eleva e é possível notar que a carga, na curva carga cisalhante por deslocamento, continua a aumentar porque há um acréscimo também na distribuição das tensões cisalhantes na região colada. Embora estas tensões não possam crescer além da tensão de escoamento da junta, as deformações locais permanecem crescendo com o incremento de carga, até alcançar um valor crítico, instante em que a fratura tem início, conforme gráfico 7. Para comprimento de ancoragem muito longo, espera-se uma curva $F-\delta$ altamente não-linear, quando a fratura ocorre de maneira estável no lado mais carregado da junta, fenômeno ilustrado no gráfico 4, denotado por F.E. (fratura estável) [57].

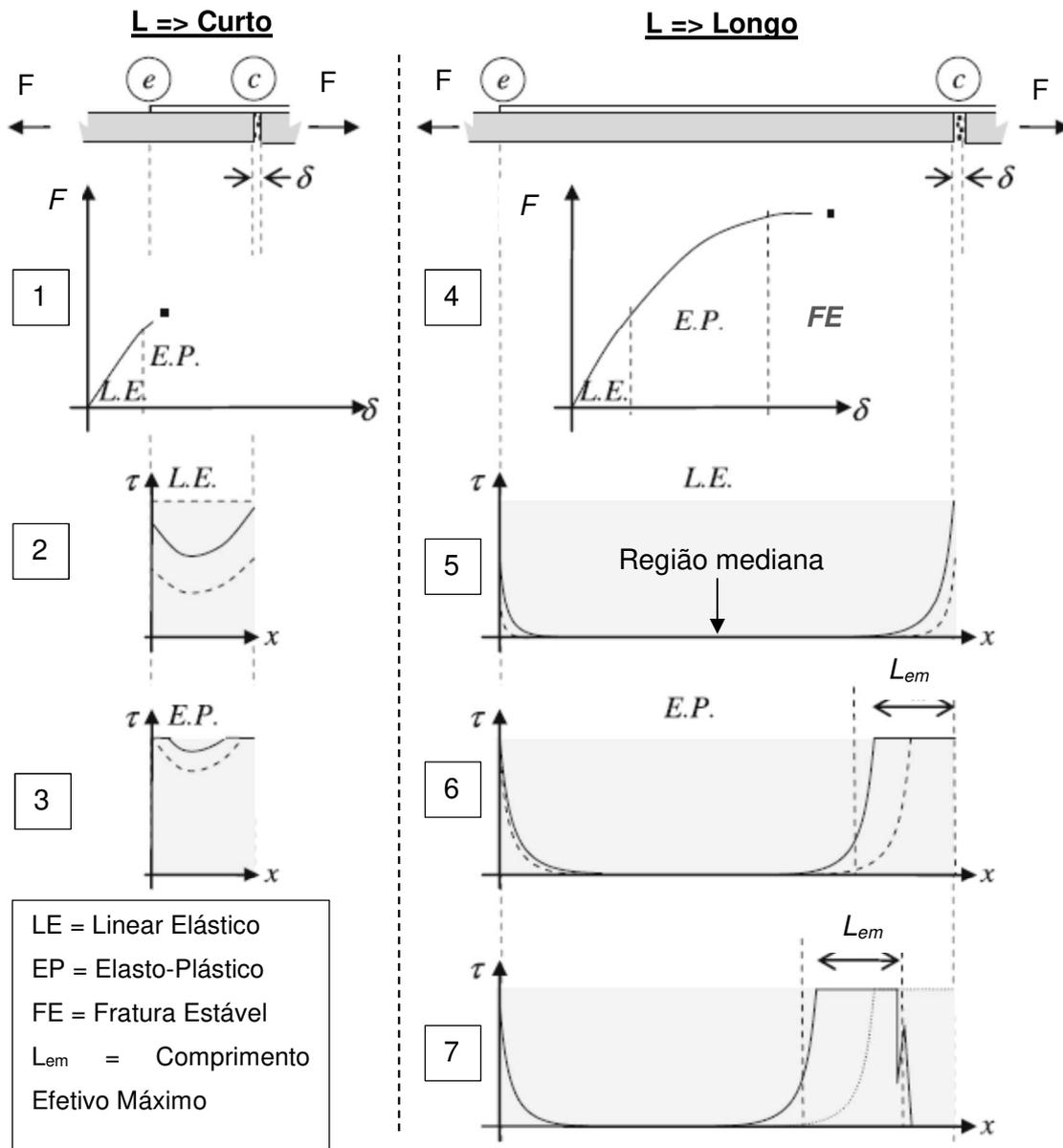


Figura 16: Ilustração da resposta mecânica de uma junta colada com comprimento de ancoragem L curto e longo [57].

Este fato explica o porquê o limite de resistência de juntas coladas é independente do tamanho do comprimento de ancoragem, quando a junta possui comprimento longo. Logo, haverá um tamanho mínimo de comprimento de ancoragem para a junta ter sua máxima eficiência de transferência de carga [16, 57]. As tensões e deformações na extremidade oposta da fratura não são afetadas pela propagação estável da fratura. Esta situação persiste enquanto a região mediana da área colada encontra-se descarregada. A partir do momento em que toda a região colada apresenta-se tensionada, a fratura passa a influenciar a extremidade oposta, então a junta colada passa a se comportar como se tivesse região de ancoragem curta, e com isso a junta

encontra-se próximo de uma fratura instável. Desta forma, existe um comprimento de ancoragem além do qual a carga de falha não cresce, que é chamado de comprimento efetivo máximo L_{em} [16].

A Figura 17 mostra, de forma esquemática, o comportamento de uma junta, de largura w , ao ser tracionada. A resistência ao cisalhamento, τ , da junta é dada na forma de carga de fratura por unidade de largura (F/w) em função do comprimento de ancoragem L . Observa-se o comportamento da região de ancoragem curta, no qual sua capacidade é proporcional ao comprimento de ancoragem e a região de ancoragem longa, onde a capacidade da junta alcançou um patamar independente do comprimento de ancoragem. A parte com menor inclinação, ilustrada pela linha tracejada, representa o comportamento de uma junta com módulo de cisalhamento menor [57].

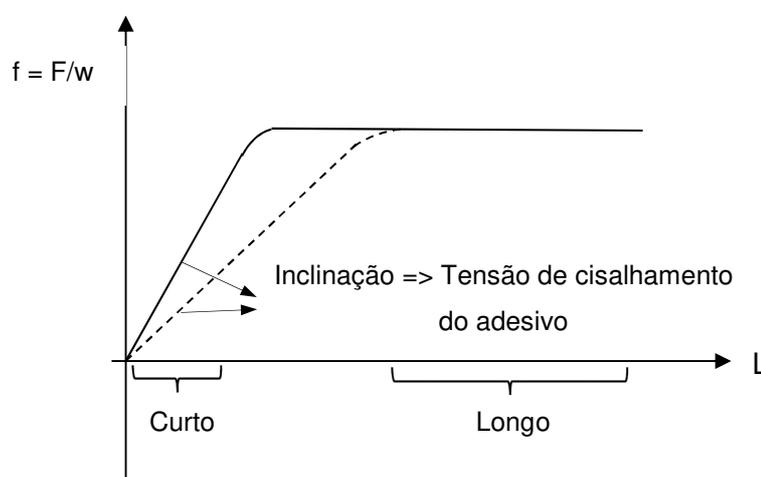


Figura 17: Ilustração do comportamento de junta colada com comprimento de ancoragem curto e longo. Linha tracejada representa um adesivo com menor tensão de cisalhamento [57].

2.7.2. Efeito do adoçamento da extremidade do reparo e da espessura do adesivo

O adoçamento da extremidade do reparo consiste em reduzir gradativamente a espessura do laminado de compósito nas extremidades, gerando um chanfro. Esta redução progressiva da espessura na região de ancoragem pode reduzir a magnitude das tensões de arrancamento, prevenindo a falha por delaminação do compósito [15, 63, 64, 65, 66]. ADAMS e PEPPIAT [67] encontraram uma redução nas tensões da

ordem de 40% ao utilizar um adoçamento de 45°. A Figura 18 ilustra como as tensões podem ser melhor distribuídas com a aplicação do adoçamento.

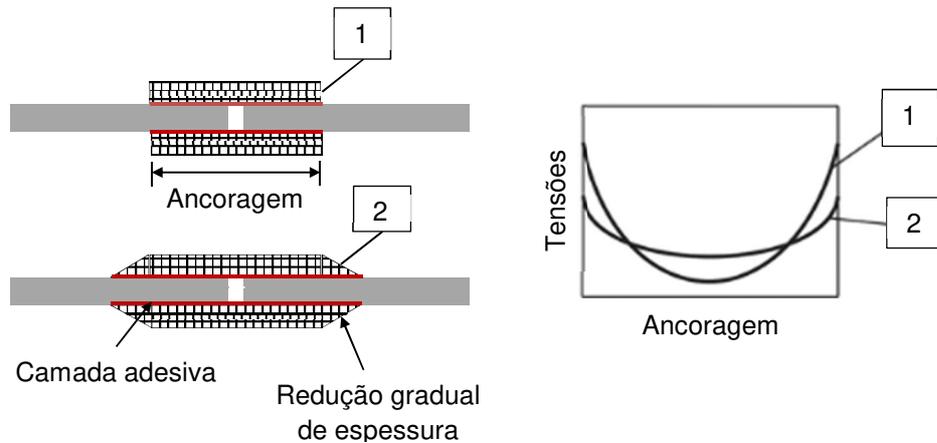


Figura 18: Representação esquemática de juntas tipo DBS com redução gradual de espessura e seu efeito na distribuição de tensões ao longo da ancoragem.

A espessura da camada adesiva exerce um importante efeito na resistência da junta, cuja variação está mostrada na Figura 19 [68]. A literatura mostra que a resistência da junta colada cresce à medida que a espessura da camada adesiva torna-se mais fina [34, 67]. Vários argumentos têm sido propostos na literatura para explicar este fenômeno. ADAMS e PEPPIAT [67] atribuíram o decréscimo da resistência com o aumento da espessura devido ao fato destas apresentarem uma maior quantidade de defeitos, tais como vazios e microtrincas. Em outro estudo, CROCOMBE e ADAMS [64] relatam que à medida que a camada adesiva torna-se espessa, maior é a deformação plástica causada por flexão na extremidade da junta. Por outro lado, em camadas muito finas ocorrem restrições às deformações transversais, influenciando no comportamento da fratura [69]. Com isto, existe um tamanho ótimo de espessura de adesivo, no qual a energia de fratura alcança o valor máximo [68], conforme ilustrado na

Figura 19.

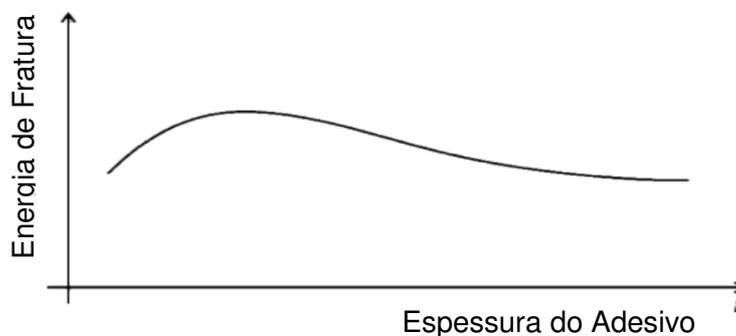


Figura 19: Energia de fratura em função da espessura do adesivo. Adaptada de [68].

2.8. Fadiga de Juntas Coladas

Fadiga é definida como o processo que conduz à falha do material pela aplicação repetida de um determinado carregamento, mesmo para tensões bem abaixo da resistência de ruptura do material. A presença de danos físicos microscópicos ou de defeitos pré-existentes no material pode acumular-se através de uma deformação plástica com contínuos ciclos até desenvolverem-se para uma trinca [70]. No caso de junta colada, entende-se como trinca o início de descolamento do aderente compósito do substrato metálico ou descolamento entre as camadas do compósito. Esta trinca cresce quando submetida a carregamentos cíclicos até o material não apresentar mais seção resistente e tem-se, então, a falha por fadiga.

O comportamento à fadiga de juntas coladas difere dos metais em muitos aspectos. A durabilidade da junta colada é afetada pelas propriedades do aderente, do adesivo e principalmente pelas interações que ocorrem na interface entre aderente e adesivo e entre as camadas do laminado de compósito. As características de resistência da interface dependem, por sua vez, da preparação de superfície dos aderentes e da sua capacidade de resistir aos efeitos de temperatura, umidade, envelhecimento e ciclos de carregamento [19]. O mecanismo que causa fadiga num material de natureza polimérica é significativamente diferente de outros materiais. Nos polímeros, a presença de porosidades, fissuras, trincas, falta de homogeneidade, cura deficiente, podem ser fatores, que juntos a outros de natureza ambiental, como a umidade e a temperatura, ou geométrica, afetam a vida em fadiga [18]. A tenacidade do adesivo é outro parâmetro mencionado na literatura [71], no qual um adesivo tenaz é benéfico do ponto de vista de resistência à fadiga.

Materiais unidos por juntas adesivas apresentam boas propriedades de fadiga quando comparados com outros métodos de fixação, tais como rebites, soldagem por pontos e fixadores mecânicos. Este fato provém principalmente do fato do adesivo levar a uma melhor distribuição de tensões na junta colada em relação aos outros métodos [72].

No desenvolvimento de testes de fadiga existe uma gama de variáveis a considerar que afetam de diferentes modos no processo de fadiga [73], tais como:

1. A amplitude da tensão, $\sigma_a [\sigma_a = 1/2(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})]$;
2. A variação de tensão, $\Delta\sigma (\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min})$;
3. A correspondente amplitude de deformação, ϵ_a ;

4. O nível de tensão média, $\sigma_m[\sigma_m = 1/2(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})]$;
5. O nível de deformação média, ϵ_m ;
6. A razão de tensão, $R[R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}]$;
7. A razão de deformação, $\epsilon_{\min} / \epsilon_{\max}$;
8. A frequência, ω ;
9. A forma característica de onda (senoidal, quadrada, etc.) para as tensões e deformações;
10. O ambiente e a temperatura interna do corpo de prova; e
11. A geometria do corpo de prova.

Devido ao grande número de parâmetros que influenciam no comportamento da vida à fadiga, os testes experimentais costumam ser realizados mantendo-se alguns deles constantes. Para tanto, é necessário identificar quais os parâmetros mais importantes a serem considerados para a aplicação a qual se propõe o sistema colado. HART-SMITH [74] relata os problemas associados com a concentração de tensões em juntas do tipo SLJ quando submetidas a cargas de fadiga e reporta que tais juntas coladas com adesivos epóxis tenacificados resistem a mais de 10^7 ciclos em elevadas frequências (30Hz). Porém quando submetidas à baixa frequência, cerca de 10^{-7} Hz, a junta apresenta falha na ordem de centenas de ciclos. A razão para isto está no fato das juntas com dimensões previstas na norma ASTM D3166 (12,5 mm) serem de comprimento de ancoragem reduzido. Estas juntas apresentam altas tensões e deformações ao longo de toda a região colada, fato inerente a juntas de comprimentos curtos, conforme item 2.7.1. Consequentemente, em testes de baixa frequência, o adesivo deforma por fluência rapidamente, não somente nas extremidades, mas em toda a região colada. Este crescimento progressivo de deformação do adesivo devido às cargas de fluência resultava na fratura da junta após poucos ciclos. Quando testada em altas frequências, a carga é sempre removida antes de o adesivo possuir tempo para fluir, consequência da viscoelasticidade. Com isso, o dano acumulado por deformação é muito baixo e a junta é capaz de resistir por longos períodos. Ressalta-se que as aplicações de juntas coladas na prática são de grandes dimensões, então, mesmo sob elevadas cargas, as tensões no adesivo na região central da área colada são de baixa magnitude e de natureza elástica. Assim, mesmo sob baixas frequências de carregamento, somente os adesivos nas extremidades sofrerão fluência, e quando descarregado, as deformações elásticas na região central do adesivo conduzem a uma larga recuperação de deformações de fluência que possam ter ocorrido [19].

COLOMBI e FAVA [3] executaram testes de fadiga em placas reforçadas com fibra de carbono em diferentes condições de carregamento, porém com maiores razões de tensão, 0,1 e 0,4. Os autores informam que não foi identificada variação significativa da vida à fadiga comparando as duas razões de tensão testadas. As curvas S-N obtidas indicaram um comportamento à fadiga comparado ao mesmo aço Europeu AASHTO E, visualizadas na Figura 20. Os pontos de falha das juntas estão plotados em função do critério de dano adotado: 5 e 10% de queda da rigidez original.

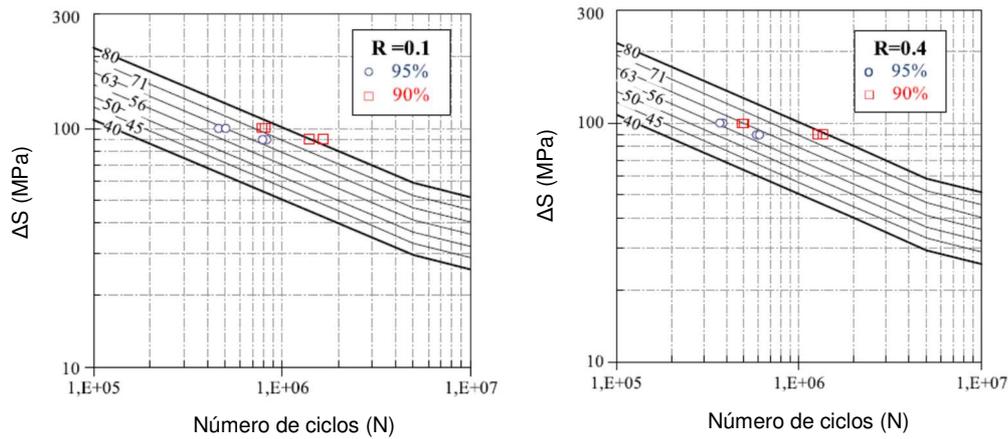


Figura 20: Curva S-N de aço estrutural AASHTO E com pontos de falha das juntas coladas com 90% e 95% de queda de rigidez. a) razão de tensão de 0,1 b) razão de tensão de 0,4 [3].

Conforme mencionado, os testes também indicaram uma redução da rigidez das juntas à medida que o descolamento crescia por fadiga e que este fenômeno era um indicador da falha global da junta. Foi observado que a trinca se iniciava quando a rigidez reduzia em 2% e progredia quando esta chegava a 5%, passando, a partir deste ponto, a crescer rapidamente e chegando a falha quando a rigidez da junta alcançava perda de 10% da rigidez inicial, mostrado na Figura 21. A redução da rigidez do reparo foi selecionada como um parâmetro de falha.

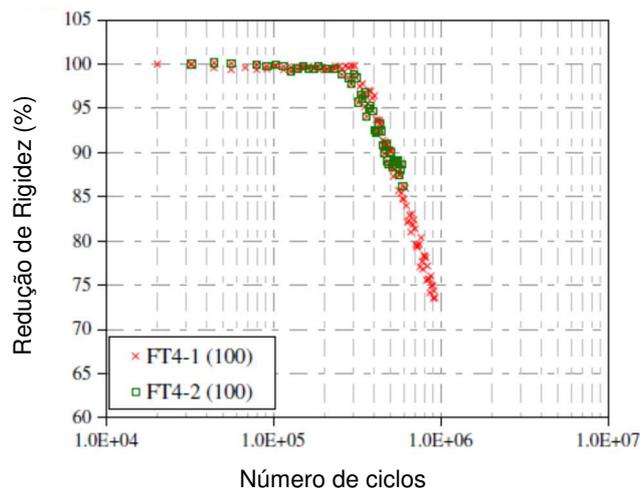


Figura 21: Redução da rigidez durante teste de fadiga [3].

Segundo os autores [3], em juntas tipo DBS Compósito de fibra de carbono (CFC)/Aço submetidos a carregamento cíclico, as zonas de concentração de tensão são as mais sensíveis à falha por fadiga e que estas regiões são as extremidades da junta e a região do espaço entre as duas chapas metálicas. Tensões de arrancamento (modo I) promovem a falha por descolamento nas extremidades da junta e tensões cisalhantes (modo II) promovem o descolamento nas extremidades das chapas metálicas. A Figura 22 ilustra estas regiões.

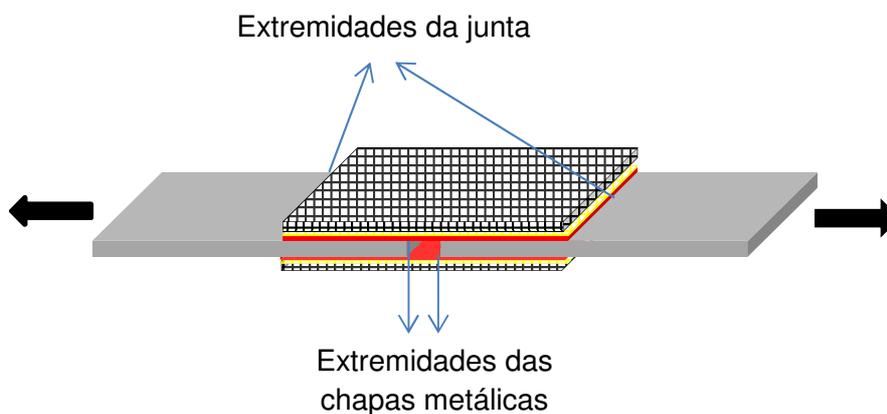


Figura 22: Representação esquemática das extremidades da junta tipo DBS CFC/Aço.

LIU *et al.* [75] realizaram uma série de testes de fadiga em placas de aço coladas com fibra de carbono de médio e alto módulo. Os ensaios foram executados em

diferentes níveis de carregamento e razões de tensão de 0,01. Após os testes de fadiga, avaliou-se a resistência adesiva residual com intuito de obter a influência da fadiga na capacidade final de adesão. Os autores observaram que ocorreu uma redução na rigidez devido ao dano acumulado na fadiga. Dois diferentes modos de falha foram encontrados: descolamento interfacial para compósitos de médio módulo e ruptura de fibras nos compósitos de alto módulo.

DENG e LEE [76] apresentaram resultados de um programa experimental em pequena escala de vigas de aço reforçadas com compósito de fibra de carbono, cujos testes mostraram que o descolamento do compósito iniciava-se devido às tensões de arrancamento e posteriormente se propagava em função das tensões cisalhantes. A partir dos resultados foi possível obter curvas S-N, nas quais se determinou o número de ciclos para iniciação do descolamento. O limiar de fadiga da curva S-N obtido pelos autores foi de 30% do limite de resistência estático.

MATTA *et al.* [77] realizaram uma série de ensaios de fadiga em placas reforçadas por compósito de fibra de carbono, onde se promoveu uma variação de tensão de 83 MPa e uma razão de tensão de 0,05 e a frequência de carregamento de 10 Hz. Os parâmetros foram selecionados de acordo com o aço estrutural AASHTO E, documento que contém as curvas de vida à fadiga de um tipo de aço fabricado na Europa para construção de pontes. Os resultados mostraram que a resistência à fadiga das juntas coladas foi no mínimo comparável com as soldas das vigas do referido aço.

Há situações em que o reparo por colagem é realizado enquanto a estrutura metálica está sob carregamento cíclico. No intuito de avaliar o comportamento da estrutura reparada nesta condição, foi investigado por outros autores [78, 79] o efeito do carregamento cíclico na cura do adesivo. Os testes confirmaram o aumento progressivo da rigidez do elemento reforçado à medida que o adesivo curava. Concluíram que vigas metálicas sujeitas a elevados carregamentos durante a cura, superiores a 42 KN, não desenvolvem uma completa adesão e que para valores mais baixos não havia influência.

2.9. Degradação de Juntas Coladas

O reduzido conhecimento sobre o processo de degradação das juntas coladas em ambiente marinho representa uma das maiores restrições para um crescimento ainda maior na aplicação de reparos de estruturas metálicas da indústria petroquímica. A previsão da durabilidade dos reparos por compósitos poliméricos é de suma

importância, visto que estes materiais possuem sua vida reduzida quando sujeitas às condições ambientais agressivas [80], uma vez que provocam mudanças nas propriedades mecânicas nas juntas. A Figura 23 mostra um reparo de compósito de fibra de carbono num tanque de armazenamento de aço. Este reparo está sujeito às intempéries do meio ambiente [15], no qual a região da interface compósito/aço exerce grande preocupação, pois a degradação nesta região pode conduzir a uma falha prematura.



Figura 23: Ilustração da interface compósito/aço sujeita às intempéries do meio num tanque metálico de armazenamento [15].

A Figura 24 mostra alguns reparos em tubulações de plataformas de petróleo, onde é possível observar corrosão no tubo metálico, próximo a extremidade do laminado de reparo por compósito. Notam-se que os reparos estão pintados na mesma cor que a tubulação metálica. Tratam-se de reparos que estão há cerca de sete anos instalados, logo este fenômeno de corrosão na extremidade da interface é de média e longa duração, porém, bastante crítico que pode levar a falha da tubulação. A região de transição entre o reparo por compósito e o substrato metálico é uma região crítica, mesmo quando há pintura (revestimento polimérico) posterior sobre o reparo. Esta criticidade ocorre porque sempre haverá um ponto de transição de rigidez, com tensões fora do plano e dilatações térmicas diferenciais. Logo, é uma região propícia a ter defeitos a médio e longo prazo, conforme tem sido observado em algumas aplicações de reparo. A avaliação do comportamento deste fenômeno, principalmente no que pode

ocorrer na interface, ou seja, por baixo do compósito, será explorada por meio de um conjunto de ensaios experimentais na segunda bateria de testes desta tese.

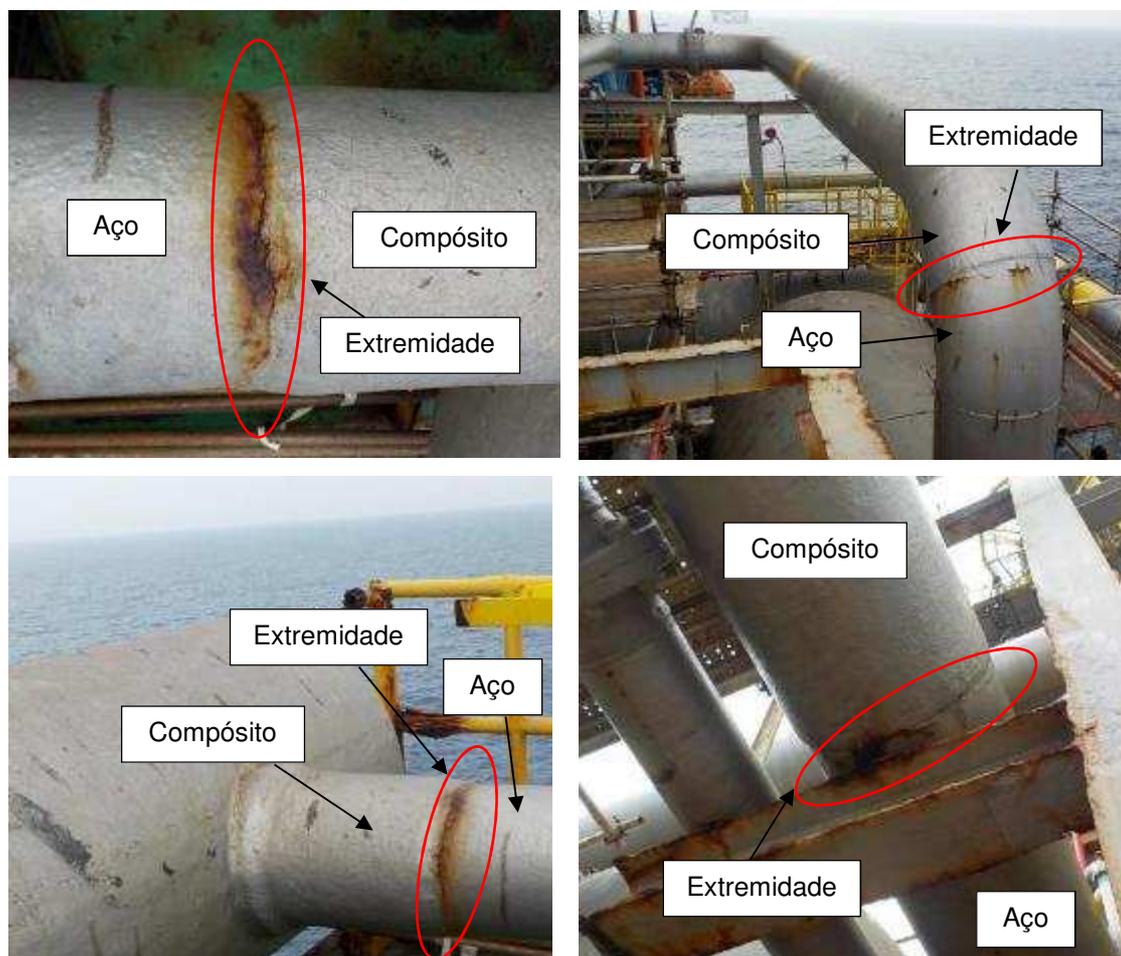


Figura 24: Exemplos de reparos por compósitos em plataformas de petróleo que possuem corrosão na extremidade do reparo.

O princípio da degradação da resistência de junta tipo DBS CFC/Aço (Figura 12c) é o mesmo que para as juntas coladas em geral. Por difusão, a água pode penetrar através do adesivo ou ao longo da interface compósito/aço ou absorção através do laminado compósito. Uma vez que a água tenha penetrado na junta, a degradação pode ocorrer por dois processos: degradação do próprio adesivo, do compósito e/ou da interface compósito/aço da junta colada [19, 81]. GLEDHILL *et al.* [82] propuseram que deve existir um valor crítico de concentração de água na camada adesiva, abaixo do qual não ocorre nenhuma diminuição de resistência em condições ambientais. Para uma junta com adesivo epóxi estima-se que a concentração crítica de água é de 1,35 a 1,45% e que a umidade crítica se situa entre 50 e 65% [83]. Esta umidade pode induzir à plastificação promovendo a redução de propriedades mecânicas, tais como a resistência e o módulo de elasticidade do adesivo [84].

Uma vez que a umidade esteja presente na camada adesiva da junta colada, esta pode atacar a adesão, rompendo ligações secundárias através da interface adesivo/aderente, alterando irreversivelmente o adesivo (exemplos: hidrólise, *crazing*) e finalmente promovendo a corrosão do substrato metálico.

Ao se considerarem os efeitos da água na junta colada, é também necessário levar em consideração fatores como temperatura, tensão e tempo, porque estes exercem significativa influência na degradação da junta colada [84]. Normalmente é relatado que a temperatura elevada acelera o processo de degradação de juntas coladas. Porém, deve-se tomar cuidado, pois fenômenos de degradação que ocorrem em altas temperaturas podem não ocorrer em baixas ou temperaturas operacionais [84]. O tempo é outro parâmetro importante, a taxa de degradação da resistência da junta a uma temperatura constante pode mudar em função do tempo [84]. Finalmente, o efeito da degradação da água é geralmente acelerado por uma aplicação de tensão. KINLOCH [19] reporta que uma junta tensionada durante a exposição de degradação exerce influência na durabilidade, em termos de redução de tempo de vida ou de redução de resistência residual. Alguns pesquisadores [84, 85] têm sugerido que existe um nível de tensão crítica em que não há falha. A influência da tensão depende do tipo de tensão, uma vez que tensões cíclicas degradam a adesão mais rapidamente que tensões constantes [86]. Estudo realizado por DAWOOD e RIZKALLA [36], no qual examinaram a durabilidade de sistemas de compósito de fibra de carbono para o reforço de estruturas expostas a água do mar a 38°C durante 6 meses, indicou que a degradação da resistência estática da adesão foi provavelmente devido à degradação da interface entre o aço e o compósito de fibra de carbono. O estudo também mostrou que o uso de silano promoveu redução na degradação.

O fenômeno de corrosão galvânica é outro mecanismo que afeta a durabilidade de longo prazo para juntas coladas de compósitos de fibra de carbono. Este mecanismo pode ocorrer quando dois materiais com diferentes potenciais elétricos, na presença de um eletrólito, são colocados juntos. Se a corrosão galvânica ocorrer, haverá uma corrente elétrica circulando de um material para outro, fato que acelera a taxa de corrosão do anodo e decresce a do catodo. Para evitar este tipo de corrosão entre aço e CFC, é recomendável a aplicação de um isolante elétrico entre estes materiais, como uma camada de fibra de vidro [36]. A Figura 25 mostra a aplicação de uma camada de fibra de vidro no reparo de tubulações e no reparo do costado de uma plataforma tipo navio. Nestes reparos é possível observar que a camada de fibra de vidro é mais larga que as camadas subsequentes de fibra de carbono com objetivo de manter o isolamento e evitar o par galvânico [87]. Este procedimento também é utilizado em outros trabalhos [36, 88].

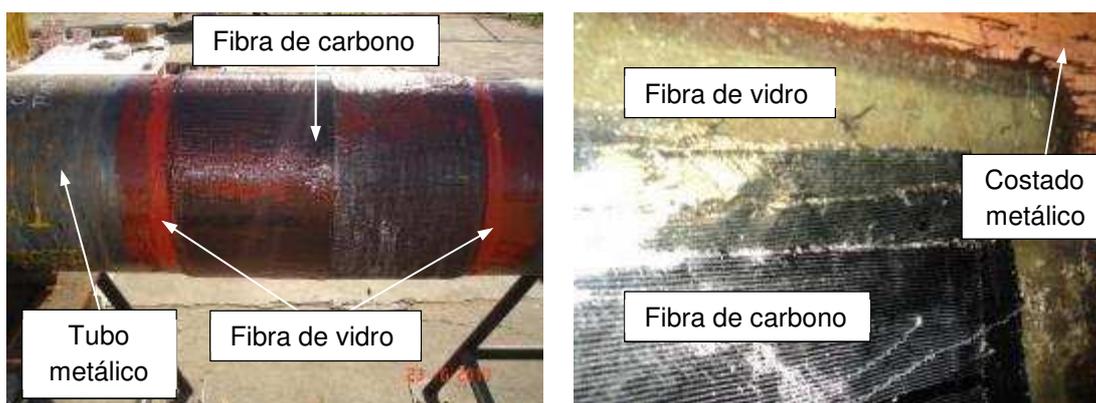


Figura 25: Detalhe do isolamento elétrico por meio de uma camada de fibra de vidro em reparo por fibra de carbono num tubo e costado de plataforma [87].

Alguns estudos têm identificado uma mudança no modo de falha quando as juntas laminadas sofrem degradação. A falha de juntas sem degradação envolve, frequentemente, falha tipo coesiva (falha que ocorre no interior do adesivo). Depois de envelhecidas, a falha tende a mudar para uma posição próxima da interface entre o adesivo e a superfície metálica [36, 84, 89].

NGYUEN *et al.* [90] realizaram estudo em Juntas do tipo DBS CFC/Aço expostas ao ambiente salino e ciclos de temperatura de 20 a 50°C para avaliação da degradação em intervalos de período de 2, 4, 6, 9 e 12 meses. Após o período de exposição, os corpos de prova foram testados até a ruptura e o modo de falha foi delaminação no compósito, não ocorrendo degradação na interface. Inspeção visual não identificou produto de corrosão na região colada após a ruptura. Foi identificado que a resistência e a rigidez das juntas coladas decresceram com o aumento do tempo e da temperatura, fato observado principalmente nos primeiros seis meses. Após este período, a taxa de queda caiu consideravelmente. Os autores identificaram que o tempo de 2 e 4 meses foram o suficiente para saturar o compósito das juntas para as temperaturas de 50°C e 20°C, respectivamente. Os autores concluíram também que ocorreu um aumento de deformação na ruptura devido ao encharcamento, efeito da plastificação. Resultados análogos foram encontrados por BORDES *et al.* [91]. A redução das propriedades mecânicas do adesivo epóxi na presença de água pode ser atribuída às moléculas de água ligadas com a resina através de ligações de hidrogênio [90]. Utilizando ensaios de imersão, NGUYEN *et al.* [90] obtiveram as curvas de difusão tanto das juntas coladas quanto dos adesivos e por meio de modelo de ARRHENIUS e PHANI-BONE [92], mostrado na Equação 1, modelaram a queda da resistência e rigidez da junta colada e do adesivo.

$$\sigma(t) = (\sigma_0 - \sigma_t) \exp(kt) + \sigma_t \quad (1)$$

Onde σ_0 é a resistência sem degradação, σ_t é a resistência após certo tempo de exposição e k é a taxa de degradação, determinada pelo modelo de Arrhenius.

NGUYEN *et al.* [90] não identificaram queda na resistência e no módulo de elasticidade do compósito de fibra de carbono após 1 ano de degradação. Este fato pode ser explicado porque o laminado foi confeccionado com fibras unidirecionais, onde as propriedades mecânicas são fortemente ditadas pelas fibras de carbono e uma possível degradação da resina não iria influenciar nas propriedades do compósito, no caso de tensões trativas na direção das fibras.

O tratamento de superfície é outro parâmetro que pode influenciar a degradação da junta colada, tendo em vista que alguns óxidos metálicos, como os óxidos de alumínio e ferro, hidratam-se. O resultado é tornarem-se gelatinosos levando ao enfraquecimento da interface. Uma boa preparação de superfície evita a formação destes óxidos [18].

A radiação ultravioleta (UV) é outro parâmetro que pode afetar as ligações químicas e levar a degradação do sistema de reparo. Ainda há na literatura poucos estudos sobre o efeito da radiação UV na degradação de juntas coladas [93]. Embora os filtros da atmosfera sejam capazes de reter a maior parte da radiação solar, cerca de 6% é capaz de alcançar a superfície [94]. A radiação ultravioleta possui um comprimento de onda entre 290 e 400 nm, e a energia criada por essa faixa pode dissociar as ligações covalentes C-C, conduzindo à degradação, que pode ser meramente uma descoloração superficial até uma extensiva perda de propriedades mecânicas. Esta degradação inicia-se pela face externa da superfície e penetra gradualmente no interior do material [95]. Tendo em vista que o processo de degradação por UV é bastante lento, uma sobresspessura de camada de compósito pode ser suficiente para mitigar este efeito.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais a serem empregados no desenvolvimento desta tese, os procedimentos de fabricação dos corpos de prova e a caracterização física e mecânica dos mesmos. Serão também descritos os testes experimentais a serem realizados, bem como a metodologia empregada para

determinação da resistência estática e da curva de fadiga do material no estado novo e envelhecido.

3.1. Materiais e Equipamentos

Para a fabricação dos corpos de prova utilizados neste trabalho, foram utilizados os seguintes materiais:

- a) Chapa de aço carbono, ASTM A 36 (Mesmo aço para a primeira e segunda bateria de testes)
- b) Adesivo de preenchimento, também denominado adesivo estrutural.
 - b1) Primeira bateria de testes: adesivo éster-vinílico (importada). Fabricante Reichhold, denominada NORPOL FI 184-70 curado com catalizador Brasnox MCP na proporção de 2% em peso e com pentadiona (NORPOL 9854) na proporção de 0,1 %, cura inicial em 60 minutos a 25 °C e total em 24 horas, na mesma temperatura.
 - b2) Segunda bateria de testes: adesivo epóxi (nacional). Fornecedor Novatec, adesivo tenacificado denominado NVT, bicomponente com razão de mistura mássica de 100:43, densidade de 1,24 g/cm³, tempo de aplicação de 35 minutos a 25 °C, cura inicial em 2 horas e total em 24 horas, na mesma temperatura.
- c) Manta de fibra de vidro (Mesma manta para a primeira e a segunda bateria de testes), gramatura 300 g/m². Fornecido pela empresa Barracuda.
- d) Tecido de fibra de carbono com orientação de fibra de $\pm 45^\circ$ (Mesmo tecido para a primeira e a segunda bateria de testes). tipo TORAY T700, fabricante Toray, gramatura 407 g/m².
- e) Resina de impregnação do tecido de fibra de carbono e da manta de fibra de vidro.
 - e1) Primeira bateria de testes: resina éster-vinílica (importada). Resina tenacificada do fabricante Reichhold denominada DION 9500-800 curado da mesma forma que o adesivo de preenchimento.
 - e2) Segunda bateria de testes: resina epóxi (nacional). Resina tenacificada denominada Composto de Laminação Pipefix, fornecido pela empresa Novatec, bicomponente com razão de mistura mássica de 100:17,6, densidade de 1,38 g/cm³,

tempo de aplicação de 30 minutos a 25 °C, cura inicial em 6 horas e total em 24 horas, na mesma temperatura.

- f) Tecido *peel-ply* (utilizado somente na primeira bateria de testes), fornecido pela empresa Barracuda, gramatura 85 g/m².

O adesivo de preenchimento e a resina de impregnação foram diferentes entre as baterias de testes. Isto ocorreu devido ao fato dos materiais serem importados e terem sua validade vencida, inviabilizando o uso na segunda bateria de ensaios. A importação de novos produtos demandaria tempo excessivo. Desta forma, foram utilizados materiais nacionais na segunda bateria de testes. Além disso, o uso de produtos nacionais facilitará aplicações futuras de reparos nas unidades operacionais. O tecido de fibra de carbono e a manta de fibra de vidro foram os mesmos. A contribuição do adesivo de preenchimento e da resina de impregnação tem influência reduzida nas propriedades mecânicas dos compósitos, tendo em vista estas serem ditadas pelas fibras. O tecido *peel-ply* foi utilizado somente na primeira bateria de testes, tendo em vista que o objetivo era analisar se haveria alguma falha na região de aplicação deste tecido. Isto era necessário, pois na aplicação de campo, muitas vezes há necessidade de sua utilização.

Para a confecção dos corpos de prova e realização dos testes experimentais foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a) Máquina de jateamento modelo PP 80, fabricante Polo Ar Jateamento.
- b) Máquina universal de ensaios modelo 318.10, capacidade 10 toneladas, fabricante MTS, com extensômetro tipo *strain gage*.
- c) Rugosímetro Taylor-Hobson modelo Talyscan 150, com software de imagem TalyMap Universal.
- d) Microscópio ótico fabricante Zeiss, modelos Observer.Z1m e Discovery.V20.
- e) Máquina rotativa de impacto modelo MBX 3200X, fabricante Monti.
- f) Equipamento de envelhecimento por UV modelo C-UV, fabricante Comexim Matérias Primas.
- g) Equipamento de envelhecimento em névoa salina, modelo *Q-Fog Cyclic Corrosion Tester* T 600, do fabricante *The Q-Panel Company* Tester.
- h) Analisador térmico (DMA), modelo Q800, fabricante TA Instruments.

3.2. Metodologia Experimental

Este trabalho foi desenvolvido em duas fases como explicado a seguir. A primeira bateria de testes experimentais, realizados no laboratório de ensaios mecânicos do Centro de Pesquisas da Petrobras, refere-se aos estudos realizados para verificação da viabilidade de aplicação de um reparo a base de material compósito de fibra de carbono no costado de uma plataforma tipo navio que apresentava perda de espessura externa, na zona de variação de maré. Neste caso foi utilizado preparo de superfície por jateamento e utilização de um compósito de fibra de carbono com impregnação de uma resina éster-vinílica importada.

Após a realização da primeira bateria de testes, foi realizado o reparo em uma plataforma de petróleo. Para tanto, foi instalado um andaime na lateral do costado e um habitáculo para que o reparo fosse realizado sob ambiente controlado de humidade, entre 40 e 70% e temperatura, entre 25 e 30 °C. A Figura 26 mostra o habitáculo e seu interior pode ser visualizado na Figura 27, na qual pode também ser vista a laminação do reparo, o qual foi aplicado numa área aproximada de 4,0 x 5,5 m.



Figura 26: Habitáculo na lateral da plataforma para realização do reparo por compósito.



Figura 27: Interior do habitáculo com destaque para laminação do reparo por compósito.

Após a realização do reparo na plataforma, foi identificado que algumas etapas eram bastante críticas em termos de logística e também não havia conhecimento sobre como seria o comportamento do reparo colado, caso ocorresse alguma falha na última camada do revestimento orgânico anticorrosivo (pintura). Além disso, durante a execução do reparo, o tratamento de superfície por jateamento mostrou-se bastante complexo. Foi observado também que a superfície reparada mostrava-se com perfil geométrico bastante corroído, com grandes alvéolos, ou seja, com muitas irregularidades, diferente das juntas metálicas sem corrosão testadas em laboratório e utilizadas para qualificação para o reparo *offshore*.

É importante ressaltar que esse reparo instalado é pioneiro no mundo em relação à região reparada, na lateral do costado, na zona de variação de maré. Neste reparo, instalou-se um sistema de monitoração das deformações por extensômetros de fibra ótica, que permitiu avaliar continuamente a adesão do reparo e também forneceu as informações necessárias para se concluir que o descolamento do laminado compósito por fadiga não ocorreria no período de operação da plataforma.

Com base em todas as observações relatadas, a segunda bateria de testes deste estudo concentrou em soluções alternativas para os problemas identificados durante o reparo na plataforma. Essa segunda bateria, também realizada no laboratório de

ensaios mecânicos do Centro de Pesquisas da Petrobras, teve como objetivo avaliar outras condições não apresentadas no referido reparo no costado da plataforma, tais como: preparação de superfície com máquina rotativa com impacto, avaliação da influência do grau de corrosão na superfície metálica, efeito da degradação em ambiente salino na presença de um defeito do revestimento anticorrosivo, que é aplicado sobre o reparo na última camada. Somado a isto, optou-se por utilizar resinas epóxis produzidas no Brasil, a fim de acelerar o processo de reparo nas unidades operacionais, tendo em vista a morosidade do processo de importação. Este fato é de suma importância, porque a maioria dos reparos precisam ser executados de forma urgente, face a gravidade do dano. Além disso, não é possível manter um estoque elevado de resina, pois o prazo de validade é relativamente curto, inviabilizando importações com muita antecedência.

Para a segunda bateria de testes as juntas coladas tiveram preparação de superfície de jateamento ou máquina rotativa por impacto em chapa metálica nova (sem corrosão e lisa) e elevado grau de corrosão. Testes estáticos e de fadiga com e sem degradação em névoa salina também foram realizados. Em função dos resultados dos testes foi determinado a previsão de vida para as diferentes condições de superfície. O grande benefício é dispor de uma metodologia de reparo que exige menos logística operacional e também mais uma opção de reparo, um vez que em muitas situações o jateamento não é possível.

Nesta segunda bateria de testes, também foi realizado uma análise do compósito de fibra de carbono, no qual corpos de prova foram expostos ao envelhecimento em água deionizada em diferentes temperaturas e tempo e também alguns corpos de prova foram expostos a radiações de raios ultravioletas.

Um resumo da metodologia experimental, relacionando os testes experimentais realizados para avaliação do comportamento estático e a vida à fadiga dos diferentes tipos de juntas coladas, está mostrada na Figura 28.

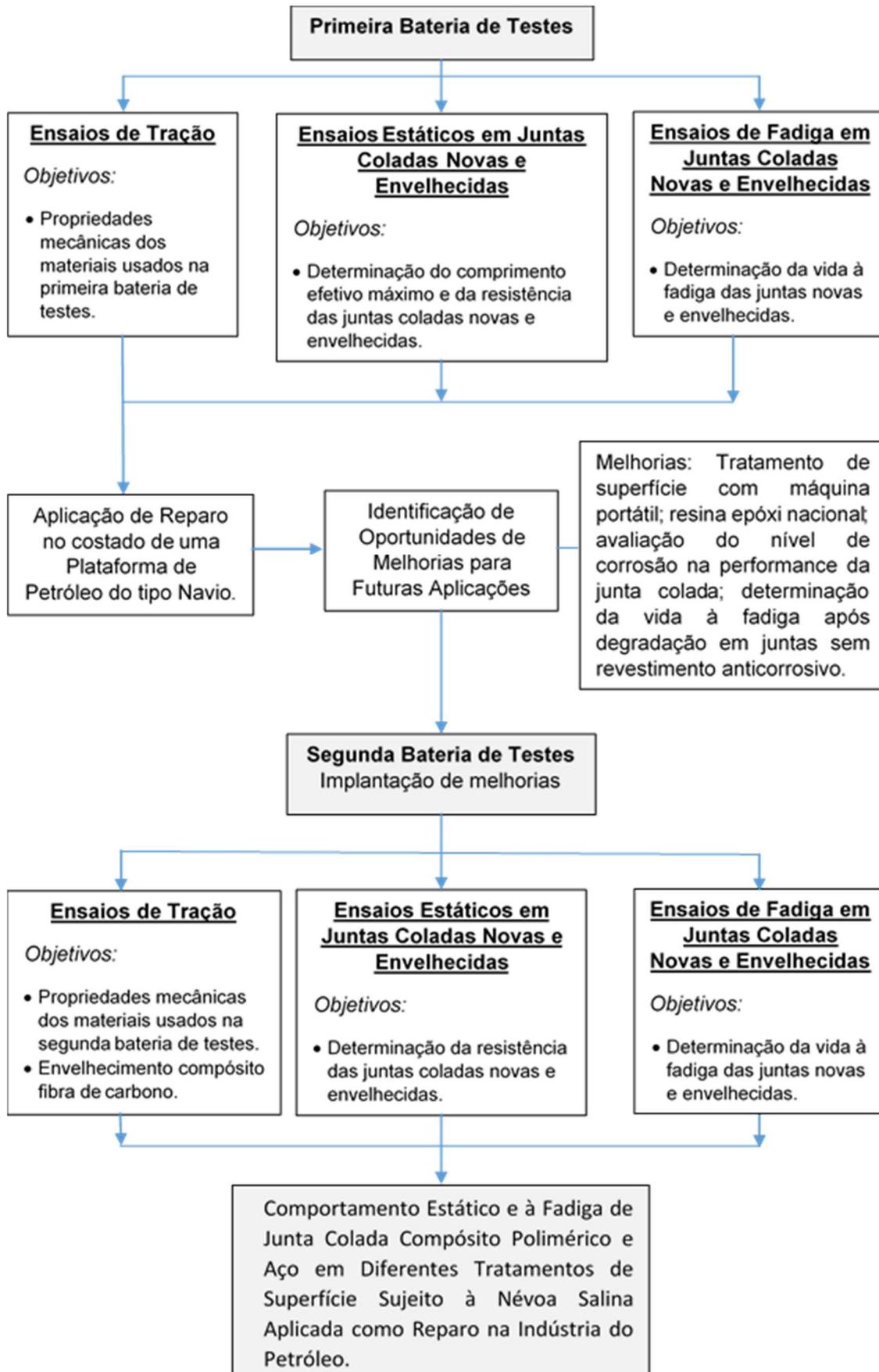


Figura 28: Fluxograma da metodologia experimental para avaliação das juntas.

Nas subseções a seguir são feitas as descrições da confecção dos corpos de prova.

3.2.1. Chapa de Aço Carbono

Para a confecção dos corpos de prova da primeira bateria de testes, foram utilizados somente chapas sem corrosão, classificadas como categoria A, de acordo com a norma ISO 8501 [96]. Para a segunda bateria de testes, foram utilizadas também chapas sem corrosão e chapas com elevado grau de corrosão, classificadas como categoria D, visualizado na Figura 29. Mostra-se também uma imagem tridimensional obtida por meio de equipamento de inspeção a laser, onde é possível observar a irregularidade da chapa corroída, com alvéolos e pites profundos.

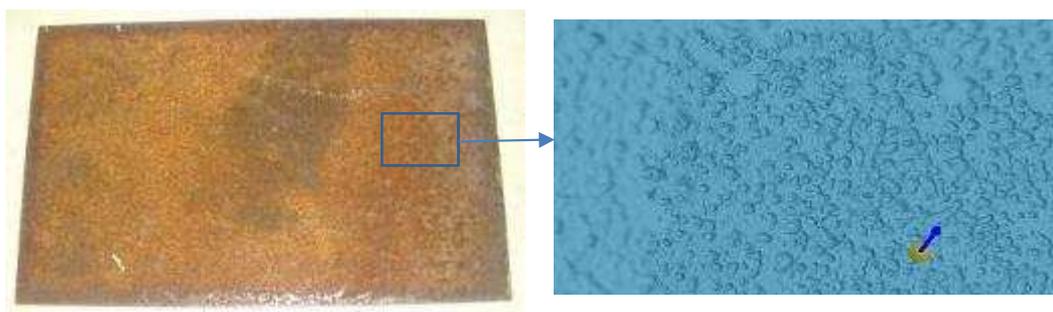


Figura 29: Chapa metálica com corrosão acentuada e imagem tridimensional da região corroída.

3.2.2. Adesivo de Preenchimento

O adesivo de preenchimento é utilizado para preencher os espaços promovidos pela perda de material metálico na superfície externa. Esta etapa é de suma importância, pois o adesivo tem como função criar uma ponte efetiva de transferência de carga entre o substrato metálico e o laminado de material compósito.

Na primeira bateria de ensaios, o adesivo utilizado foi uma resina éster vinílica do fabricante Reichhold denominada NORPOL FI 184-70 curado com catalisador (NORPOL 9854) na proporção de 0,1% em peso. Este último tem a função de estabelecer um tempo de gel adequado para aplicação do adesivo. A proporção de 0,1%

forneceu um tempo de 60 minutos. Este adesivo possui propriedades tixotrópicas, portanto, possui capacidade de não escorrer quando aplicado em regiões verticais. A Tabela 3 fornece as propriedades segundo o fabricante.

Tabela 3: Propriedades da resina NORPOL FI 184-70

Propriedades	Unidade	Valor	Norma
Limite de resistência	MPa	35-40	ISO 527:1993
Deformação máxima	%	2,5-3,5	ISO 527:1993
Módulo de elasticidade	GPa	3	ISO 527:1993
Temperatura de distorção térmica	°C	70	ISO 75:1993
Densidade	g/cm ³	1,14	ISO 2811:2001

Na segunda bateria de ensaios, o adesivo de preenchimento utilizado foi uma resina tenacificada epóxi denominada NVT, do fornecedor Novatec. Para a obtenção das propriedades mecânicas deste adesivo foram confeccionados corpos de prova de tração com auxílio de um molde metálico que fornecia as dimensões estabelecidas pela norma ASTM D638 [97], conforme mostra a Figura 30.



Figura 30: Corpos de prova de tração segundo a ASTM D638.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal de ensaios com uma taxa de carregamento de 2 mm/minuto. Foram instalados sensores de deformação de resistência elétrica, biaxiais, do fabricante KYOWA, modelo KFG-2-120-C1. Por meio destes ensaios foram obtidos o limite de resistência, deformação máxima na ruptura, módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson*.

3.2.3. Resina de Impregnação

A resina de impregnação é a utilizada como matriz na fabricação dos laminados compósitos de fibra de vidro e de fibra de carbono e tem como função proteger as fibras e transferir as cargas para estas.

Na primeira bateria de ensaios, a resina utilizada foi a epóxi estér vinílica tenacificada do fabricante Reichhold denominada DION 9500-800 curado da mesma forma que o adesivo de preenchimento. Na segunda bateria de testes foi utilizada uma resina tenacificada epóxi denominada Composto de Laminação Pipefix. Para a obtenção das propriedades mecânicas das resinas de impregnação da primeira e segunda bateria de ensaios foram confeccionados corpos de prova de tração conforme mostrado na Figura 30.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal de ensaios com uma taxa de carregamento de 2 mm/minuto. Foram instalados sensores de deformação de resistência elétrica, biaxiais, do fabricante KYOWA, modelo KFG-2-120-C1. Por meio destes ensaios foram obtidos o limite de resistência, deformação máxima na ruptura, módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson*.

3.2.4. Manta de Fibra de Vidro

A manta de fibra de vidro constitui-se de um laminado de fibras orientadas aleatoriamente com gramatura 300 g/m². A função desta camada é a promoção de isolamento elétrico entre as fibras de carbono e o substrato metálico.

Tecidos de fibra de vidro foram impregnados com a resina DION 9500-800 para a primeira bateria de testes e com a resina Pipefix para a segunda bateria de testes, e dessa forma obtiveram-se placas constituídas de quatro camadas de 0,8 mm cada uma, perfazendo uma espessura de 3,2 mm. O laminado foi fabricado sobre desmoldante para facilitar a retirada da chapa de compósito. A Figura 31 ilustra as etapas de confecção da placa.



Figura 31: Laminação de placa de compósito de fibra de vidro para confecção de corpos de prova.

Após a cura da resina, corpos de prova de tração em formato de tiras foram cortados e extensômetros de resistência elétrica foram instalados a fim de se obter as propriedades mecânicas, mostrado na Figura 32. A Figura 33 mostra as dimensões do corpo de prova estabelecidas pela norma ASTM D3039 [98], na qual se pode observar também que foram colados suportes de alumínio nas extremidades do corpo de prova, de modo a evitar a falha nesta região, onde a garra da máquina universal de ensaios fixa o corpo de prova. Os corpos de prova da manta de fibra de vidro da primeira e segunda bateria de ensaios foram fabricados igualmente.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal de ensaios com uma taxa de carregamento de 2 mm/minuto. Foram instalados sensores de deformação de resistência elétrica, biaxiais, do fabricante KYOWA, modelo KFG-5-120-C1. Por meio destes ensaios foram obtidos o limite de resistência, deformação máxima na ruptura, módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson*.



Figura 32: Corpos de prova de tração de fibra de vidro.

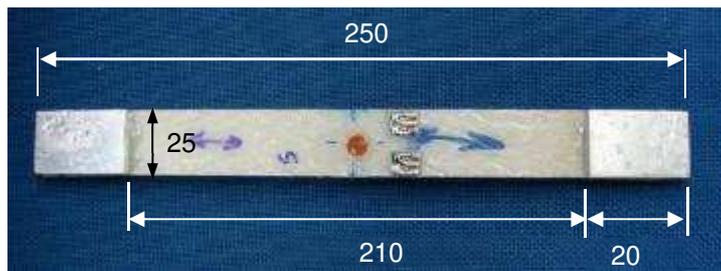


Figura 33: Dimensões do corpo de prova de tração.

3.2.5. Tecido de Fibra de Carbono

As camadas de fibra de carbono constituíram-se de fibras direcionadas com ângulos de $\pm 45^\circ$. Os ângulos foram orientados nesta direção de forma a conter as tensões cisalhantes que estão presentes na estrutura de um costado de navio-plataforma, que funciona como a alma de uma viga tipo caixão. É importante ressaltar que outras estruturas poderão conter tensões em ângulos diferentes.

Estas fibras são as responsáveis por repor a rigidez perdida pela estrutura metálica corroída. Para a primeira bateria de testes, tecidos de fibra de carbono foram impregnados com a mesma resina DION 9500-800 e para a segunda bateria de testes foi utilizada a resina Pipefix. Dessa forma, obteve-se uma placa constituída de quatro camadas de 0,6 mm cada uma, perfazendo uma espessura de 2,4 mm. O laminado foi fabricado sobre desmoldante para facilitar a retirada da chapa de compósito. A Figura 34 ilustra as etapas de confecção da placa.



Figura 34: Laminação de placa de compósito de fibra de carbono para confecção de corpos de prova.

Após a cura da resina, corpos de prova de tração em formato de tiras foram usinados a partir de cada placa de acordo com as dimensões estabelecidas pela norma ASTM D 3090 [98] para a obtenção das propriedades mecânicas. A Figura 35 ilustra os corpos de prova de fibra de carbono após o corte, cujas dimensões são as mesmas apresentadas na Figura 33. Os corpos de prova de fibra de carbono da primeira e segunda bateria de ensaios foram confeccionados igualmente.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal de ensaios com uma taxa de carregamento de 2 mm/minuto. Foram instalados sensores de deformação de resistência elétrica, biaxiais, do fabricante KYOWA, modelo KFG-5-120-C1. Por meio destes ensaios foram obtidos o limite de resistência, deformação máxima na ruptura, módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson*.



Figura 35: Corpos de prova de tração de compósito de fibra de carbono.

3.2.6. Preparação de Superfície

Jateamento foi aplicado nas chapas sem corrosão e nas corroídas até o padrão de tratamento Sa 2 ½ , definido na norma ISO 8501-1 [96], que é usado rotineiramente para limpeza e remoção de óxidos em estruturas marítimas [6] e cujos resultados foram utilizados como referência nesse estudo. Alternativamente, utilizou-se máquina rotativa de impacto nas duas superfícies metálicas. O equipamento, mostrado na Figura 36, consiste de um eixo girante a aproximadamente 2500 rpm, que contém cerdas de

elevada dureza que atingem a superfície com energia cinética equivalente ao tratamento de jateamento [49].

O princípio da operação baseia-se em um impacto sincronizado e repetido das pontas de cerdas com a superfície alvo, levando a uma infinidade de crateras de impacto que removem o óxido de corrosão e expõem o material de substrato e geram o perfil de rugosidade. Durante a operação, as pontas das cerdas atingem a barra aceleradora e se retraem, armazenando, desta forma, energia que é posteriormente liberada durante o retorno elástico [49].

A Figura 36 mostra o equipamento sendo usado para tratar a superfície em uma das chapas de aço corroídas. Durante a preparação de superfície, a máquina foi utilizada em direções aleatórias.

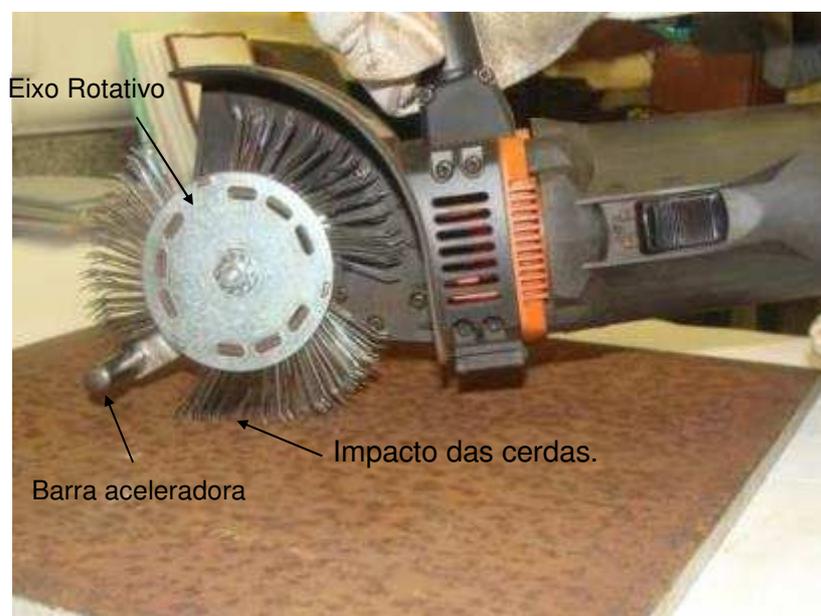


Figura 36: Máquina rotativa com impacto.

Após a preparação da superfície, a avaliação da rugosidade foi realizada em um rugosímetro tridimensional do fabricante Taylor Hobson Talyscan 150, equipado com ponteira indutora de 2 μm de raio. Adotou-se para a área escolhida, segundo a norma ISO 4288 [99], uma velocidade de varredura de 1000 $\mu\text{m}/\text{s}$ com leitura de dados na direção longitudinal (ao longo do eixo da amostra, onde a carga é aplicada) usando espaçamentos de 1 μm em 1 μm , repetindo o procedimento em intervalos de 10 μm na direção transversal (perpendicular ao eixo da amostra onde a carga é aplicada). As condições ambientais durante os ensaios foram de 23 $^{\circ}\text{C}$ e 50 % de umidade relativa.

3.2.7. Confeção dos Corpos de Prova de Juntas Coladas Aço e Compósito

Esta etapa concentrou-se na confecção de corpos de prova de juntas coladas de material compósito em substrato metálico para posterior ensaio adaptados da norma ASTM D3528 [100]. A confecção das juntas coladas foi dividida em duas baterias de testes.

3.2.7.1. Juntas Coladas para a Primeira Bateria de Testes

Chapas metálicas foram jateadas utilizando uma granalha com granulação G25, mostrado na Figura 37. Esta técnica de preparação de superfície tem sido bastante utilizada em plataformas de petróleo, por ser um processo que fornece um perfil de rugosidade considerado adequado.



Figura 37: Chapa metálica sendo jateada.

Após o jateamento, mediu-se o grau de rugosidade (parâmetro Rt) em alguns pontos. A Figura 38 mostra a leitura de um ponto, cujo valor obtido foi de 98,04 μm , superior ao mínimo recomendado (75 μm) para colagem de materiais compósitos em

reparos de substratos metálicos. O parâmetro R_t representa a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo dentro do comprimento total de avaliação.



Figura 38: Medição da rugosidade na chapa metálica.

Em seguida, procedeu-se a limpeza das superfícies com acetona e iniciou-se a aplicação de uma demão da resina DION 9500-800. Depois, o rasgo da placa metálica foi preenchido com o adesivo NORPOL FI 184-70.

Após aplicação do adesivo de preenchimento, tem-se a introdução de um tecido denominado *peel-ply*, com posterior aplicação de resina de preenchimento. Estas etapas estão ilustradas na Figura 39.



Figura 39: Limpeza com acetona, preenchimento de adesivo no rasgo da chapa e aplicação do tecido *peel-ply*.

Quando se tem uma grande área a ser laminada, como é o caso do costado de plataformas tipo navio ou tanques de armazenamento, a laminação das camadas de compósito é realizada em etapas, precisando ser interrompida, pois não é possível realizar todo trabalho em apenas um dia. Neste caso, a utilização do tecido *peel-ply* no final de cada etapa, torna-se uma alternativa bastante interessante, pois possui como principal benefício a criação de perfil de rugosidade para a colagem da próxima camada de compósito, uma vez que a cura da resina sem este tecido promoveria uma região de superfície lisa, tornando esta inadequada para a adesão da camada seguinte. O *peel-*

ply é aplicado no momento em que a resina está sofrendo o processo de cura. Com isso, a resina, ainda em estado viscoso, penetra nos pequenos orifícios do *peel-ply*. Após a cura, a resina que penetrou nos orifícios será removida juntamente com a retirada do *peel-ply*, deixando, desta forma, uma superfície rugosa [101]. Além disto, este tecido protege a superfície contra possíveis contaminações provenientes do meio externo.

Após cura de 12 horas, procedeu-se a retirada do *peel-ply*, e iniciou-se a aplicação de uma demão de resina, seguida pela laminação de uma camada de manta de fibra de vidro descontínua impregnada com a mesma resina (Figura 40).



Figura 40: Remoção do *peel-ply* e aplicação de uma camada de manta de fibra de vidro.

Em seguida teve-se início a aplicação das camadas de fibra de carbono $\pm 45^\circ$ com impregnação da mesma resina. Após a laminação de sete camadas, procedeu-se novamente a colocação do tecido *peel-ply*, o qual foi removido após cura de 6 horas e aplicaram-se mais seis camadas, perfazendo um laminado de fibra de carbono de 13 camadas, finalizando a confecção do corpo de prova, mostrado na Figura 41. Em outro corpo de prova, fez-se a medição dos parâmetros de rugosidade sobre a superfície após a remoção do tecido *peel-ply*.



Figura 41: Laminação das camadas de fibra de carbono, com aplicação de *peel-ply* entre a 7ª e 8ª camada.

Durante todo o procedimento de laminação foram realizadas medições periódicas de temperatura e umidade, que se mantiveram na faixa de 25 a 30°C e 65 a 70%.

No final, cortam-se tiras de 28 mm da chapa metálica para obtenção das juntas coladas tipo SBS/Aço. Esta juntas foram denominadas JSC-Éster/Vinílica, de modo a diferenciar das juntas da segunda bateria de testes realizadas com resina epóxi. Nesta nomenclatura, a letra J significa Jateamento e SC, chapa sem corrosão. A Figura 42 mostra a junta após o corte. É importante ressaltar que na primeira bateria de testes o envelhecimento foi realizado na chapa inteira e somente depois da degradação que as juntas foram cortadas em tiras de 28 mm.



Figura 42: Junta colada tipo SBS utilizada na primeira bateria de testes.

As juntas de compósito de fibra de carbono e aço (CFC/Aço) foram projetadas segundo as diretrizes propostas na seção 8.F da Recomendação Prática RP C-301 da DNV “Projeto, Fabricação, Operação e Qualificação de Reparo Colado em Aço” [102]. A avaliação é baseada na norma ASTM D 3528 [100], com algumas modificações no

comprimento de ancoragem. As juntas coladas foram projetadas para reproduzir razoavelmente típicas geometrias de aplicações de campo.

3.2.7.2. Envelhecimento das Juntas Coladas da Primeira Bateria de Testes

Em uma das placas da primeira bateria de testes foi aplicada uma camada protetora de tinta epóxi (conforme norma Petrobras N-2912) e, em seguida, a placa foi submetida a um ano e seis meses de envelhecimento em um equipamento de degradação por radiação ultravioleta, e névoa salina, mostrados na Figura 43. A aplicação dessa camada representa a situação que ocorre nos casos reais, onde tanto o reparo, quanto à região adjacente são pintadas da mesma cor original da estrutura [15, 16].

As chapas coladas com compósitos de fibra de carbono foram submetidas a ensaio cíclico de envelhecimento, onde cada ciclo tem duração de sete dias e é composto pelas seguintes etapas:

- Exposição à névoa salina à 35 °C por 96 horas. A névoa salina foi preparada na proporção de 500 gramas de cloreto de sódio e 10 litros de água destilada.
- Exposição a raios UV-A por 72 horas por meio de lâmpada fluorescente com comprimento de onda de 340 nm e energia de 0,55 W/m²/nm (com ciclos de 4 horas a seco a 60 °C e 4 horas em regime de condensação a 50 °C).

A duração total do ensaio foi de 13.150 horas, equivalentes a 88 ciclos. Ensaios cíclicos são considerados mais representativos para avaliação de desempenho de revestimentos em relação aos ensaios de exposição contínua à névoa salina ou a raios ultravioletas, pois com a alternância, o revestimento é submetido a situações mais críticas como variação de tensões e ensaios na superfície de depósito de sais [103]. A energia de radiação UV fornecida pela lâmpada foi de 16,2 MJ/m² por dia, enquanto que a energia de radiação UV média por dia da cidade do Rio de Janeiro é de 16 MJ/m² [104, 105], logo os valores estão muito próximos e cada hora de exposição no laboratório corresponde à uma hora de exposição solar natural. Após a exposição das chapas, foram cortadas tiras de 28 mm de largura para se obter as juntas coladas para realização dos testes estáticos e cíclicos.



Figura 43: Placa colada com compósito em equipamento para exposição de UV e névoa salina durante um ano e seis meses.

3.2.8. Juntas Coladas para a Segunda Bateria de Testes

Na segunda bateria de testes, foram utilizadas chapas sem corrosão (lisas) e chapas com um processo corrosivo bastante intenso proveniente de corrosão atmosférica, como pode ser visto na Figura 44. Este tipo de superfície é comum ser encontrado nas estruturas metálicas danificadas da indústria do petróleo. Ressalta-se que não foi encontrado na literatura o estudo da influência deste parâmetro no comportamento estático, dinâmico e na vida útil de reparos por materiais compósitos. Todos os estudos encontrados foram realizados em chapas novas, sem corrosão e lisas [17, 35, 40, 76, 91, 106].



Figura 44: Chapa metálica com detalhe de região com corrosão acentuada.

As chapas metálicas foram jateadas com granalha de aço ou tratadas com máquina rotativa com impacto. Após a preparação de superfície, mediu-se o grau de rugosidade (parâmetro Rt) em alguns pontos. A Figura 45 mostra a leitura de cinco pontos, e destaca-se um valor medido de 81,06 μm , superior ao mínimo recomendado (75 μm) para colagem de materiais compósitos em reparos de substratos metálicos. Esta técnica de medição caracteriza-se por fixar um adesivo na superfície metálica, pressioná-lo para imprimir a digital da rugosidade na fita e em seguida promover a leitura em um micrômetro.

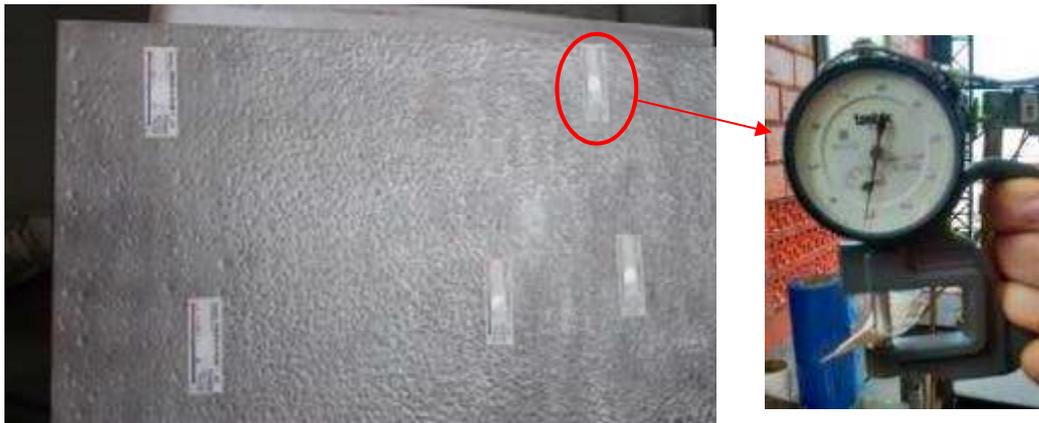


Figura 45: Medição da rugosidade na chapa metálica.

A Figura 46 mostra as imagens da chapa corroída e tratada com máquina rotativa de impacto. Segundo os requisitos da norma ISO 8501 [96], a superfície tratada é semelhante ao padrão Sa 2 ½, metal quase branco, na qual a superfície apresenta-se com coloração cinza homogênea e ausente de produtos de corrosão. Como mencionado anteriormente, a chapa corroída é caracterizada com alto nível de corrosão e enquadra-se na categoria D. Com isto, a superfície tratada é dita como D Sa 2 ½.



Figura 46: Chapa tratada com máquina com impacto e com corrosão acentuada.

Em seguida, procedeu-se a limpeza com acetona das chapas jateadas e tratadas com máquina rotativa de impacto. Posicionaram-se duas chapas distanciadas de 10 mm e iniciou-se a aplicação do adesivo de preenchimento NVT e depois se aplicou a camada de manta fibra de vidro. Estas etapas estão ilustradas na Figura 47. Nesta fase, o tecido *peel-ply* não foi inserido porque os resultados da primeira bateria de testes experimentais indicaram que não houve influência no comportamento mecânico da junta. Diferentemente da primeira bateria de testes, a laminação foi executada em ambos os lados. Neste tipo de procedimento, deve-se ter superior atenção, pois há maior possibilidade de desalinhamento entre as duas chapas metálicas.



Figura 47: Limpeza com acetona, aplicação de adesivo e da manta de fibra de vidro.

Em seguida, procedeu-se a impregnação da resina Pipefix na manta de fibra de vidro, com subsequente laminação das camadas de fibra de carbono com preenchimento da mesma resina. Após a laminação de 10 camadas de fibra de carbono, realizaram-se as mesmas etapas no outro lado da chapa. Estas etapas estão mostradas na Figura 48. A laminação destas chapas foi realizada na Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, no Laboratório de Adesão e Aderência.



Figura 48: Impregnação da resina Pipefix no tecido de fibra de vidro e laminação das camadas de fibra de carbono.

Após a confecção das chapas sobrepostas com compósitos em ambos os lados, procedeu-se o corte em tiras de 28 mm de largura. Como resultado, tem-se o corpo de prova mostrado na Figura 49. Cada junta consistiu em duas placas de aço de 255 mm

de comprimento, 28 mm de largura e 9,5 mm de espessura unidas por uma camada de manta de fibra de vidro picotada do tipo E e 10 camadas de fibra de carbono $\pm 45^\circ$ com 360 mm de comprimento e 6 mm de espessura.

Um aspecto importante na junta adesiva é a extremidade do reparo. De BARROS *et al.* [91] realizaram testes estáticos e dinâmicos de flexão de três pontos em juntas com e sem extremidade adoçada e concluíram que os primeiros apresentavam melhores propriedades. Com base nesses resultados, todos os corpos de prova foram fabricados com adoçamento nas bordas para reduzir as tensões fora do plano, como pode ser visto na Figura 49, detalhe A.

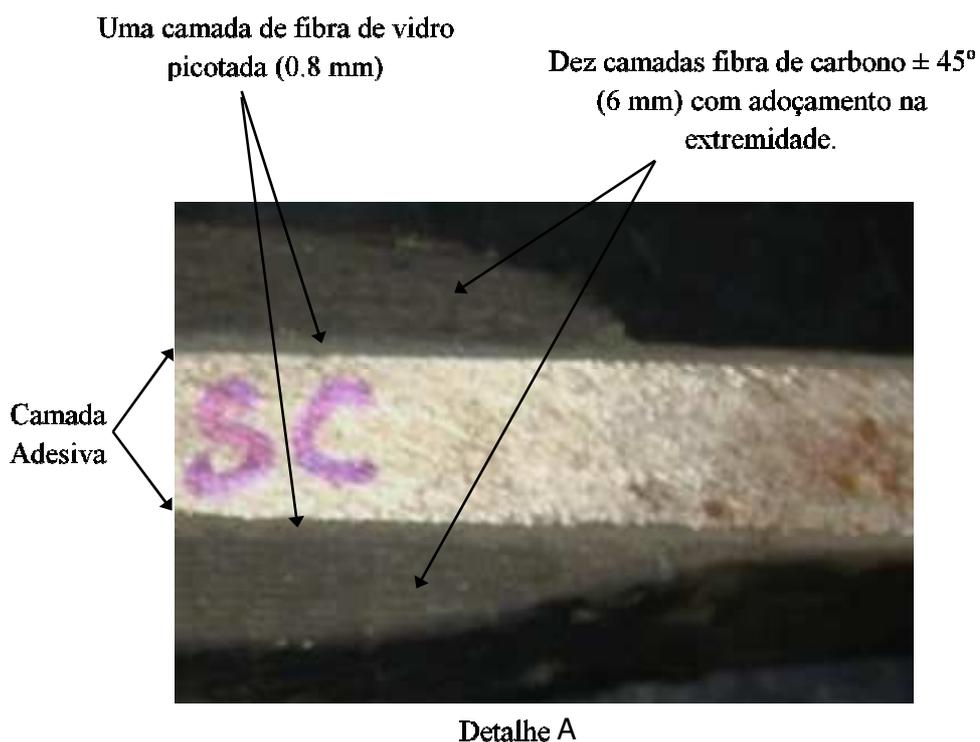
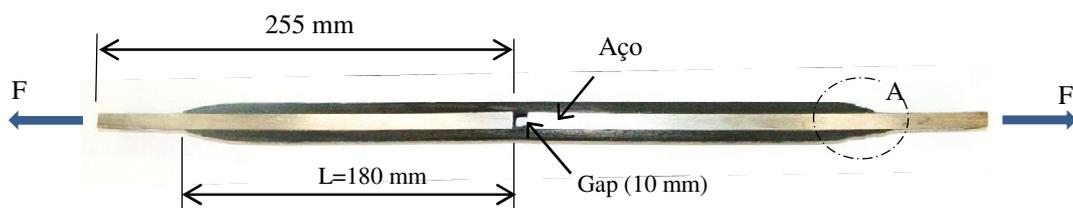


Figura 49: Geometria da junta colada tipo CFC/Aço.

As juntas de compósito de fibra de carbono e aço (CFC/Aço) foram projetadas segundo as diretrizes propostas na seção 8.F da Recomendação Prática RP C-301 da

DNV “Projeto, Fabricação, Operação e Qualificação de Reparo Colado em Aço” [102]. A avaliação é baseada na norma ASTM D 3528 [100], com algumas modificações no comprimento de ancoragem. Os corpos de prova foram projetados para reproduzir razoavelmente geometrias típicas de aplicações de campo.

As juntas foram nomeadas de acordo com a preparação de superfície e condição superficial quanto ao aspecto corrosivo, a saber:

- (i) Junta compósito de fibra de carbono e aço tratado por jateamento, sem corrosão na chapa metálica, denominada JSC.
- (ii) Junta compósito de fibra de carbono e aço tratado por jateamento, com corrosão na chapa metálica, denominada junta JC;
- (iii) Junta compósito de fibra de carbono e aço tratado por máquina rotativa de impacto, sem corrosão na chapa metálica, denominada junta MSC;
- (iv) Junta compósito de fibra de carbono e aço tratado por máquina rotativa de impacto, com corrosão na chapa metálica, denominada junta MC.

3.2.8.1. Envelhecimento das Juntas Coladas da Segunda Bateria de Testes

Na primeira bateria de testes, as juntas coladas estavam completamente protegidas por revestimento orgânico polimérico (pintura) durante o envelhecimento. Nesta segunda bateria de testes, o envelhecimento das juntas coladas foi realizado sem a proteção anticorrosiva nas juntas coladas, na região da interface. Desta forma, os corpos de prova possuíam uma região de interface de material metálico e laminado compósito sujeitos à degradação, na lateral do corpo de prova. Assim, as juntas coladas representam de forma mais realista situação no campo onde foi observada falha da tinta, que promoveu à exposição da interface à degradação do ambiente marinho, conforme mostrado anteriormente na Figura 24.

A Figura 50 mostra um dos lotes dos corpos de prova. Nesta figura é possível observar uma pintura na região central da parte metálica, cujo objetivo era proteger parte do aço e deixar somente a região da interface metal/compósito exposto na névoa salina. Posteriormente, observou-se que toda pintura na região central foi descolada pela ação do ambiente salino. É importante salientar que se trata de uma condição bastante severa.

As juntas foram colocadas dentro de uma câmara de névoa salina para envelhecimento com duas retiradas para realização de testes estáticos e fadiga, a primeira com 12 meses e a segunda com 18 meses de envelhecimento. A névoa salina foi preparada na proporção de 500 gramas de cloreto de sódio e 10 litros de água destilada.

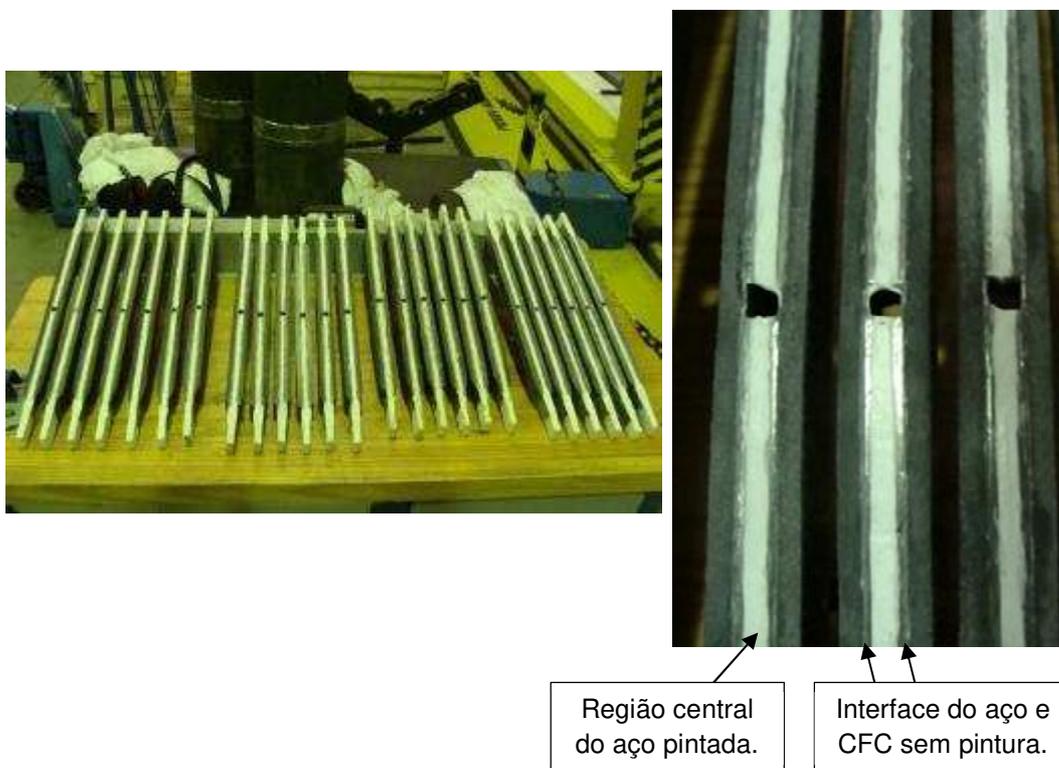


Figura 50: Juntas coladas da segunda bateria de testes para degradação.

3.2.8.2. Envelhecimento do Laminado de Compósito de Fibra de Carbono da Segunda Bateria de Testes

O material compósito de fibra de carbono foi submetido a um processo de envelhecimento em água e degradação UV para verificação de redução do módulo de elasticidade.

A primeira etapa do envelhecimento consistiu em promover a saturação dos corpos de prova. Para tanto, estes foram imersos em água a 70°C por um período de 14 semanas, tempo necessário para a saturação dos corpos de prova. As variações mássicas foram obtidas mediante a pesagem dos corpos de prova em balança analítica, antes e após a imersão, utilizando a Equação 2.

$$\text{Variação de massa \%} = [(M2-M1)/M1] \times 100 \quad (2)$$

Onde:

M1 é a massa inicial da amostra ao ar, em gramas;

M2 é a massa da amostra ao ar após imersão, em gramas.

Após a etapa de saturação, teve início o envelhecimento dos corpos de prova. Quatro conjuntos de 7 corpos de prova confeccionados por laminação manual foram imersos em vaso com água deionizada a 50, 60, 70 e 80°C (Figura 51) por um período de 180 dias com retiradas intermediárias em 48, 90, 120 dias.

A cada retirada, mediu-se o módulo de elasticidade em uma máquina universal de ensaios MTS, com auxílio de extensômetro fixado na lateral do corpo de prova.



Figura 51: Corpos de prova imersos na água a 80°C para envelhecimento.

Avaliação de Degradação UV

Cinco corpos de prova de compósito de fibra de carbono foram colocados em uma câmara de ultravioleta durante 60 dias, expostos a raios UV-A por meio de lâmpada fluorescente com comprimento de onda de 340 nm e energia de 0,55 W/m²/nm, como mostrado na Figura 52.



Figura 52: Corpos de prova de compósitos de fibra de carbono na câmara UV.

3.2.9. Ensaio de Tração e Fadiga nas Juntas Coladas

Os testes de tração nas juntas coladas foram realizados numa máquina universal de ensaios, fabricante MTS, capacidade de 10 toneladas, com velocidade do travessão de 2 mm/min. Foram aquistados o deslocamento do travessão e a carga durante o teste.

Para os testes cíclicos, o controle do ensaio foi realizado por carga e utilizou-se a razão $R = 0,1$ ($R = F_{min} / F_{max}$) e uma freqüência de carga constante $f = 10$ Hz para todos os corpos de prova. A temperatura foi medida por termômetro digital infravermelho durante os testes, a fim de verificar o superaquecimento causado pela histerese. Nenhuma alteração de temperatura relevante foi observada em qualquer teste.

Na primeira bateria de testes, os ensaios foram realizados até a falha da junta ou até o alcance de 10^6 ciclos, o que ocorresse primeiro. Foram selecionados quatro níveis de carga nominal diferentes para cada tipo de junta para determinar a curva de ciclo de carga por número de ciclos (DF-N). As curvas DF-N foram provenientes de 6 corpos de prova novos e 2 envelhecidos por 18 meses.

Na segunda bateria de testes, os ensaios foram realizados até a falha da junta ou até o alcance de 10^7 ciclos, o que ocorresse primeiro. Foram selecionados quatro níveis de carga nominal diferentes para cada tipo de junta para determinar a curva de ciclo de carga por número de ciclos (DF-N). As curvas DF-N foram provenientes de 16 corpos de prova novos e 16 envelhecidos por 12 meses, quatro para cada tipo de junta.

3.2.10. Análise Micrográfica e Macrográfica das Juntas

Imagens das fraturas foram obtidas utilizando microscópio ótico para identificação das regiões de falha após os testes experimentais antes e após envelhecimento da primeira bateria de testes e imagens da interface da segunda bateria de testes.

As preparações das amostras de junta colada para visualização no microscópio estão enumeradas abaixo:

- 1) Execução de cortes com serra manual;
- 2) Lixamento manual prévio (#80) para remoção de rebarbas (e subsequentes #120, # 320, #600 nas amostras não embutidas);
- 3) Embutimento a frio em resina epóxi;
- 4) Lixamento manual das amostras embutidas (#120, #320 e #600);
- 5) Polimento em pasta de diamante 3 μm e 1 μm .
- 6) Ataque com solução aquosa de ácido fluorídrico a 10% para promover contraste da fibra perante a resina.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA PRIMEIRA BATERIA DE TESTES

O entendimento do comportamento mecânico de um reparo por material compósito em estruturas metálicas quando submetido a carregamentos estático e dinâmico é de fundamental importância para maximizar a eficiência ao longo de sua vida útil. O conhecimento da influência da preparação de superfície associada e seu efeito na degradação proveniente das intempéries do meio também é crucial. Para tanto, testes experimentais estáticos e dinâmicos foram realizados por meio de juntas coladas que representam a situação do reparo real. Neste primeiro momento foi avaliada somente a preparação de superfície com jateamento em placas sem corrosão. Numa segunda etapa foram realizados testes com preparação de superfície por meio de máquina rotativa de impacto em chapas sem corrosão e com corrosão acentuada. Também foram realizados testes na resina e nos laminados de fibra de vidro e fibra de carbono para determinação das propriedades mecânicas. Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios experimentais realizados.

4.1. Ensaio de Tração em Corpos de Prova da Resina de Impregnação, Compósito de Fibra de Vidro e Fibra de Carbono

Corpos de prova da resina de impregnação DION 9500-800 foram submetidos ao ensaio de tração. A Tabela 4 apresenta os valores de módulo de elasticidade, coeficiente de *Poisson* e limite de resistência.

Tabela 4: Propriedades mecânicas da resina de impregnação DION 9500-800.

Corpo de Prova	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson	Limite de Resistência (MPa)
1	2,2	0,38	51
2	2,4	0,37	39
3	1,9	0,38	17
4	2,7	0,38	48
5	2,3	0,37	49
6	2,7	0,38	50
Média	2,3	0,38	42
Desvio Padrão	0,31	0,005	13,14

Tem-se que o módulo de cisalhamento da resina (G_r) é dado pela Equação 3.

$$G_r = \frac{E_r}{2(1+\nu_r)} \quad (3)$$

Onde:

E_r = módulo de elasticidade da resina

ν_r = coeficiente de Poisson da resina

Logo o valor do módulo de cisalhamento da resina é de 833 MPa.

Por meio dos ensaios de tração foi possível obter as propriedades mecânicas do laminado de fibra de vidro e do compósito de fibra de carbono. As Tabela 5 e Tabela 6 apresentam os valores de módulo de elasticidade, coeficiente de *Poisson* e limite de

resistência do compósito de fibra de vidro e carbono, respectivamente, relativos à primeira bateria de testes. As placas do laminado de fibra de carbono foram cortadas de modo que resultasse em um laminado com orientação 0/90°. Os resultados de propriedades mecânica do compósito de fibra de vidro e fibra de carbono estão em consonância com valores encontrados na literatura [22, 107, 108].

Tabela 5: Propriedades mecânicas do compósito de fibra de vidro.

Corpo de Prova	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson	Limite de Resistência (MPa)
1	8,6	0,32	110
2	7,2	0,33	103
3	7,6	0,33	95
4	8,0	0,32	112
5	7,0	0,31	95
6	7,7	0,37	112
Média	7,7	0,33	105
Desvio Padrão	0,57	0,02	8,07

Tabela 6: Propriedades mecânicas do compósito de fibra de carbono 0/90°.

Corpo de Prova	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson	Limite de Resistência (MPa)
1	47	0,06	643
2	51	0,11	640
3	46	0,06	671
4	45	0,04	695
5	44	0,03	621
6	42	0,01	634
Média	46	0,05	651
Desvio Padrão	3,06	0,03	27,2

4.2. Ensaio Estático em Juntas Coladas na Primeira Bateria de Testes

As juntas coladas tipo SBS foram ensaiadas aos pares de modo a minimizar as cargas de flexão, conforme mostra a Figura 53. No lado direito da figura tem-se uma ilustração do par de juntas SBS.

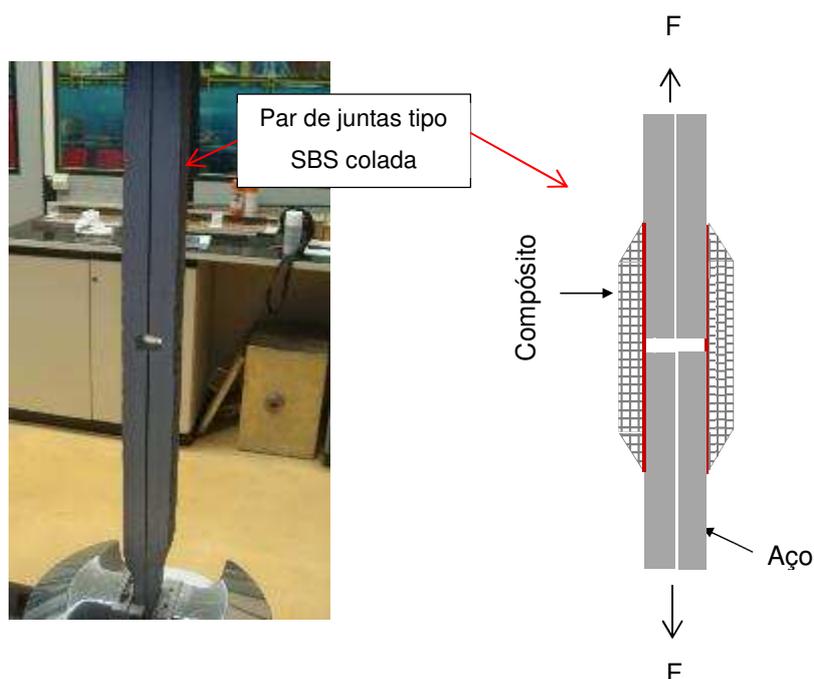


Figura 53: Par de juntas tipo SBS coladas na máquina universal de ensaios para teste de cisalhamento.

Inicialmente, as juntas coladas foram ensaiadas com diferentes comprimentos de ancoragem com objetivo de avaliar a tensão máxima cisalhante e o comprimento efetivo máximo, como descrito no item 2.7.1. Para tanto, os laminados foram cortados no compósito de fibra de carbono de modo que resultassem em comprimentos de 40, 60, 80 e 185 mm, como mostra a Figura 54. Cada comprimento de ancoragem foi submetido a quatro testes de ruptura e os resultados são apresentados na Tabela 7.

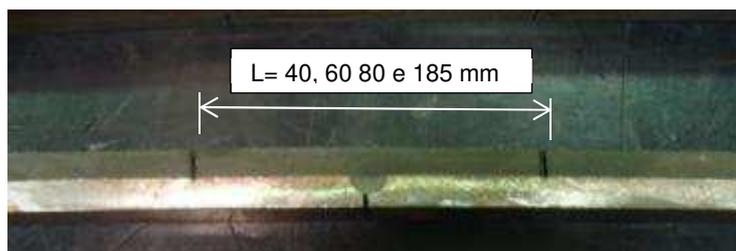


Figura 54: Detalhe do corte do compósito de fibra de carbono para obtenção de diferentes comprimentos de ancoragem.

Tabela 7: Resultado dos testes de cisalhamento de junta colada com diferentes comprimentos de junta colada.

Corpo de Prova	Comprimento de Ancoragem (mm)	Carga de Falha (N)	Carga de Falha/Largura (N/mm)
40_1	40	27.607	567
40_2	40	28.783	580
40_3	40	27.149	544
40_4	40	26.467	550
60_1	60	29.177	616
60_2	60	32.482	677
60_3	60	31.008	612
60_4	60	34.371	694
80_1	80	35.618	715
80_2	80	30.233	616
80_3	80	36.861	693
80_4	80	34.774	723
185_1	185	37.130	762
185_2	185	36.666	723
185_3	185	35.547	712
185_4	185	36.111	748

A Figura 55 mostra os gráficos da média da carga por deslocamento para os diferentes comprimentos de ancoragem. É possível observar no gráfico, no comprimento de ancoragem mais longo ($L=185$ mm) que a carga permanece praticamente constante enquanto se tem uma propagação estável do defeito. Também

é possível identificar uma leve não-linearidade nos ensaios antes da carga máxima. Este comportamento está de acordo com o mencionado na literatura [3, 61, 109].

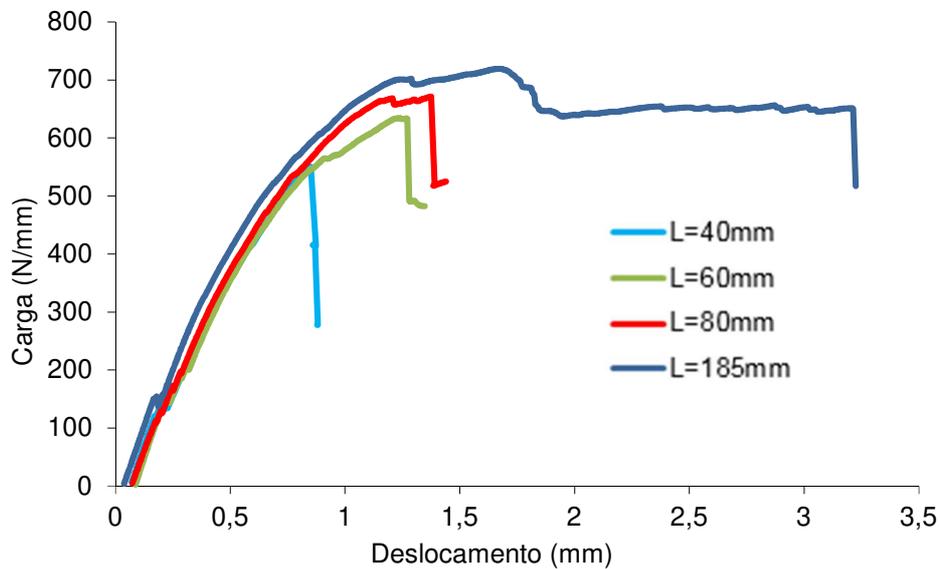


Figura 55: Testes de cisalhamento com diferentes comprimentos de ancoragem

Observa-se que a partir de determinado comprimento de ancoragem, denominado comprimento efetivo máximo, L_{em} , a carga de falha não se eleva. Traçando-se, então, um gráfico em termos de carga de falha por comprimento de ancoragem, mostrado na Figura 56, é possível obter os dois parâmetros que definem este sistema de colagem: tensão máxima cisalhante, τ_m , e comprimento efetivo máximo, L_{em} . O primeiro é definido através da Equação 4, onde f_m é a carga máxima por largura dividido pela largura do corpo de prova.

$$\tau_m = \frac{f_m}{L_{em}} \quad (4)$$

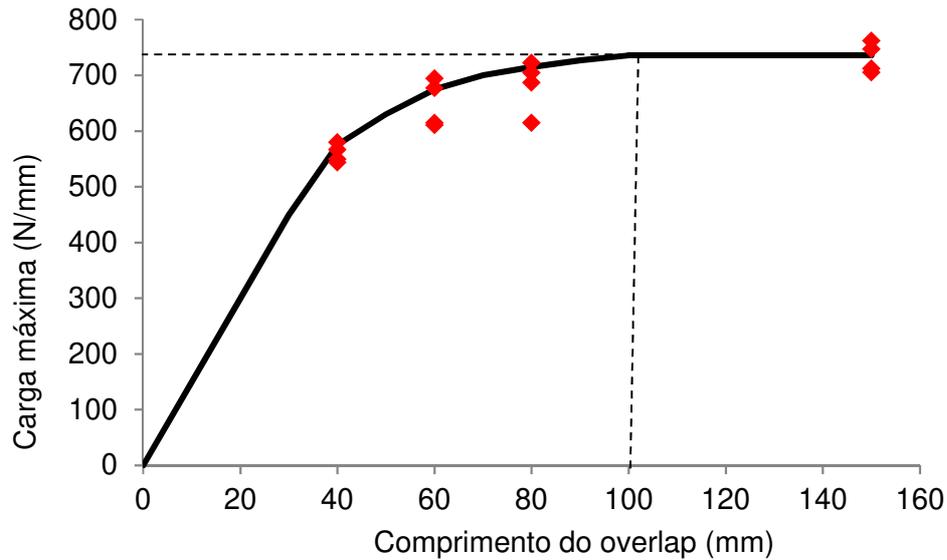


Figura 56: Curvas de carga máxima em função do comprimento de ancoragem.

Obteve-se o valor de 736 N/mm como a maior carga por largura que a junta colada é capaz de suportar independentemente do tamanho de ancoragem da região colada e o comprimento efetivo máximo de 100 mm. Pela Equação 4 tem-se que a tensão cisalhante máxima é de 7,36 MPa.

Resultados semelhantes foram encontrados por COLOMBI e FAVA [3] em testes de cisalhamento em juntas DBS CFC/Aço ensaiadas com preparação de superfície tipo jateamento e sem envelhecimento. Os autores encontraram valor de 950 N/mm como a maior carga por largura que a junta é capaz de suportar independentemente do tamanho de ancoragem da região colada, comprimento máximo efetivo de 86 mm e tensão cisalhante máxima de 20 MPa. Os valores superiores de carga por largura e tensão cisalhante máxima podem ser decorrentes do fato das propriedades mecânicas do compósito de fibra de carbono serem superiores aos do material estudado neste trabalho. O módulo de elasticidade citado pelos autores do compósito de fibra de carbono foi de 197 GPa e o limite de resistência foi de 2.800 MPa, enquanto que neste estudo os valores foram de 46 GPa e 651 MPa, respectivamente. O comprimento efetivo máximo obtido pelos autores foi inferior ao alcançado por este trabalho. Este fato está em consonância conforme descrito por MCGEORGE [57], que prevê valores inferiores à medida que se aumenta a rigidez do sistema colado.

Como descrito anteriormente, uma das placas foi submetida a um processo de envelhecimento em câmara de UV e névoa salina durante um ano e seis meses. Após este período, foram usinadas juntas coladas a partir da placa, para testes estáticos, com comprimento de ancoragem de 185 mm. A Figura 57 mostra a média das curvas carga

por deslocamento dos materiais envelhecidos e sem envelhecimento. Observa-se pelo gráfico que as juntas envelhecidas apresentaram uma carga máxima superior, no valor de 830 N/mm. Este fato pode estar associado a um processo de pós-cura no adesivo da interface e na resina de impregnação. É possível verificar que não houve degradação na junta em função da exposição ao UV e à névoa salina. O fator determinante para a não ocorrência está associado ao fato da junta estar protegida por revestimento orgânico anticorrosivo (pintura), que tem capacidade de impedir a difusão de umidade na interface da junta colada e desta forma, evitar corrosão. Infere-se deste resultado que a pintura atuou como uma barreira de proteção da interface, que por sua vez teve suas propriedades melhoradas pela finalização do processo de cura do adesivo com o tempo.

No trabalho de PARK *et al.* [110], juntas coladas do tipo SLJ com substrato de compósito de fibra de carbono foram imersas em banho de água, onde foi observado que a saturação ocorreu após 42 dias e o valor obtido foi de apenas 0,64%, sendo que neste estudo não havia substrato metálico. Os autores relatam que ocorreu uma melhora na resistência ao cisalhamento e atribuem isto a ocorrência de pós-cura, mesmo mecanismo aqui proposto.

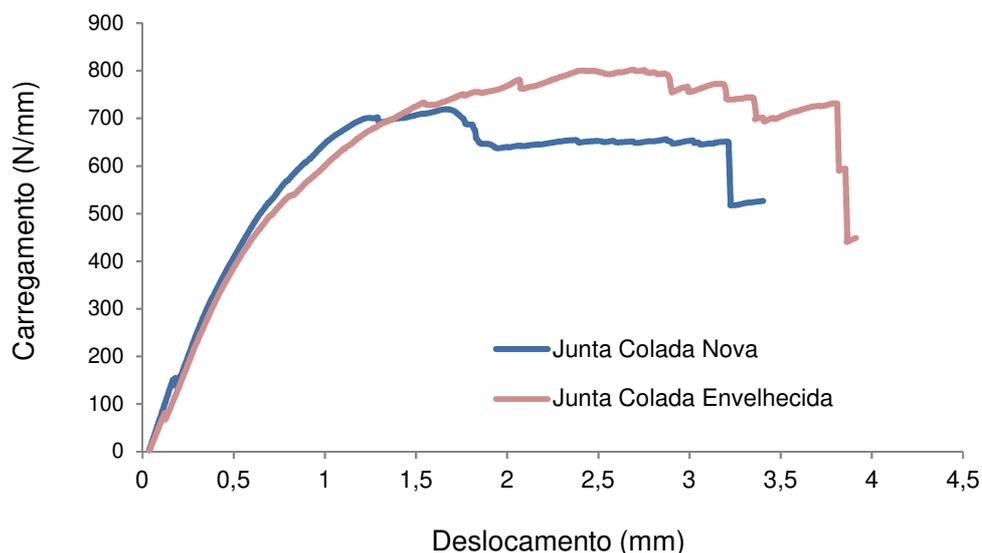


Figura 57: Testes de cisalhamento em juntas sem e com envelhecimento com L=185 mm. Curva média dos testes.

O modo de falha dos corpos de prova foi identificado como delaminação na interface das camadas do compósito de fibra de carbono, tendo início entre a primeira e segunda camada e à medida que esta se propagava, o descolamento progredia para o interior do laminado de compósito de fibra de carbono, como mostrado na Figura 58.

Este fenômeno foi observado nos dois tipos de juntas coladas: com e sem envelhecimento e está associado ao fato da trinca (descolamento) encontrar um plano de cisalhamento onde provavelmente havia uma deficiência de impregnação da resina na fibra de carbono. Este tipo de falha mostra que a adesão no substrato metálico se manteve íntegra. Este é um indicativo de que houve uma boa preparação de superfície. A falha também mostra que o limite de tensão cisalhante entre as camadas de compósito é menor que a tensão de cisalhamento crítica na interface aço/compósito.

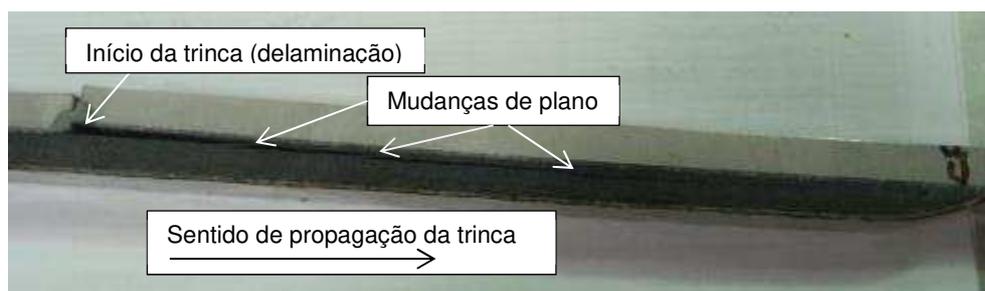


Figura 58: Modo de falha por delaminação entre as camadas do laminado de fibra de carbono de uma junta colada envelhecida.

BOCCIARELLI *et al.* [40] encontraram modo de falha similar em alguns aspectos ao deste estudo, com algumas considerações. Os autores relatam em seu trabalho, que não ocorreu falha adesiva em nenhuma junta e que a falha se deu por delaminação entre as camadas do compósito, com início na extremidade, região com maior concentração de tensões. Porém, a falha, após seu início percorria o mesmo plano até a sua falha. Este fato pode ser explicado devido à diferença entre o processo de fabricação do laminado compósito. Os autores utilizaram laminados do tipo pré-preg, os quais já possuem percentuais de resina e fibra provenientes do processo de fabricação, enquanto que neste trabalho, optou-se pela impregnação da resina nas fibras *in-situ*, de maneira manual. Este segundo método tende a ser mais propício a conter regiões com diferentes percentuais de resina, logo, podendo ser o gerador de mudança de plano da delaminação no ponto pobre em resina. A utilização de laminados pré-impregnados é muito útil quando se tem regiões bem definidas, como é o caso de reparos de vigas metálicas para a indústria civil, avaliada pelos autores. Para o caso de reparo de estruturas marítimas, ao qual se propõe esta tese, as regiões são de maiores dimensões e mais irregulares, tornando a impregnação manual mais adequada.

A Figura 59 mostra a face do substrato metálico, proveniente da interface, após o envelhecimento, no qual é possível observar que a superfície não sofreu nenhum ataque do meio externo. Removeu-se um pequeno pedaço da parte mais extrema da

chapa que sofreu envelhecimento, a qual se caracteriza pela região mais crítica em termos de degradação, mostrada na Figura 60. É possível visualizar a interface interna com a camada de fibra de vidro e observa-se que não há sinal de envelhecimento, corroborando com os bons resultados encontrados nos testes de cisalhamento de juntas envelhecidas.



Figura 59: Substrato metálico após envelhecimento

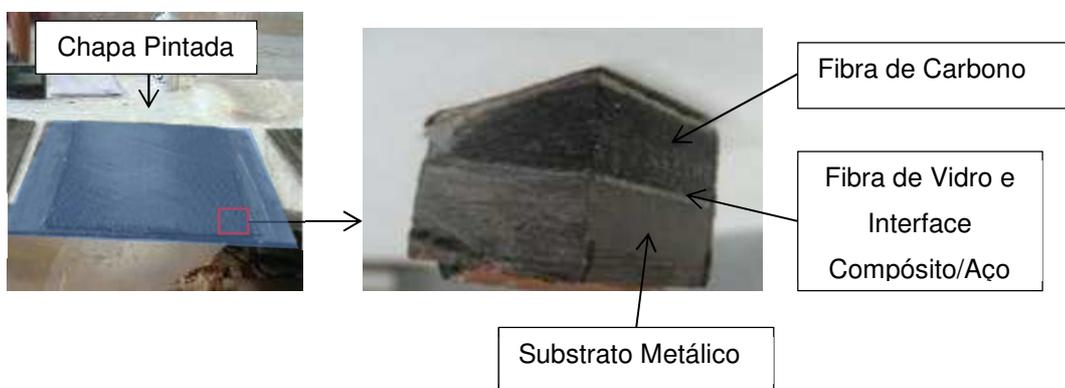


Figura 60: Retirada de amostra de junta colada na região mais próxima da extremidade da chapa pintada após envelhecimento.

Como mostrado na Figura 39, foi aplicado um tecido *peel-ply* nas juntas da primeira bateria de testes. Após a remoção do tecido, mediram-se os parâmetros de rugosidade, nos quais foram encontrados os valores de 9,9 μm para Sa e 115 μm para St. Sa expressa a média dos valores absolutos de $Z(x, y)$ (função que representa a altura da superfície em relação ao plano de montagem) na área medida. É um parâmetro 3D expandido do Ra (2D). St é também um parâmetro 3D expandido a partir do parâmetro

de rugosidade Rt (2D). Estes resultados estão dentro da faixa de rugosidade adequada para reparos por laminados compósitos.

4.3. Ensaio Dinâmico em Juntas Coladas da Primeira Bateria de Testes

Seis pares de juntas novas e dois pares de juntas envelhecidas em névoa salina e câmara de UV foram submetidas a carregamento cíclico em diferentes níveis de carga, com intuito de se conhecer como se dava a propagação da trinca (delaminação) e também avaliar a vida útil do sistema colado quando submetido a esforços dinâmicos. Os corpos de prova para os ensaios de fadiga possuem as mesmas dimensões e foram confeccionados da mesma forma que os produzidos para os testes estáticos, porém só foram testados os corpos de prova com comprimento de ancoragem com 185 mm.

A definição dos intervalos de carga para a ciclagem teve como referência a menor carga máxima entre os quatro testes de juntas coladas de maior comprimento de ancoragem obtida nos testes estáticos, cujo valor foi de 35.547 N. Cada corpo de prova, caracterizado como um par de juntas colado, foi ciclado de acordo com as cargas e número de ciclos até a falha, mostradas na Tabela 8. A razão de carga foi mantida constante em 0,1.

Tabela 8: Cargas e número de ciclos até a falha nos ensaios de fadiga.

Corpo de Prova	Carga Mínima (KN) / (%)	Carga Máxima (KN) (%)	Número de ciclos até a falha
JSC/Éster-Vinílica 01	3,2 / 9%	32 / 90%	10.000
JSC/Éster-Vinílica 02	2,5 / 7%	25 / 70%	54.000
JSC/Éster-Vinílica 03	2,2 / 6%	22 / 60%	230.000
JSC/Éster-Vinílica 04	1,6 / 4,5%	16 / 45%	814.700
JSC/Éster-Vinílica 05	1,9 / 5,2%	19 / 52%	1.680.000
JSC/Éster-Vinílica 06	1,35 / 3,7%	13,5 / 37%	4.800.000
JSC/Éster-Vinílica 07 (Envelhecido)	2,8 / 8,1%	28,8 / 81%	26.290

JSC/Éster-Vinílica 08 (Envelhecido)	1 / 2,8%	10 / 28,1%	6.000.000 (*)
(*) Não houve falha			

Com os resultados da Tabela 8 é possível construir a curva de vida à fadiga para este sistema de junta colada, mostrada na Figura 61. A curva se baseia no modelo estabelecido por Wöhler, constituído de um gráfico semi-logarítmico de variação de tensão *versus* o número de ciclos necessários para a ruptura.

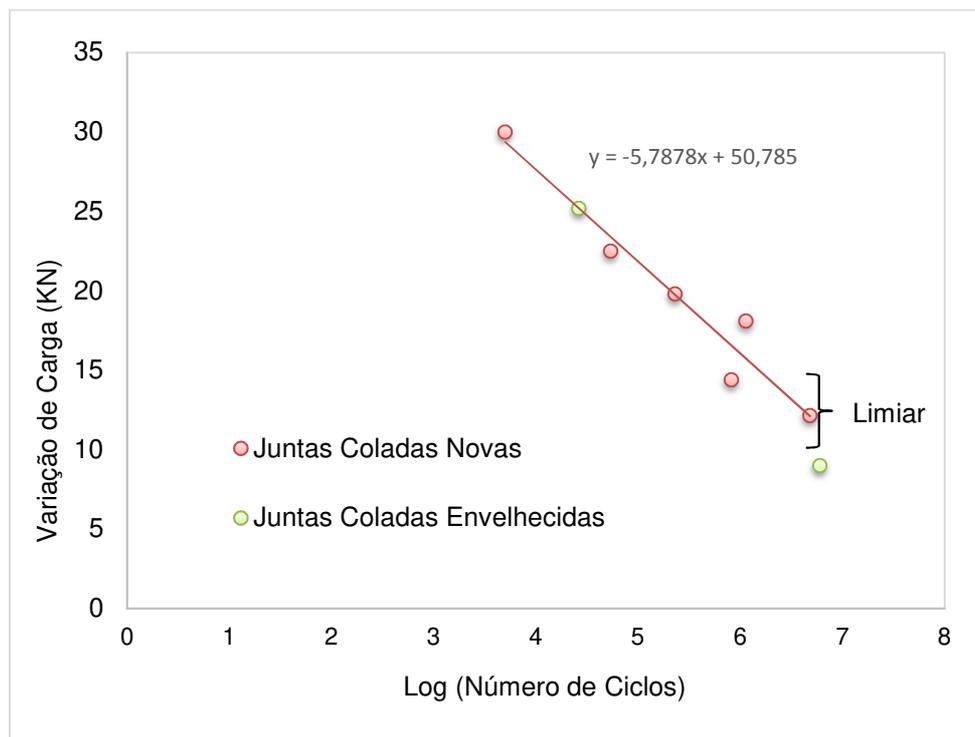


Figura 61: Curva de vida à fadiga referente à primeira bateria de ensaios.

O teste com baixo nível de carga da junta colada envelhecida foi ensaiado até 6 milhões de ciclos e não houve propagação da trinca, indicando que este pode ser o limiar de propagação. No teste com alto nível de carregamento da junta colada envelhecida observou-se falha na mesma ordem do número de ciclos das juntas novas, mostrando que o envelhecimento não afetou o comportamento à fadiga neste ponto, mostrado na Figura 61. Os testes indicam que o limiar de vida à fadiga encontra-se na ordem de 33% do limite de resistência, sem envelhecimento. COLOMBI *et al.* [3] obtiveram mesma ordem de grandeza para este limiar de vida à fadiga em juntas coladas semelhantes a este trabalho.

Para efeito de medição de crescimento de trinca, cada par de juntas apresentava o crescimento de quatro trincas (descolamentos), duas do lado esquerdo e duas do lado direito. O comprimento de um dado defeito foi definido como o valor médio obtido de

medições nas faces frontal e posterior. As laterais das juntas coladas foram pintadas de branco, de maneira a tornar o comprimento dos defeitos mais visíveis e facilitar o acompanhamento da propagação. A Figura 62 mostra um corpo de prova pintado de branco, onde é possível ver as quatro trincas. As medições foram realizadas com paquímetro digital.



Figura 62: Trincas de fadiga

A Figura 63 e a Figura 64 mostram, como exemplo, a evolução do crescimento da trinca até a falha em função do número de ciclos de dois tipos de corpos de prova. O corpo de prova 2 é um exemplo que falhou com baixo número de ciclos e o corpo de prova 5, outro exemplo que falhou com elevado número de ciclos.

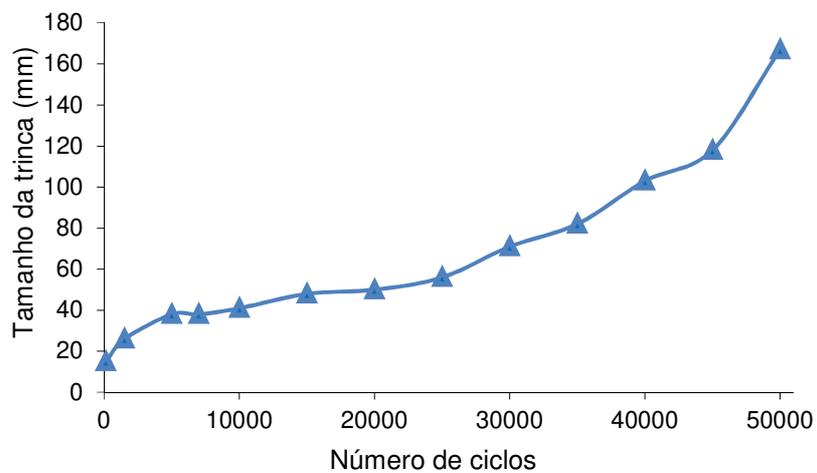


Figura 63: Crescimento da trinca em função do número de ciclos em um ensaio com baixo número de ciclos. Corpo de prova 2.

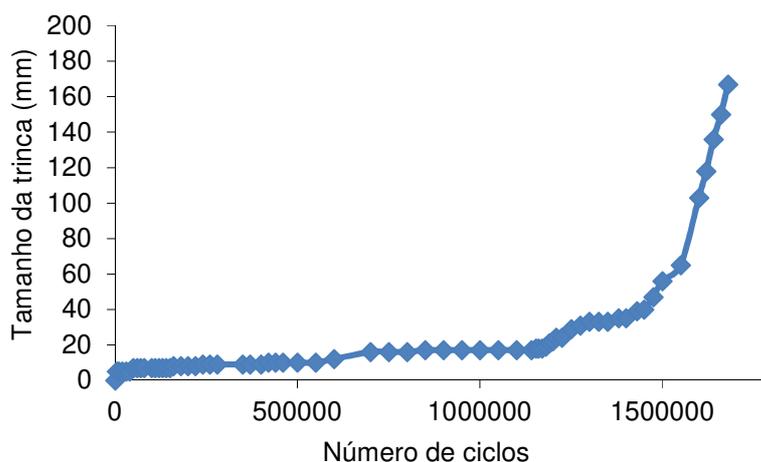


Figura 64: Crescimento da trinca em função do número de ciclos em um ensaio com alto número de ciclos. Corpo de prova 5.

A falha do corpo de prova pode também ser caracterizada pela queda de rigidez do sistema de junta colada. Essa queda é identificada por meio da evolução do deslocamento da junta durante a ciclagem. A Figura 65 mostra como o deslocamento da junta cresce em função do número de ciclos do corpo de prova 5. Nota-se uma queda no início, seguida de uma estabilização e depois uma elevada redução de rigidez nos últimos ciclos até a falha, bastante similar ao comportamento de evolução de trinca estabelecido por Paris. Este gráfico mostra a queda de rigidez e consequente aumento da flexibilidade da junta 5.

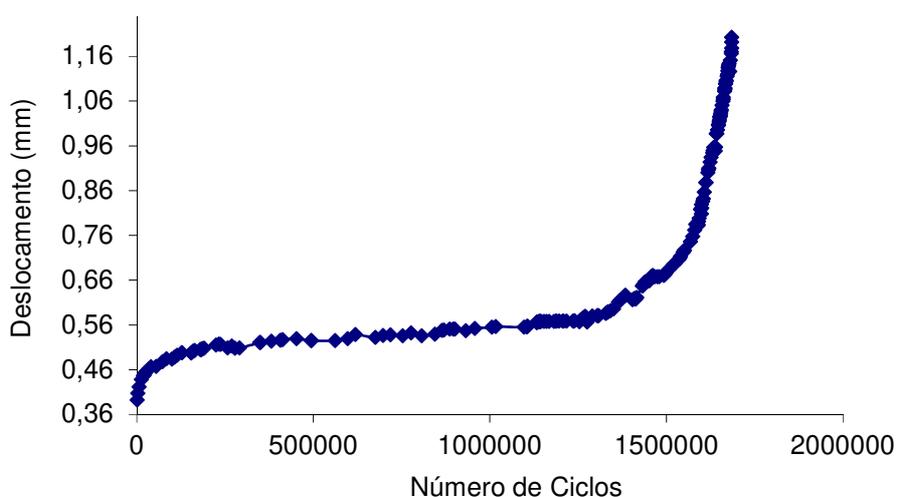


Figura 65: Crescimento do deslocamento em função do número de ciclos do corpo de prova 5. Representação da queda de rigidez da junta.

BOCCIARELLI *et al.* [40] obtiveram uma queda de rigidez por meio de ensaios de fadiga em juntas similares a este trabalho. Porém, esta queda foi observada somente na etapa final do teste cíclico, diferente deste trabalho que obteve redução da rigidez nos primeiros ciclos e nos últimos.

4.4. Análises Macrográficas e Micrográficas na Primeira Bateria de Testes

A Figura 66 mostra a vista lateral de uma junta nova com a trinca de fadiga que se originou no centro e progrediu para ambos os lados. A sequência de números foi utilizada para facilitar a identificação das imagens.

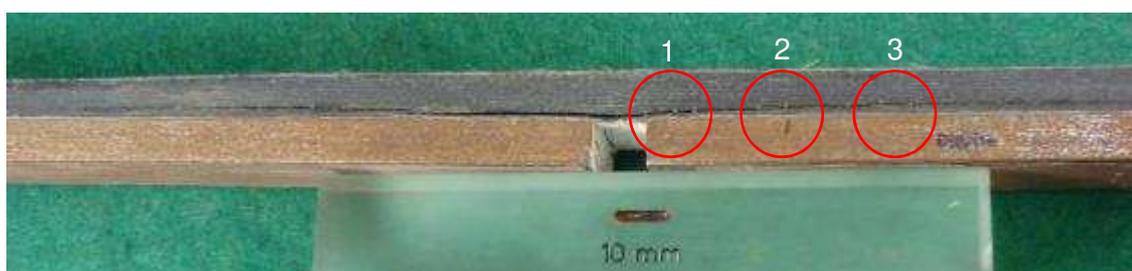


Figura 66: Vista lateral de uma junta sem processo de degradação com a trinca de fadiga.

A região 1, ampliada na Figura 67, é o ponto de iniciação da trinca, caracterizada por delaminação entre a primeira e a segunda camada de fibra de carbono. Logo em seguida, observa-se a mudança de plano após o avanço da trinca.

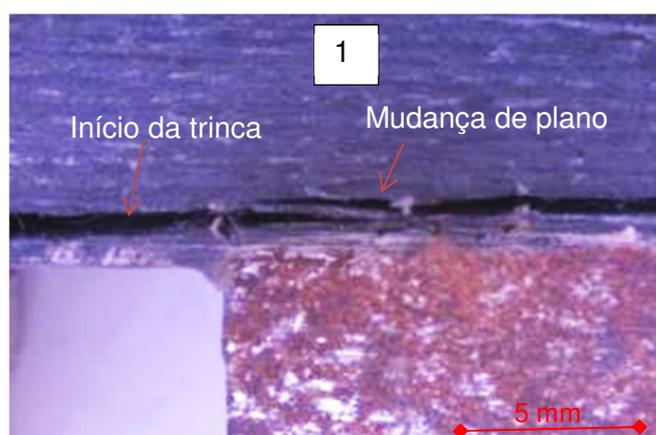


Figura 67: Região 1 - Início da trinca. Aumento de 7,5x.

A Figura 68 mostra a região 2, de forma ampliada, onde a trinca propaga entre a segunda e terceira camada de fibra de carbono até sua interrupção e em seguida tem-se a continuação do avanço da trinca entre a terceira e quarta camada de fibra de carbono. A Figura 69 mostra a região 3, de forma ampliada, onde a trinca propagava entre a terceira e quarta camada de fibra de carbono até mudança de plano e em seguida entre a quarta e quinta camada de fibra de carbono.

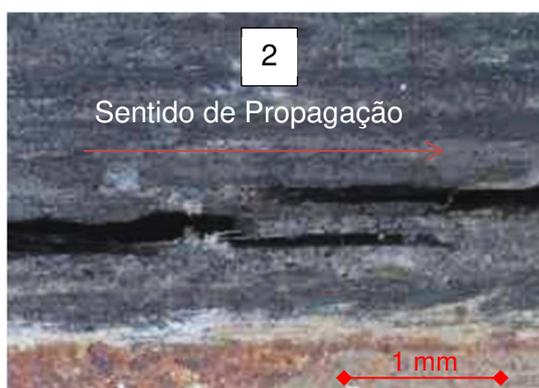


Figura 68: Mudança de plano da trinca com interrupção. Aumento de 7,5x.

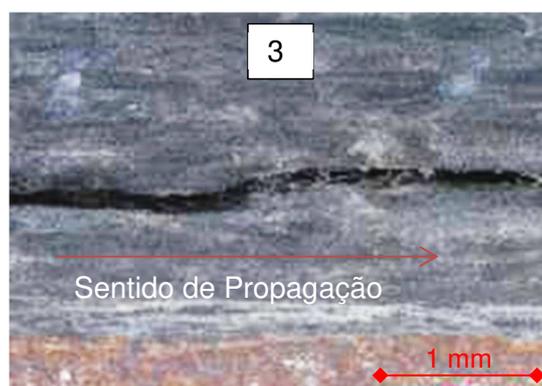


Figura 69: Mudança de plano da trinca sem interrupção. Aumento de 7,5x.

Este comportamento de propagação de trinca também foi observado para a junta colada que foi submetida ao processo de degradação.

A Figura 70 ilustra uma imagem de junta colada nova, no qual é possível visualizar o substrato metálico, a camada de fibra de vidro, quatro lâminas de fibra de carbono, as quais correspondem a duas camadas de $\pm 45^\circ$, e a resina de impregnação. Observa-se que a camada de fibra de vidro possui aproximadamente 0,8 mm, cada camada de compósito de fibra de carbono possui 0,5 mm, correspondendo a cerca de 0,25 mm para cada lâmina. É possível visualizar que a resina entre as camadas de fibra de carbono pode variar de espessura, tendo em visto o processo de laminação ser realizado de forma manual.

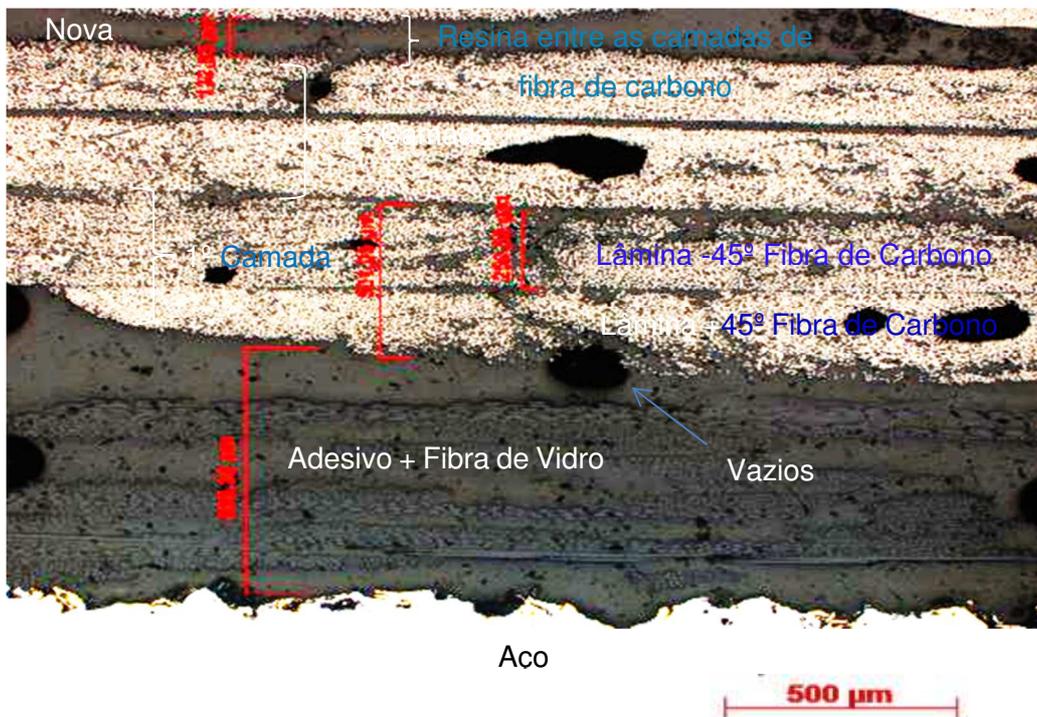


Figura 70: Micrografia da junta colada nova compreendendo o aço, camada de fibra de vidro e duas camadas de fibra de carbono. Aumento de 50 vezes.

A Figura 71 mostra uma imagem similar, porém de uma junta após envelhecimento e teste de fadiga. Não se observa na imagem nova e nem na envelhecida algum descolamento na interface entre o material compósito e o substrato metálico. Os pontos escuros presentes nas imagens parecem indicar vazios devido à liberação de gases, que ficaram aprisionados durante o processo de cura da resina. A imagem envelhecida indica ter quantidade de gás aprisionado em maior quantidade.

A Figura 72 mostra o arranjo da fibra de carbono na matriz polimérica. Observa-se que não há uma distribuição regular, fato característico de processo manual de fabricação de laminado compósito. Foi encontrado o valor de $9,69 \mu\text{m}$ para o eixo maior da elipse de uma fibra de carbono, visto que a imagem mostra o corte de fibras orientadas a 45° , logo, pode concluir que o diâmetro da fibra de carbono é na ordem de ordem $7 \mu\text{m}$, valor típico de diâmetro de fibra de carbono utilizado em reparo de estruturas.

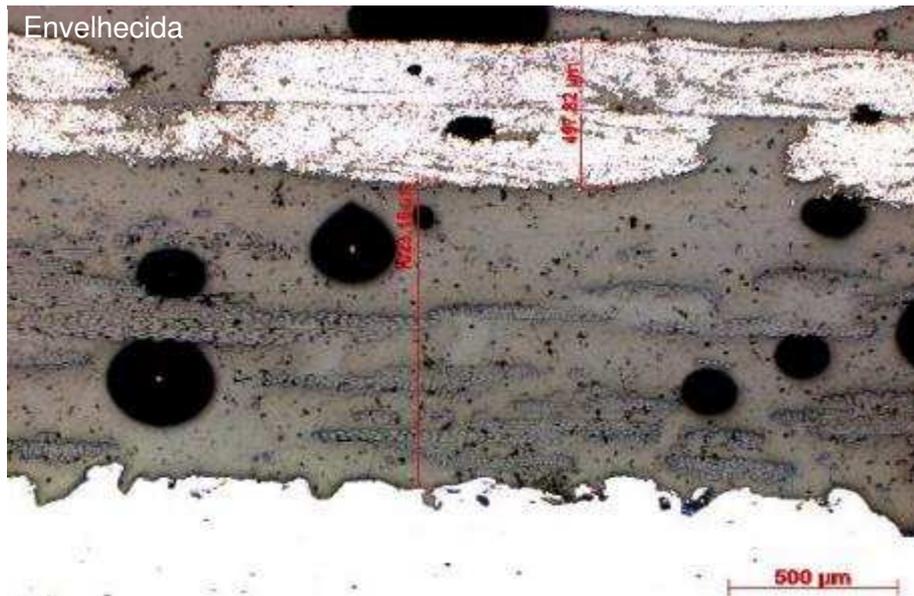


Figura 71: Micrografia da junta colada envelhecida compreendendo o aço, camada de fibra de vidro e 1 camada de fibra de carbono. Aumento de 50 vezes.

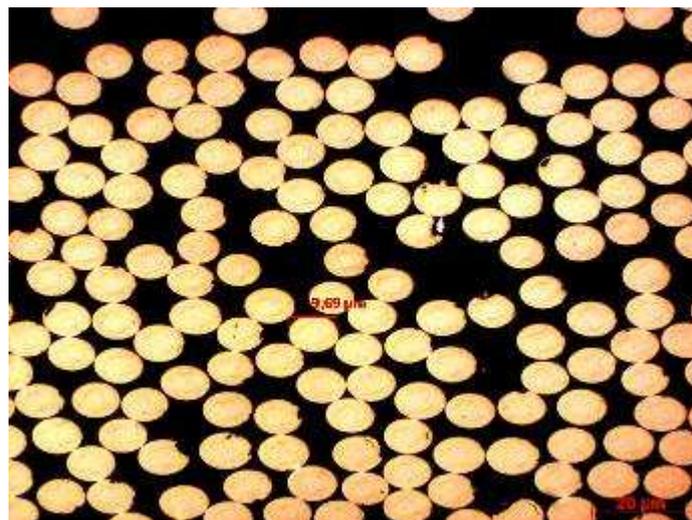


Figura 72: Arranjo da fibra de carbono na matriz polimérica. Aumento de 1000 vezes.

A Figura 73 mostra a adesão entre o substrato metálico e o laminado compósito após o teste de fadiga de uma junta nova e de uma junta que sofreu processo de envelhecimento. Observa-se que a adesão entre o aço e o compósito se manteve intacta nos dois tipos de juntas após os testes de fadiga.

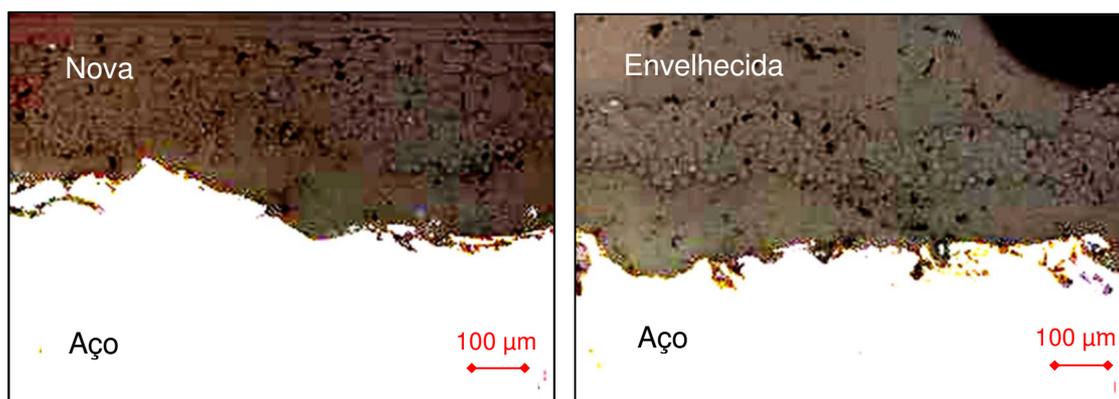


Figura 73: Adesão entre o Aço e o laminado compósito após o teste de fadiga de uma junta nova e de uma junta envelhecida. Aumento de 200 vezes.

A Figura 74 mostra a trinca em um corpo de prova novo após o teste de fadiga. Observa-se que a trinca progride na interface entre duas lâminas de fibra de carbono na primeira camada.

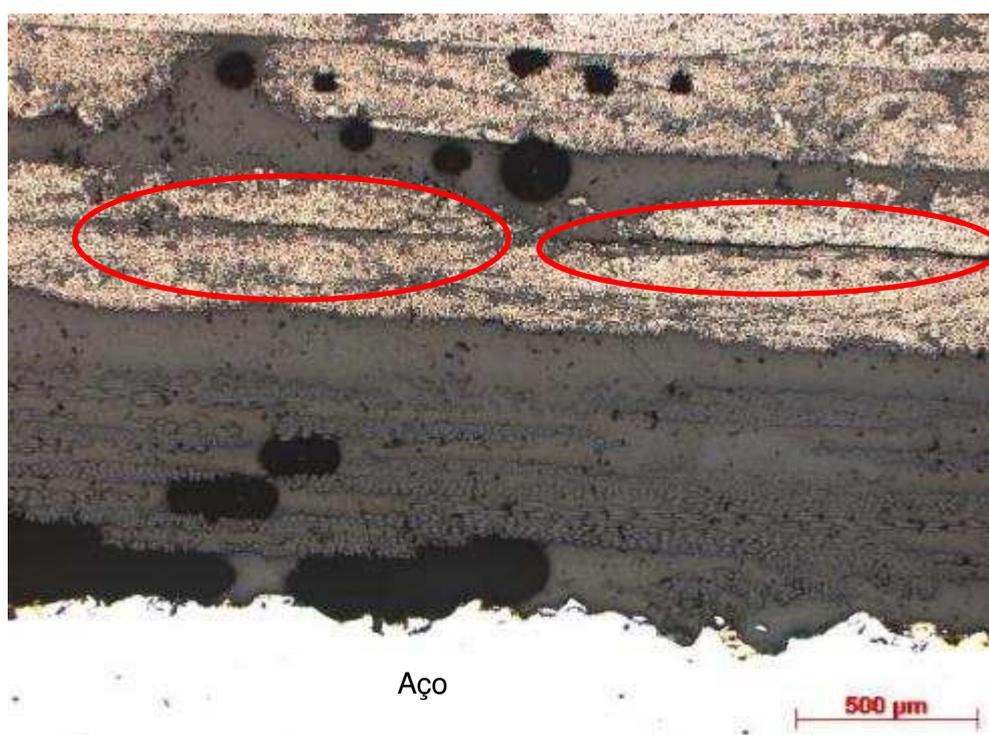


Figura 74: Trinca em junta nova após o teste de fadiga. Aumento de 50 vezes.

A Figura 75 mostra outro ponto da junta onde é possível visualizar a mudança de plano de propagação da trinca. Este fenômeno pode estar associado à uma região mais pobre em resina, fazendo com que a trinca encontre um caminho mais propício, que exige menos energia para sua propagação.

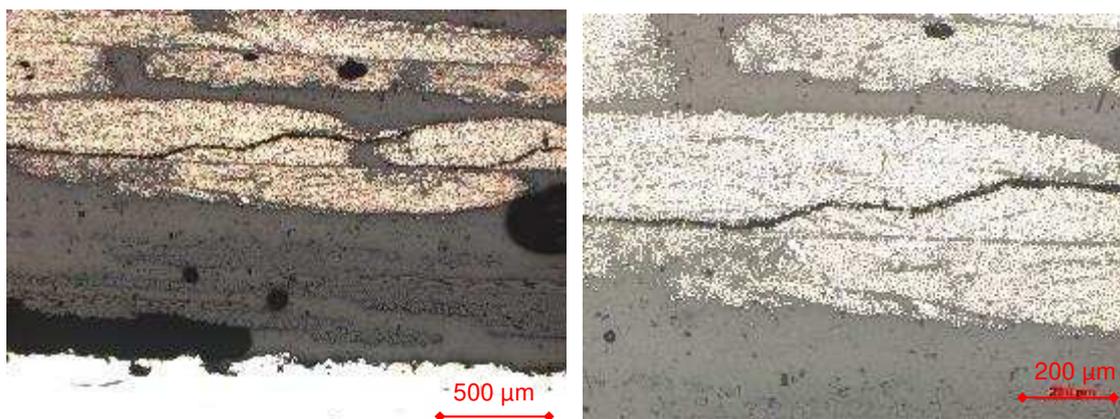


Figura 75: trinca em um corpo de prova novo após o teste de fadiga. Aumento de 50 vezes – lado esquerdo e aumento de 100 vezes - lado direito.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA SEGUNDA BATERIA DE TESTES

Nesta segunda etapa foram realizados testes com preparação de superfície por jateamento e máquina rotativa de impacto em chapas sem corrosão e com corrosão acentuada, em juntas novas e envelhecidas, como descrito no item 3.2.6. Também foram realizados testes na resina e nos laminados de fibra de vidro e fibra de carbono para determinação das propriedades mecânicas. Adicionalmente, corpos de prova de fibra de carbono foram submetidos ao envelhecimento em água e temperatura e a raios ultravioleta. Tendo em vista que foram utilizados métodos de preparação de superfície e perfil geométrico do substrato metálico diferentes, fez-se uma análise da superfície dos corpos de provas.

5.1. Análise de Superfície e Interface na Segunda Bateria de Testes

A Figura 76 mostra a superfície da placa de aço antes e depois do tratamento por máquina rotativa de impacto. Pode-se visualizar que a cerda da máquina foi capaz de atingir pites profundos. Esta superfície tratada é comparável ao padrão SSPC de limpeza metal quase branco (Sa 2 ½)-SP10/Nace#2 [111]. Uma desvantagem desta máquina é a baixa produtividade, que é de cerca de 1,5 m²/hora. Como resultado, esta máquina é recomendada para áreas pequenas, que são a maioria dos casos dos

reparos. Constatou-se que o uso repetido da ferramenta conduz inevitavelmente ao desgaste progressivo das pontas de cerdas, acompanhado por um desempenho reduzido da ferramenta, logo, o conjunto de cerdas deve ser substituído sempre que a rugosidade desejada não seja mais possível de ser obtida. STANGO e KARGOL [112] indicam que o perfil transmitido à superfície diminui progressivamente à medida que as ferramentas envelhecem ao longo de um ciclo de trabalho de uma hora. É importante mencionar que há uma distância ótima da ferramenta em relação ao substrato, em torno de 10 a 30 mm de distância da barra aceleradora em relação à superfície. Distâncias fora deste intervalo fornecerão valores de rugosidade inadequadas. Outro ponto que merece atenção é que durante a preparação de superfície, a aplicação da máquina deverá ser realizada em diferentes direções para que não seja criado um direção preferencial na superfície.

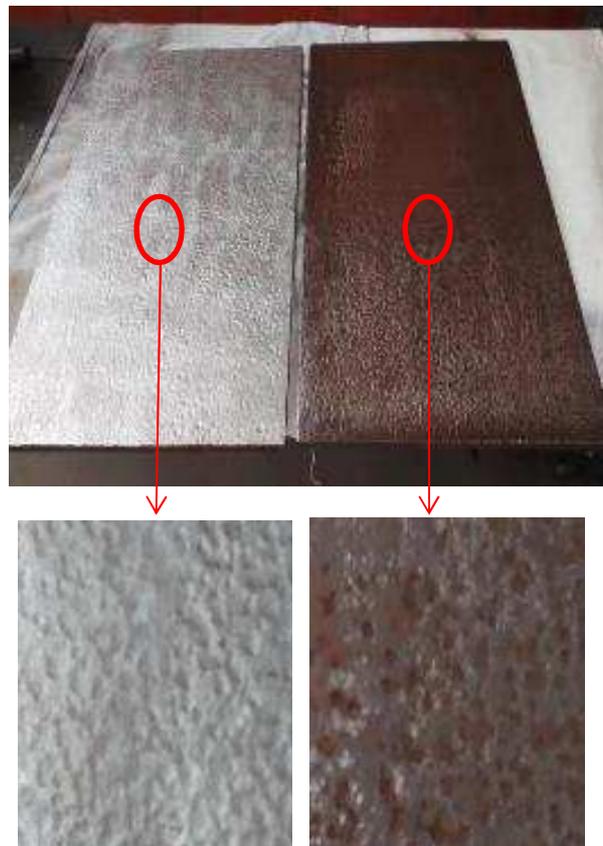


Figura 76: Placa corroída antes e após o tratamento pela máquina rotativa com impacto.

Um perfil tridimensional das placas de aço corroídas e não corroídas é mostrado na Figura 77. As imagens “a” e “b” referem-se à superfície antes do tratamento e de “c” a “f” referem-se a imagens após tratamento superficial.

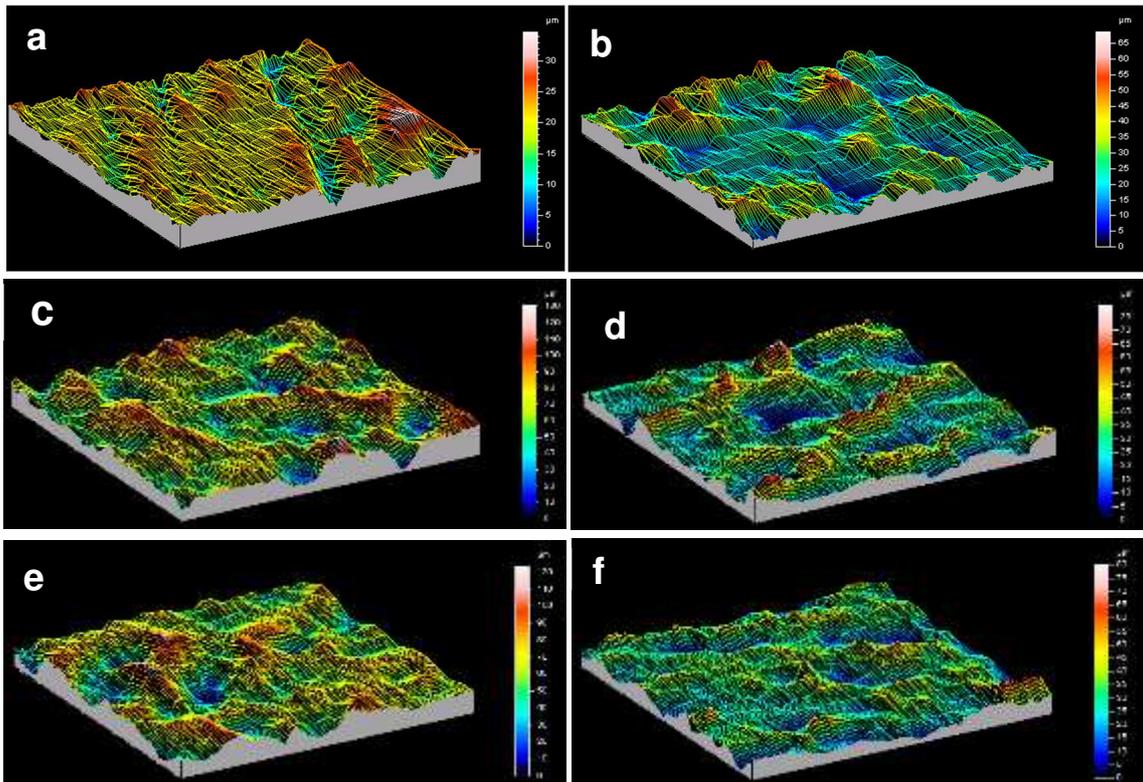


Figura 77: Imagens típicas das superfícies metálicas antes do tratamento: (a) Sem Corrosão, (b) Corroídas. Imagens típicas das superfícies metálicas após o tratamento: (c) Junta JSC, (d) Junta JC, (e) Junta MSC e (f) Junta MC.

A Tabela 9 mostra os parâmetros de rugosidade da superfície. Os valores foram obtidos de cinco pontos diferentes em placas de aço para cada condição.

Tabela 9: Valores dos Parâmetros de Rugosidade.

Superfície	Tipo de Junta	Sa (μm)	St (μm)	Ssk (Skew)
Antes do Tratamento	Sem Corrosão	$3,04 \pm 0,28$ (9,21%)	$34,7 \pm 2,35$ (6,77%)	$-0,551 \pm 0,023$ (4,17%)
	Corroída	$7,2 \pm 0,54$ (7,50%)	$68,7 \pm 2,78$ (4,05%)	$0,675 \pm 0,046$ (6,81%)
Após Tratamento	JSC	$15,39 \pm 0,71$ (4,61%)	$126,5 \pm 3,35$ (2,65%)	$0,135 \pm 0,012$ (8,89%)
	JC	$11,01 \pm 0,79$ (7,17%)	$73,82 \pm 4,85$ (6,57%)	$-0,318 \pm 0,013$ (4,09%)
	MSC	$15,26 \pm 1,81$ (11,86%)	$120,0 \pm 8,16$ (6,8%)	$0,065 \pm 0,009$ (13,84%)
	MC	$7,46 \pm 1,07$ (14,34%)	$78,83 \pm 8,39$ (10,64%)	$-0,389 \pm 0,028$ (7,20%)

Como discutido anteriormente, S_a expressa a média dos valores absolutos de $Z(x, y)$ (função que representa a altura da superfície em relação ao plano de montagem) na área medida. É um parâmetro 3D expandido do R_a (2D). S_t é também um parâmetro 3D expandido a partir do parâmetro de rugosidade R_t (2D). Representa a distância entre o pico mais alto e o vale mais baixo verificado para a área analisada. Os valores mais altos de S_t e S_a estão associados a uma forte presença de picos e vales pronunciados na superfície, o que contribui para o aumento da ancoragem mecânica em sistemas de colagem por adesivos [113].

Embora S_a e S_t sejam bastante úteis para quantificar a rugosidade, superfícies diferentes podem apresentar valores semelhantes para estes parâmetros [114]. Portanto, parâmetros complementares que são mais descritivos, como o parâmetro S_{sk} , que avalia a simetria do perfil do plano médio também foram avaliados. O parâmetro S_{sk} indica a natureza da superfície, ou seja, a presença predominante de picos, vales ou um equilíbrio de ambos [115].

Como pode ser visto a partir da Tabela 9, os resultados mostram valores inferiores dos parâmetros S_a e S_t para o substrato não corroído e corroído antes do tratamento. Os valores mais elevados para substratos sem tratamento corroídos em relação aos sem tratamento e sem corrosão podem ser atribuídos à presença de óxidos. Porém, estes óxidos devem ser removidos, tendo em vista que reduzem a aderência entre compósito e aço, pois estas camadas de produtos de corrosão possuem baixa adesão no aço [41, 116].

Os valores dos parâmetros S_a e S_t das juntas JSC e MSC são bastante próximos. O parâmetro S_t também foi próximo para os corpos de prova JC e MC, embora o termo S_a mostrou-se menor para a junta MC. Os valores de parâmetro S_{sk} mostraram muita dispersão, sendo os corpos de prova MC apresentando os valores mais baixos.

Os valores mais elevados de S_a e S_t observados para as superfícies tratadas e não corroídas em comparação com as corroídas podem ser atribuídos ao perfil plano da chapa não corroída, o que contribui para promover a rugosidade. Também pode ser observado que o tipo de tratamento de superfície não afeta os valores de S_t , o que significa que eles são determinados pela condição inicial do substrato. Por outro lado, os valores mais elevados de S_a para os corpos de prova JC em comparação com as juntas MC indicam que este parâmetro é sensível ao tipo de tratamento de superfície. Este resultado pode ter sido afetado pelo fato da operação da máquina ser manual. O jateamento é menos sensível ao procedimento de utilização.

Os valores positivos de S_{sk} para as juntas JSC e MSC indicam a predominância de picos na superfície, fato que favorece o intertravamento mecânico. Por outro lado, juntas JC e MC apresentaram valores negativos de S_{sk} , o que indica uma

predominância de vales e conseqüentemente uma superfície menos propensa ao intertravamento mecânico [115]. SAMPAIO *et al.* [21] relatam que superfícies com valores de S_{sk} negativos estão mais sujeitas à contaminação e de limpeza mais difícil. A reprodutibilidade dos resultados foi bastante satisfatória, dado o nível aceitável do desvio padrão verificado, de acordo com a norma ISO 4288 [99], que estabelece 16% como limite superior.

A Figura 78 mostra a imagem da superfície de duas juntas coladas, um sem corrosão no substrato metálico (lado esquerdo) e outra com corrosão (lado direito). A imagem mostra que a espessura da camada adesiva da junta corroída é superior ao da junta não corroída.

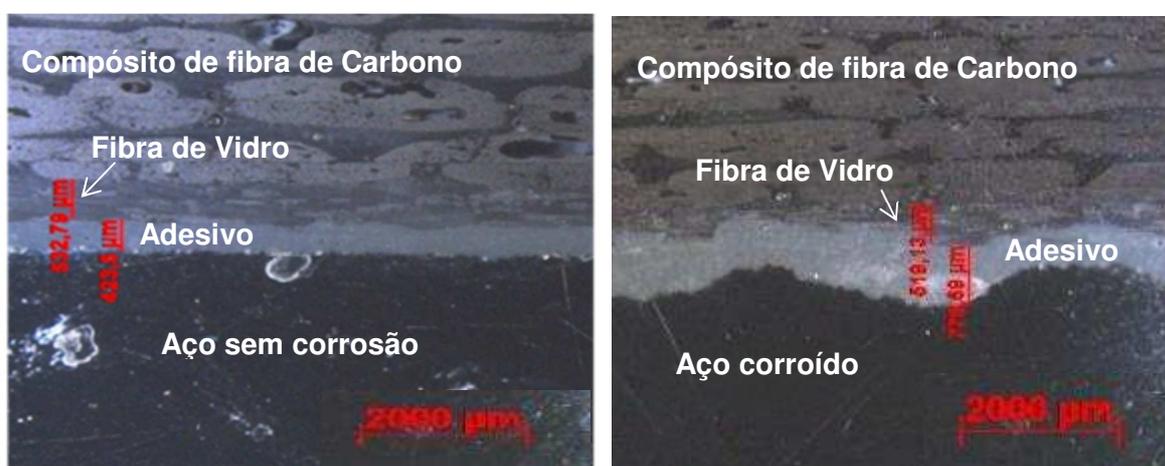


Figura 78: Imagem da interface de uma junta colada em aço sem corrosão e com corrosão.

5.2. Propriedades Mecânicas dos Materiais da Segunda Bateria de Testes

As propriedades mecânicas dos materiais utilizados na segunda bateria de testes foram obtidas da mesma forma que a primeira bateria de testes. O adesivo estrutural de enchimento e a resina de impregnação foram ensaiados conforme a norma ASTM D638 [97] e os compósitos de fibra de vidro e os compósitos de fibra de carbono foram testados conforme a norma ASTM D3039 [98]. A Tabela 10 mostra as propriedades mecânicas dos materiais utilizados na segunda bateria de testes, cujos valores são similares aos da primeira bateria de testes.

Tabela 10: Propriedades Mecânicas dos Materiais utilizados na Segunda Bateria de Teste.

Material	E (GPa)	LR (MPa)	ν_{12}	ϵ (max %)
Adesivo Estrutural	$2,82 \pm 0,23$	$19 \pm 2,45$	$0,29 \pm 0,04$	$0,9 \pm 0,03$
Resina de Impregnação	$3,92 \pm 0,28$	$47 \pm 5,09$	$0,35 \pm 0,02$	$2,4 \pm 0,15$
Tecido de Fibra de Vidro	$7,4 \pm 0,59$	$68 \pm 7,61$	$0,31 \pm 0,03$	$2,8 \pm 0,18$
Compósito de Fibra de Carbono $\pm 45^\circ$	$12 \pm 0,25$	$253 \pm 31,50$	$0,27 \pm 0,04$	$3,2 \pm 0,53$
Compósito de Fibra de Carbono $0/90^\circ$	$47 \pm 3,48$	$649 \pm 37,25$	$0,06 \pm 0,002$	$1,4 \pm 0,32$

E, Módulo de Elasticidade; LR, Limite de Resistência; ν_{12} , Coeficiente de poisson; ϵ , Deformação.

5.3. Avaliação da Degradação do Compósito de Fibra de Carbono

Esta parte do trabalho foi idealizada a partir da necessidade de avaliar o comportamento do compósito de fibra de carbono submetido ao envelhecimento na presença de água e a raios ultravioleta.

Ensaio acelerados podem ser usados para obter informações sobre o tempo de vida útil de um material. Estes ensaios são aplicados para extrapolação de propriedades em condições de interesse a partir do comportamento dos materiais testados em temperaturas mais extremas. Procedimentos experimentais baseados nos conhecidos modelos cinéticos, por exemplo, modelo de previsão de vida útil de Arrhenius, permitem caracterizar esta equivalência entre tempo e temperatura. Em outras palavras, permite estabelecer uma lei de mudança das propriedades do material em relação a estes parâmetros. Os valores das propriedades resultantes podem ser estimados muito acima da escala de tempo experimentalmente acessível. A escolha das temperaturas e o intervalo entre cada são determinadas passo a passo, comparando os resultados com o modelo [117].

É importante que a temperatura máxima na matriz polimérica do compósito esteja abaixo da temperatura de transição vítrea (T_g) para que não ocorram

transformações térmicas no polímero. Logo, um ensaio de DMA (*Dynamic Mechanical Analysis*) foi realizado no material compósito de fibra de carbono, conforme mostra a Figura 79, cujo valor obtido de Tg foi de 116,02°C, considerando o valor mais conservador, que é a medida da Tg a partir do módulo de armazenamento. A literatura [118] recomenda que um reparo por material compósito seja empregado pelo menos 30°C abaixo da Tg. Então, a máxima temperatura definida para a degradação do compósito de fibra de carbono foi de 80°C.

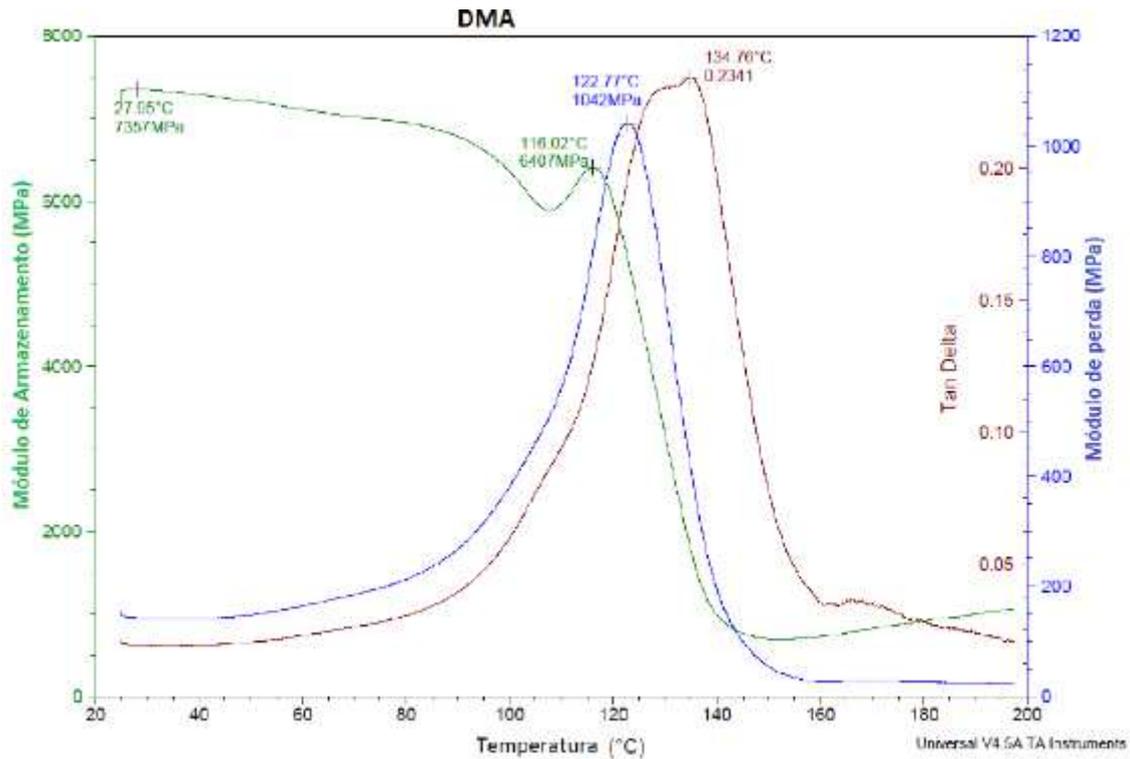


Figura 79: Temperatura de transição vítrea (Tg) do compósito de fibra de carbono (resina Pipefix).

A Figura 80 mostra a variação mássica do compósito de fibra de carbono. A saturação é alcançada quando não é mais observado variação mássica dos corpos de prova, o que ocorreu em valor de 2,5% de ganho de massa.

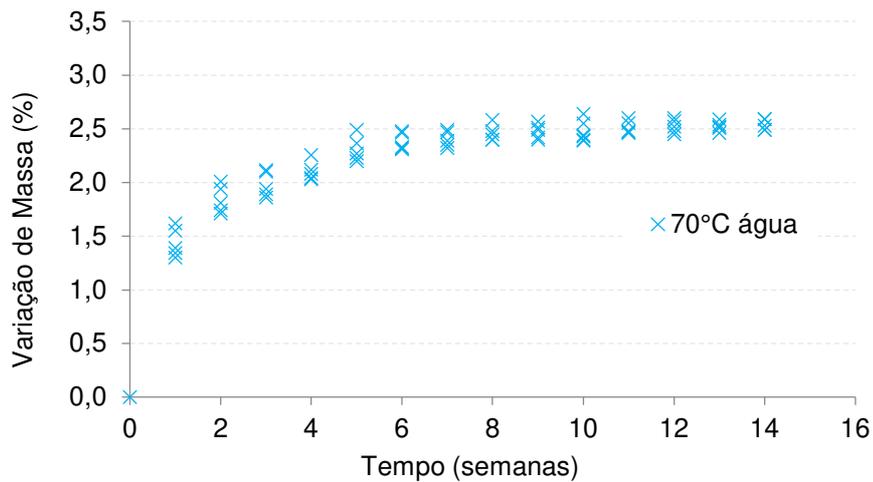


Figura 80: Saturação dos corpos de prova de compósito de fibra de carbono.

Foram realizadas medidas do módulo de elasticidade de acordo com a norma ASTM D3039 [98]. A aplicação do modelo de Arrhenius para predição de vida útil não pôde ser realizada devido à não observância de variação nas propriedades nas condições estudadas.

Como podem ser observados na Figura 81, os valores de módulo para o material envelhecido a 50, 60, 70 e 80°C não apresentaram uma tendência de redução do módulo de elasticidade em função do aumento da temperatura e do tempo. Como o modelo de Arrhenius prevê que a variação de uma determinada propriedade seja proporcional ao aumento da temperatura e que um critério de falha para esta propriedade seja atingido [117], os resultados obtidos não permitiram a aplicação do modelo.

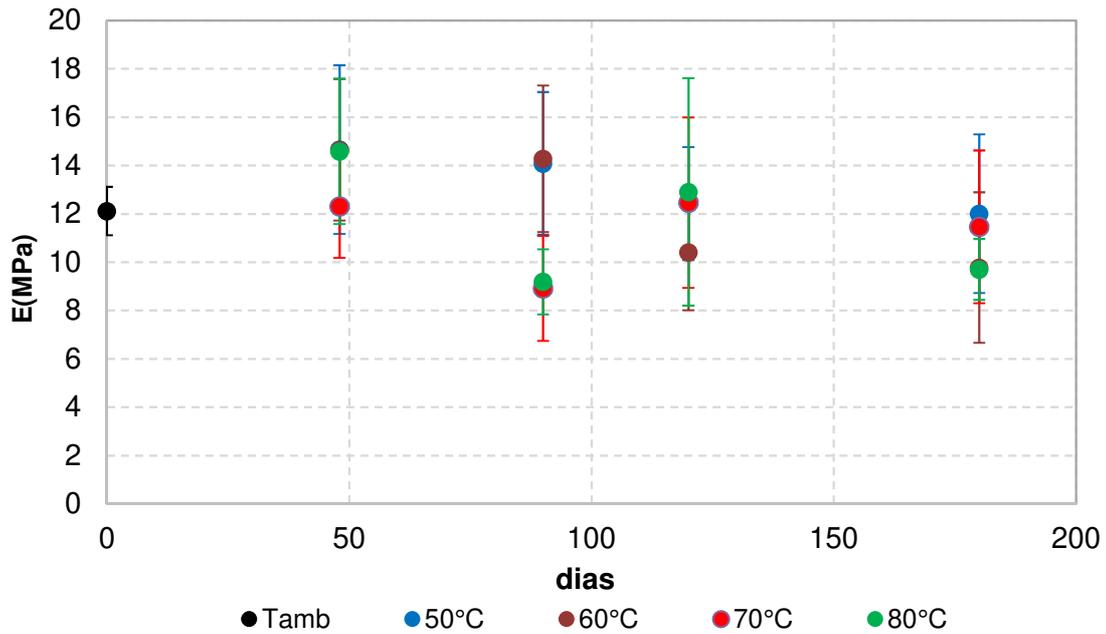


Figura 81: Avaliação do módulo de elasticidade em diferentes tempos e temperatura.

A Figura 82 mostra uma comparação entre o módulo de elasticidade dos compósitos de fibra de carbono antes e depois da degradação UV. É possível observar que não houve mudança no módulo de elasticidade.

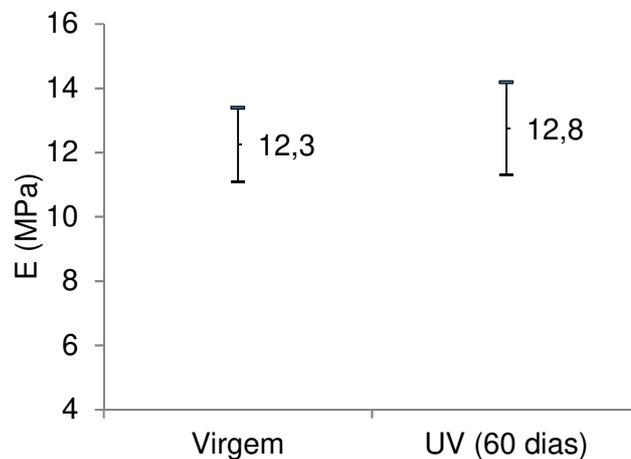


Figura 82: Módulo de elasticidade antes da exposição UV e após 60 dias em UV.

Os resultados de degradação em água em diferentes temperaturas e da degradação UV mostram que o compósito de fibra de carbono não é o componente crítico da junta colada com propensão a falhar devido às intempéries. Logo, a atenção precisa estar na interface. Este fato tem sido verificado nos reparos por compósitos

utilizados nas unidades operacionais na indústria de óleo e gás, conforme mostrado anteriormente por meio das imagens de reparos de campo (Figura 24).

5.4. Avaliação das Juntas Coladas da Segunda Bateria de Testes após Exposição em Névoa Salina

A Figura 83 exibe as juntas coladas dentro da câmara de névoa salina após 6 meses de degradação. Neste momento é possível observar a formação de óxido na região da interface. Nesta etapa não foi realizada retirada de corpo de prova para teste.



Figura 83: Juntas coladas da segunda bateria de testes após 6 meses na névoa salina.

A Figura 84 exibe as juntas coladas dentro da câmara de névoa salina após 12 meses de envelhecimento. Neste momento é possível observar o aumento da formação de óxido na região da interface. Nesta fase, foram retirados alguns corpos de prova para testes estáticos e dinâmicos.

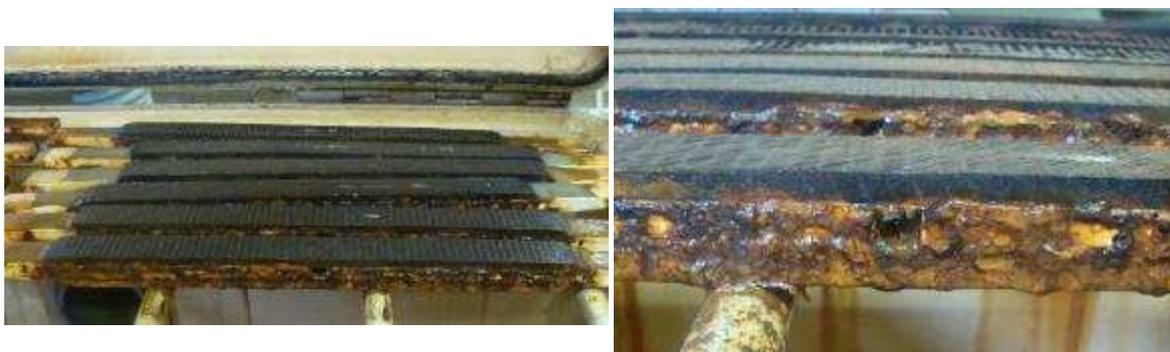


Figura 84: Juntas coladas da segunda bateria de testes após 12 meses na névoa salina.

A Figura 85 exibe as juntas coladas dentro da câmara de névoa salina após 18 meses de degradação. Neste momento é possível observar grande quantidade de produtos de corrosão na região da interface e ao redor de toda junta colada.



Figura 85: Juntas coladas da segunda bateria de testes após 18 meses na névoa salina.

Tendo em vista que o foco principal foi a interface, os corpos de prova não foram submetidos a raios ultra violetas, pois estes não alcançariam tal região.

5.5. Ensaio Estático em Juntas Coladas da Segunda Bateria de Testes

Foram testados cinco corpos de prova de cada grupo de juntas de compósito/aço em carga de tração monotônica e uma curva típica para cada tratamento de superfície é mostrada na Figura 86. Como pode ser visto, a resposta da carga por deslocamento é elástica e linear em cargas até aproximadamente 300 N/mm. Depois disso, observa-se uma curva não linear para todos os corpos de prova independentes do tratamento de superfície. Quando o deslocamento atinge cerca de 1 mm, observam-se os primeiros eventos de dano. A partir deste ponto, a carga não se eleva e os danos sucessivos são observados até a completa falha. A plasticidade pode ser vista entre 1 a 3 milímetros aproximadamente, proporcionando grande parte da capacidade de carga da junta colada e deve ser levada em consideração no projeto da junta. Deve-se ressaltar que quanto maior a sobreposição, maior é a zona plástica. Quando uma tensão crítica é atingida na interface, a fratura final é observada.

Este comportamento denota fratura estável e explica por que a força máxima das juntas coladas é independente do comprimento de ancoragem em sobreposições suficientemente longas. A existência de tal patamar de força, ilustrada na Figura 86 foi confirmada por outros autores [57, 60, 119]. CROCOMBE [120] apresentou o conceito de escoamento global e mostrou que a concentração de tensão é suavizado pela plasticidade e a falha ocorre quando toda região da interface adesiva está sob escoamento.

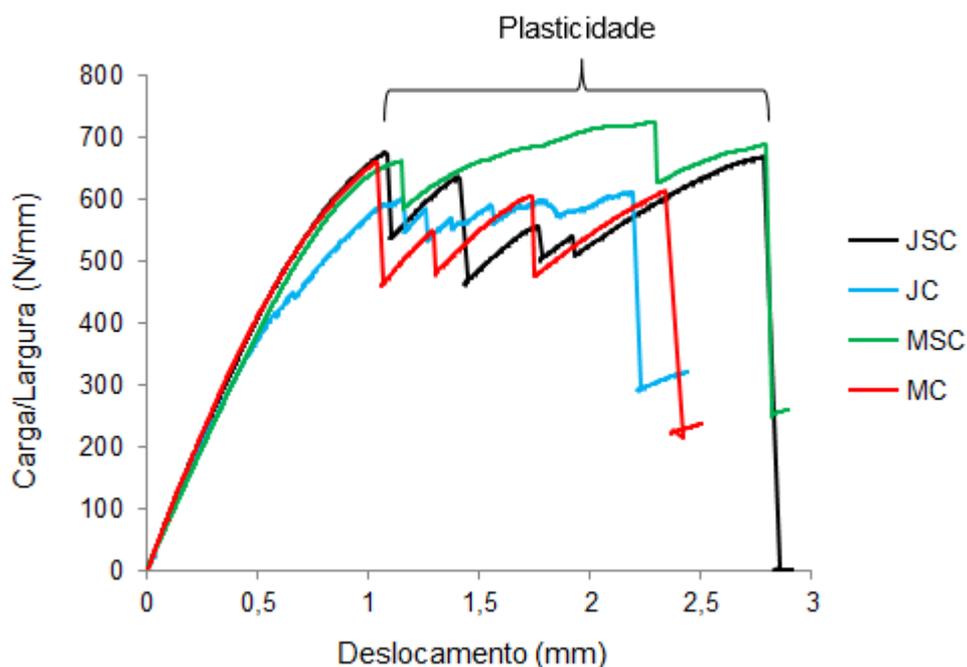


Figura 86: Curvas de testes estáticos - carga por comprimento (N/mm).

A Figura 87 mostra a carga máxima de falha por unidade de largura para cada tratamento de superfície, considerando a área efetiva de colagem após envelhecimento. Juntas do tipo JSC e MSC possuem resultados muito próximos e também, da mesma forma, as juntas JC e MC. Por outro lado, as juntas JSC e MSC apresentam resistência maior em comparação com JC e MC. Os resultados indicam que a resistência da junta colada é afetada pelo perfil geométrico da superfície metálica causada pela corrosão.

Observa-se uma queda na resistência das juntas coladas JC e MC após o período de 12 meses de envelhecimento na névoa salina. Os corpos de prova envelhecidos que utilizaram chapa metálica sem corrosão, juntas JSC e MSC, apresentaram valores semelhantes em relação aos corpos de prova sem degradação. Uma queda na resistência da ordem de 9% foi constatada nos corpos de prova envelhecidos que utilizaram chapa corroída na fabricação das juntas JC e MC. É possível concluir pelos resultados que o tipo de tratamento superficial, seja por

jateamento ou por máquina rotativa de impacto, não exerceu influência no nível de degradação das juntas coladas. Os resultados estão em consonância com os valores dos parâmetros de rugosidade encontrados na análise superficial, mostrados na Tabela 9. Os valores de S_a e S_t das Juntas em chapas sem corrosão JSC e MSC são maiores que os das juntas corroídas JC e MC.

Os valores reduzidos de resistência à ruptura para as juntas coladas corroídas podem estar relacionados à interação entre o adesivo e a superfície de aço altamente corroída. A complexa forma geométrica, promovida pelos alvéolos e pites nas chapas metálicas com processo corrosivo intenso pode dificultar a adesão na interface e também tensões mais complexas podem se desenvolver em função da geometria irregular da superfície. Além disso, a camada adesiva mais espessa, devido à presença dos vales (alvéolos e pites), na chapa de aço corroída pode ter afetado a força de adesão. Essa espessura mais elevada foi mostrada anteriormente na Figura 78. Alguns pesquisadores [34, 121, 122] mostraram que a resistência de uma junta colada aumenta à medida que a camada adesiva se torna mais fina, até um valor mínimo. Quando a camada adesiva é inferior a um valor ótimo, pode restringir o volume total da zona plástica que se desenvolve na camada adesiva à frente da ponta da trinca, diminuindo a resistência à fratura da junta [123].

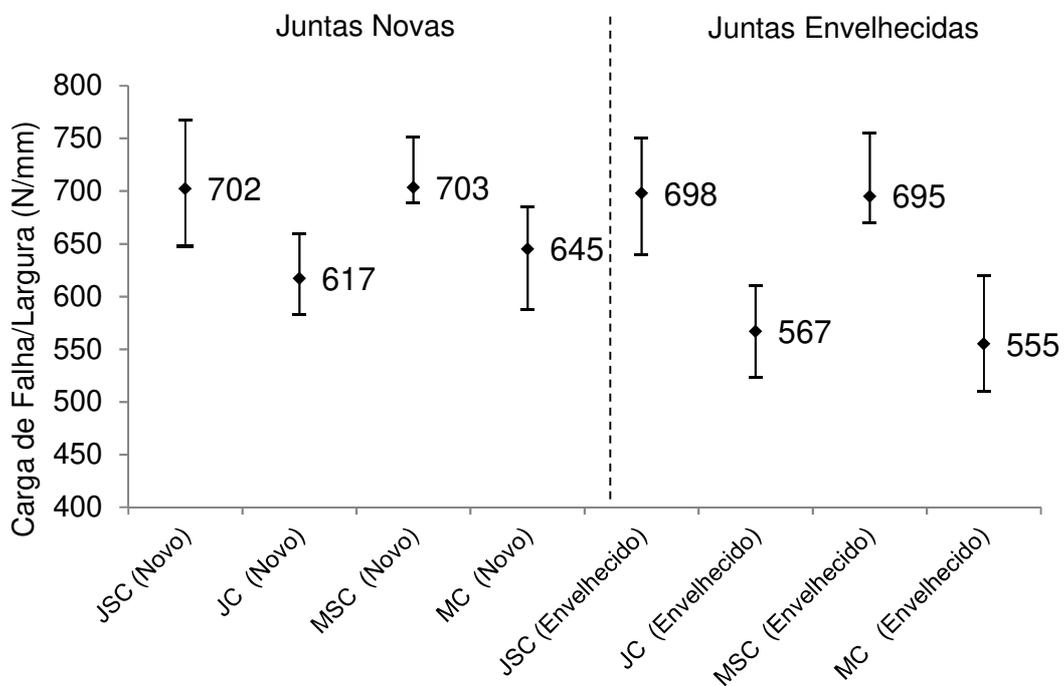


Figura 87: Resistência ao carregamento estático das juntas coladas antes (novo) e após envelhecimento de 12 meses em névoa salina.

Vale destacar que os valores de resistência estática das juntas coladas tratadas com jateamento em chapas sem corrosão da primeira bateria de testes foram superiores aos da segunda bateria de testes. Para as juntas sem envelhecimento foi obtido o valor de 736 N/mm na primeira etapa e na segunda fase, o valor encontrado foi de 702 N/mm. Para as juntas com envelhecimento, a diferença foi maior, sendo 830 N/mm na primeira bateria de testes e 698 N/mm na segunda. Este fato pode estar relacionado por terem sido utilizados resinas de impregnação no tecido de fibra de carbono diferentes.

5.6. Ensaio Dinâmico em Juntas Coladas da Segunda Bateria de Testes

A Tabela 11 mostra a carga mínima e máxima na ciclagem e o número de ciclos até a falha de corpos de prova novos e a Tabela 12 descreve os dados dos corpos de prova envelhecidos por 12 meses. Foram aplicadas três variações de carga nas amostras, 7 a 70%, 6 a 60% e 5 a 50% em relação à resistência estática final relativo aos corpos de prova novos e envelhecidos. A quarta variação de carga foi estabelecida para obter 10 milhões de ciclos sem falha.

Tabela 11. Carga mínima, máxima e número de ciclos até a falha de corpos de prova novos.

Tipo de junta	Carga Mínima (KN) / (%)	Carga Máxima (KN) / (%)	Ciclos até a Falha – Cp's Novos
JSC01	0,97 (3%)	9,7 (30%)	10 ⁷ (*)
JSC02	1,62 (5%)	16,2 (50 %)	1.106.954
JSC03	1,94 (6%)	19,4 (60%)	250.000
JSC04	2,26 (7%)	22,6 (70%)	27.720
JC01	0,78 (2,67%)	7,8 (26,7%)	10 ⁷ (*)
JC02	1,46 (5%)	14,6 (50%)	752.332
JC03	1,75 (6%)	17,5 (60%)	60.408
JC04	2,04 (7%)	20,4 (70%)	13.578
MSC01	1,07 (3,11%)	10,7 (31,1%)	10 ⁷ (*)
MSC02	1,72 (5%)	17,2 (50%)	952.121
MSC03	2,07 (6%)	20,7 (60%)	272.881

MSC04	2,41 (7%)	24,1 (70%)	39.972
MC01	0,75 (2,55 %)	7,5 (25,5%)	10 ⁷ (*)
MC02	1,47 (5%)	14,7 (50%)	655.200
MC03	1,76 (6%)	17,6 (60%)	44.460
MC04	2,06 (7%)	20,6 (70%)	9.938

Tabela 12: Carga mínima, máxima e número de ciclos até a falha de corpos de prova envelhecidos.

Tipo de junta	Carga Mínima (KN) / (%)	Carga Máxima (KN) / (%)	Ciclos até a falha – Cp's Novos
JSC01	0,647 (2,4%)	6,47 (24%)	10 ⁷ (*)
JSC02	1,34 (5%)	13,4 (50 %)	167.854
JSC03	1,61 (6%)	16,1 (60%)	32.986
JSC04	1,88 (7%)	18,8 (70%)	2.134
JC01	0,359 (1,6%)	3,59 (16%)	10 ⁷ (*)
JC02	1,15 (5%)	11,5 (50%)	34.677
JC03	1,38 (6%)	13,8 (60%)	8.734
JC04	1,61 (7%)	16,1 (70%)	345
MSC01	0,727 (2,75%)	7,27 (27,5%)	10 ⁷ (*)
MSC02	1,32 (5%)	13,2 (50%)	175.643
MSC03	1,58 (6%)	15,8 (60%)	43.567
MSC04	1,85 (7%)	18,5 (70%)	3.543
MC01	0,359 (1,6%)	3,59 (16%)	10 ⁷ (*)
MC02	1,15 (5%)	11,5 (50%)	37.867
MC03	1,38 (6%)	13,8 (60%)	10.102
MC04	1,61 (7%)	16,1 (70%)	525

A partir dos resultados mostrados na Tabela 11 e na Tabela 12 e com auxílio do método dos mínimos quadrados, foi obtida uma curva de fadiga para cada grupo de juntas, como mostrado na Figura 88. As curvas são baseadas no modelo estabelecido pelo diagrama DF-N, consistindo em um gráfico log-log da variação percentual de carga em relação ao número de ciclos até a falha. Pode ser destacado que as juntas JSC e

MSC, que receberam tratamento de superfície em placas de aço não corroídas, têm uma vida à fadiga mais longa em comparação com as juntas JC e MC, que foram tratadas em placas corroídas.

A Figura 88 também mostra a carga limiar (*threshold*) em relação à resistência estática final. Os valores mais baixos para os corpos de prova corroídos podem ser atribuídos à interação entre o adesivo e a superfície de aço altamente corroída. Além disso, uma maior espessura de adesivo poderia ter diminuído a força de adesão. A literatura [124] informa que quanto mais espessa a camada adesiva, maior a probabilidade de defeitos na interface, como vazios e microfissuras, o que diminui a vida de fadiga da junta. Pode ser visto a partir dos resultados que a preparação da superfície com máquina rotativa de impacto é comparável ao jateamento.

Os valores de limiar de fadiga para as juntas sem corrosão e sem envelhecimento (30% para jateamento e 31,1% para máquina rotativa de impacto) estão dentro do intervalo relatado na literatura por DENG e LEE [76] que encontraram um limite de fadiga de cerca de 30% da carga máxima de falha em testes estáticos em vigas metálicas de pequena escala, reparados com compósito de fibra de carbono. COLOMBI *et al.* [3] e BOCCIARELLI *et al.* [40] encontram um limite de fadiga cerca de 30% nas juntas coladas compósito/aço.

É importante observar que os valores encontrados na juntas coladas da segunda bateria de testes estão próximos aos obtidos na primeira bateria de testes, sendo 30% e 31,1% para a segunda e 33% na primeira, sem envelhecimento. Este fato mostra que a mudança na resina não promoveu alteração no comportamento da vida à fadiga.

De maneira análoga, ainda na Figura 88, tem-se a curva de fadiga dos corpos de prova envelhecidos, a partir dos resultados mostrados na Tabela 12. Observa-se uma queda nas curvas de vida de todas as juntas, porém os valores de limiar de fadiga estão próximos, à exceção das juntas coladas em chapas corroídas envelhecidas, as quais apresentaram queda no limiar de fadiga mais acentuado. É também possível observar que não há diferença entre o tipo de tratamento de superfície, conforme obtido nas juntas sem envelhecimento.

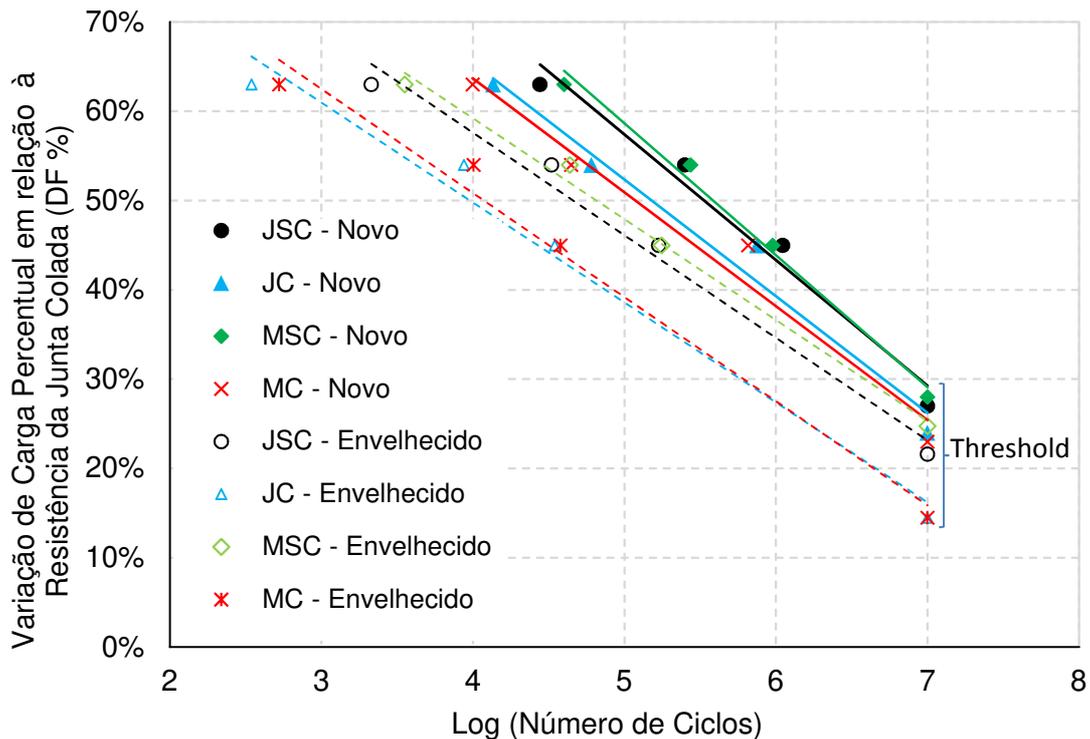


Figura 88: Curva de vida à fadiga de todos os tipos de juntas coladas, novas e envelhecidas na névoa salina por 12 meses.

Os resultados mostraram uma queda na vida à fadiga após o envelhecimento das juntas por 12 meses em névoa salina, porém, nota-se uma diminuição mais significativa nas juntas corroídas envelhecidas, para ambos os tratamentos de superfície. Da mesma forma que não se observou diferença de vida à fadiga entre os tratamentos de superfície nos corpos de prova novos, também não se identificou diferença entre as juntas envelhecidas. As curvas obtidas na Figura 88 podem ser escritas no formato da Equação 5.

$$DF(\%) = -m \log N + B \quad (5)$$

Sabendo-se que $\ln(N) = 2,3 \log N$, tem-se a Equação 6:

$$N = e^{2,3 \left(\frac{B - DF(\%)}{m} \right)} \quad (6)$$

Sendo m e B parâmetros dependentes da junta colada e da degradação, N o número de ciclos até a falha e $DF(\%)$ a variação percentual de carga em relação a falha estática na ciclagem. A Tabela 13 mostra os valores obtidos de m e B para todos tipos de juntas e a equação característica, assim como os valores de ajuste R^2 .

Tabela 13: Valores dos parâmetros m e B e equação do N de cada junta.

Tipo de junta	Condição	m	B	Equação (Número de Ciclos até a falha)	R ²
JSC	Nova	0,1407	1,2774	$N_{JSC_Novo} = e^{2,3\left(\frac{1,2774-DF(\%)}{0,1407}\right)}$	0,9715
JC	Nova	0,1306	1,1766	$N_{JC_Novo} = e^{2,3\left(\frac{1,1766-DF(\%)}{0,1306}\right)}$	0,9717
MSC	Nova	0,1477	1,325	$N_{MSC_Novo} = e^{2,3\left(\frac{1,325-DF(\%)}{0,1477}\right)}$	0,9889
MC	Nova	0,1274	1,1462	$N_{MC_Novo} = e^{2,3\left(\frac{1,1462-DF(\%)}{0,1274}\right)}$	0,9677
JSC	Envelhecida	0,1149	1,0356	$N_{JSC_Env.} = e^{2,3\left(\frac{1,0356-DF(\%)}{0,1149}\right)}$	0,9838
JC	Envelhecida	0,1119	0,9455	$N_{JC_Env.} = e^{2,3\left(\frac{0,9455-DF(\%)}{0,1119}\right)}$	0,9797
MSC	Envelhecida	0,113	1,044	$N_{MSC_Env.} = e^{2,3\left(\frac{1,044-DF(\%)}{0,113}\right)}$	0,9924
MC	Envelhecida	0,1166	0,9748	$N_{MC_Env.} = e^{2,3\left(\frac{0,9748-DF(\%)}{0,1166}\right)}$	0,9845

5.7. Análise da Propagação do Descolamento por Fadiga

O crescimento do dano na interface durante os testes de fadiga foi medido por meio de um paquímetro digital durante a ciclagem de carga até próximo à ruptura. Cada junta possuía quatro propagações de descolamento, duas abaixo e duas acima do plano médio. A Figura 89 mostra o descolamento a partir da interface inferior e superior. As laterais das juntas foram pintadas de branco de maneira a tornar o comprimento dos defeitos mais visíveis e facilitar o acompanhamento da propagação. Esta medição foi igual ao procedimento utilizado na primeira bateria de testes.

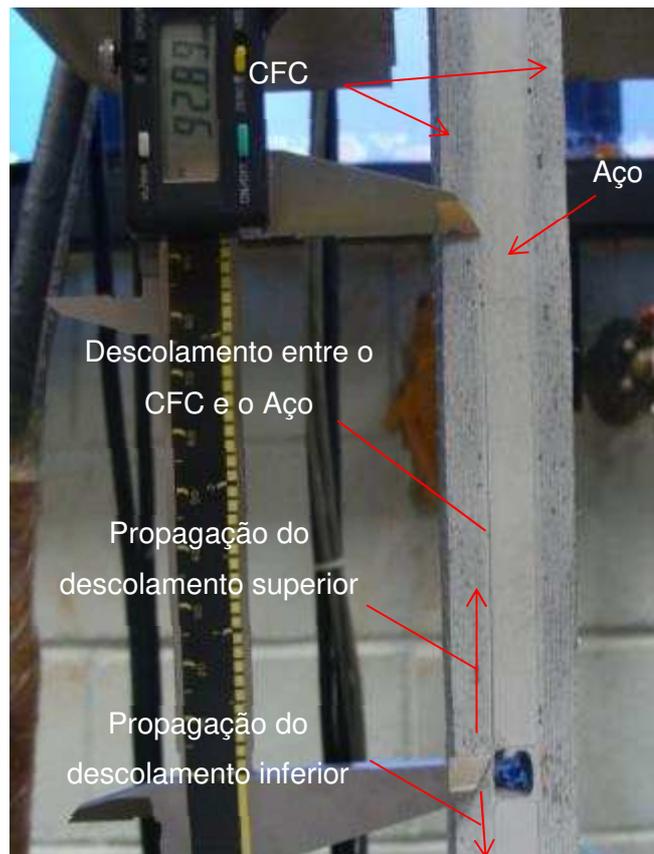


Figura 89: Propagação do descolamento na interface

Um perfil típico de propagação de descolamento em função do número de ciclos é exibido na Figura 90. O exemplo mostrado é para a amostra JSC02, com intervalo de carga entre 5% e 50% da resistência estática, onde a falha ocorreu em 1.106.954 ciclos. Pode-se ver que a propagação do dano ocorre a taxas diferentes. A propagação é lenta no início até cerca de 150.000 ciclos. Então, torna-se mais rápida até 300.000 ciclos. Depois disso, uma inclinação constante na região intermediária até 960.000 ciclos, onde é observada uma propagação mais lenta de evolução do dano, seguida de um processo de descolamento de maior velocidade até a falha em 1.106.954 ciclos. Este perfil de comportamento foi observado para todos os corpos de prova.

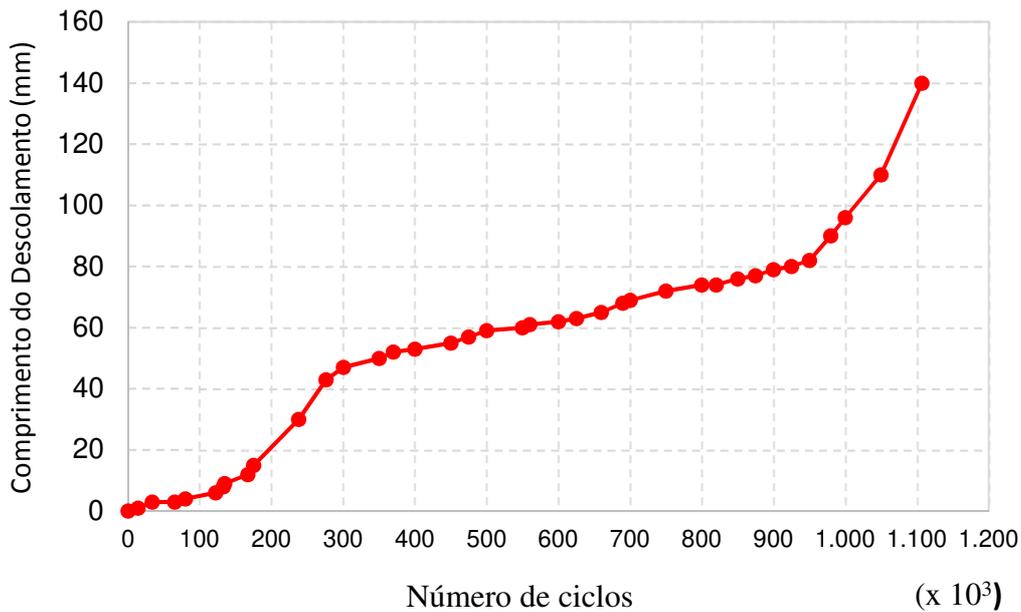


Figura 90: Crescimento de descolamento por fadiga – Junta JSC02.

Uma metodologia alternativa para estabelecer o início e o crescimento do descolamento nas juntas adesivas é a mecânica da fratura, utilizando a abordagem energética de Griffith. O parâmetro de taxa de liberação de energia de deformação G , introduzido pela primeira vez em adesivos por MOSTOVOY *et al.* [124] pode ser correlacionado com o crescimento de uma trinca de fadiga (descolamento) em adesivos sob carga cíclica. A resistência da junta é controlada pela presença de defeitos de fabricação da junta adesiva, tais como bolhas, partículas estranhas e áreas não ligadas ou fracamente ligadas.

A evolução do dano foi considerada por meio do critério de energia de deformação, de acordo com uma equação simplificada mostrada no item D300, seção 6, da Prática Recomendada DNV C-301 [102]. A taxa máxima de liberação de energia de tensão elástica " G_{Max} " de um descolamento que começa na região central do corpo de prova pode ser aproximada pela Equação 7.

$$G_{Max} = \frac{2 \cdot f_{max}^2}{3} \frac{K_{aço}}{K_{comp} \cdot (K_{aço} + K_{comp})} \quad (7)$$

Onde:

$$f_{max} = \frac{F_m}{2w} \quad K_{aço} = E_{aço} \cdot t_{aço} \quad K_{comp} = E_{comp} \cdot t_{comp}$$

$E_{aço}$ = Módulo de elasticidade do aço

E_{comp} = Módulo de elasticidade do compósito de fibra de carbono

$t_{aço}$ = Espessura do substrato metálico

t_{comp} = Espessura do compósito de fibra de carbono

f_m = Carga máxima por unidade de comprimento

F_m = Carga máxima durante a ciclagem de fadiga

w = Largura da junta

Os resultados dos testes de fadiga das juntas novas são mostrados na Figura 91, sob a forma de diagramas log-log de G_{max} por taxa de propagação da/dN (lei de Paris) [125]. A taxa de propagação de descolamento (da/dN) foi calculada pelo método secante de acordo com a norma ASTM E647 [126] onde é avaliado um número discreto de medidas da variação do comprimento do descolamento em função do número de ciclos.

Os resultados experimentais mostram que o comportamento à fadiga das juntas são similares na parte superior da curva, onde a variação de carga é alta e a taxa de propagação de descolamento é extremamente rápida, variando de 10^{-3} a 10^{-2} mm/ciclo. Por outro lado, à medida que a variação de carga diminui, a taxa de evolução do dano varia, conforme evidenciado na parte inferior do gráfico. Pode ser visto que, para uma taxa de propagação de descolamento em torno de 10^{-6} mm/ciclo, G_{max} torna-se diferente, onde os valores mais altos são encontrados para o substrato não corroído.

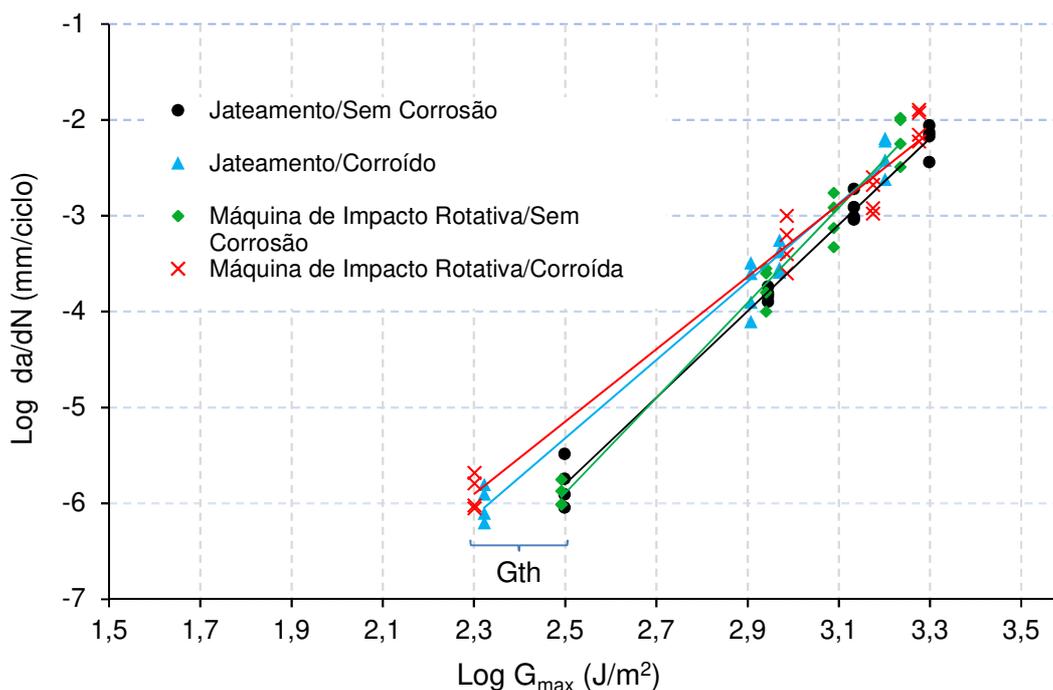


Figura 91: Taxa de crescimento do descolamento por taxa de liberação de energia das juntas novas.

Tendo em vista que a taxa de propagação de evolução do descolamento é extremamente pequena, um nanômetro por ciclo, onde $\text{Log}(da/dN) = -6$, conforme pode ser visto na Figura 91, o valor de G neste ponto foi assumido como um limiar de fadiga (*threshold*) para as juntas e praticamente não há crescimento de dano devido à fadiga. Neste ponto, G pode ser considerado G_{th} , considerado o limiar de fadiga.

Embora as juntas apresentem uma taxa de liberação de energia de deformação diferente, como observado na parte inferior do gráfico, a diferença entre a mínima (junta MC), $\text{Log}(G_{th}) = 2,23 \text{ J/m}^2$ e a máxima (junta JSC), $\text{Log}(G_{th}) = 2,48 \text{ J/m}^2$, não é tão elevada. Além disso, os resultados são semelhantes aos relatados na literatura por MENICONI *et al.* [6] ($\text{Log}(G_{th}) = 2,45 \text{ J/m}^2$ para juntas CFC/aço e ZHANG *et al.* [2] que testou o compósito reforçado com fibra de vidro pultrudada e encontrou $\text{Log}(G_{th}) = 1,93 \text{ J/m}^2$).

Deve-se notar que os testes foram realizados com uma razão de carregamento igual a 0,1. O trabalho experimental de ALLEGRI *et al.* [127] indica que à medida que a razão de carga aumenta, o valor do limiar de fadiga diminui.

A Figura 92 mostra o resultado dos testes de fadiga das juntas coladas envelhecidas após 12 meses na névoa salina, juntamente com as juntas novas. Os resultados indicam uma queda da vida à fadiga dos corpos de prova envelhecidos. Da mesma forma que os ensaios estáticos, observa-se uma queda mais acentuada nos

corpos de prova que utilizaram chapas corroídas para a fabricação das juntas coladas. Conclui-se, também, que o tratamento superficial não indicou influência nos resultados.

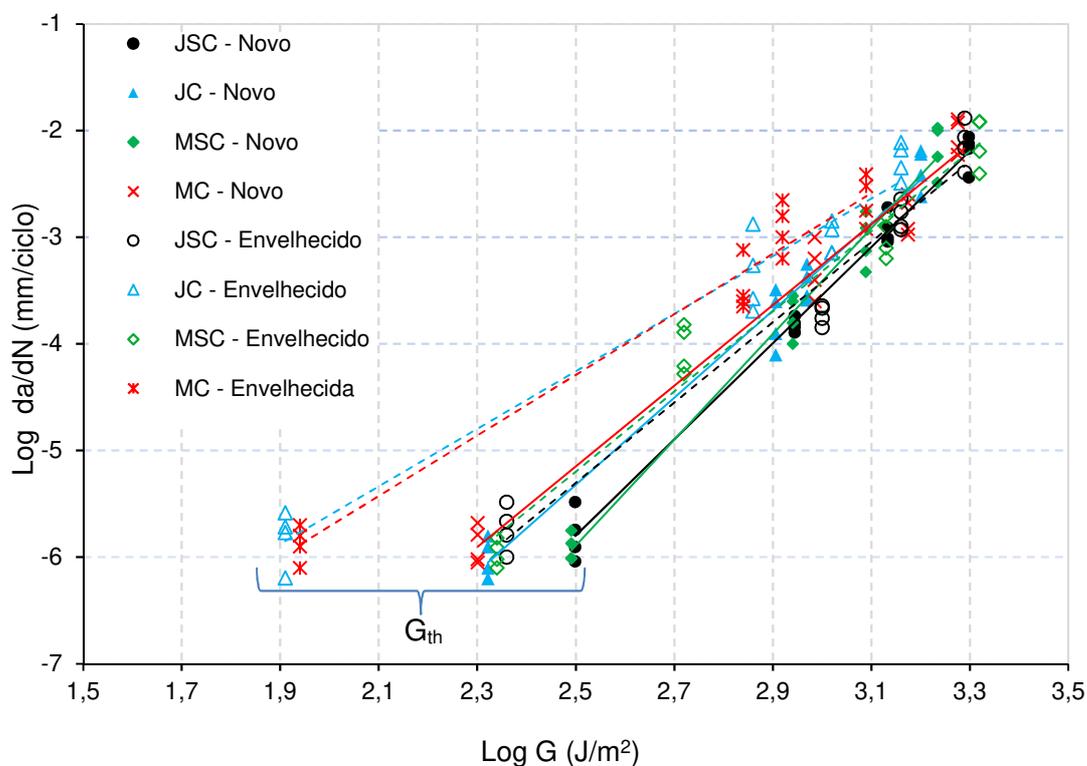


Figura 92: Taxa de crescimento do descolamento por taxa de liberação de energia das juntas novas e envelhecidas.

Os valores de G_{th} apresentaram pequena queda após o envelhecimento e podem ser melhor comparados na Figura 93. É também possível notar que a redução é mais significativa para as juntas coladas com substrato metálico corroído.

Em função dos resultados encontrados, sugere-se que seja utilizado um fator de segurança maior no projeto de reparo em regiões com corrosão externa, onde o perfil geométrico é mais complexo.

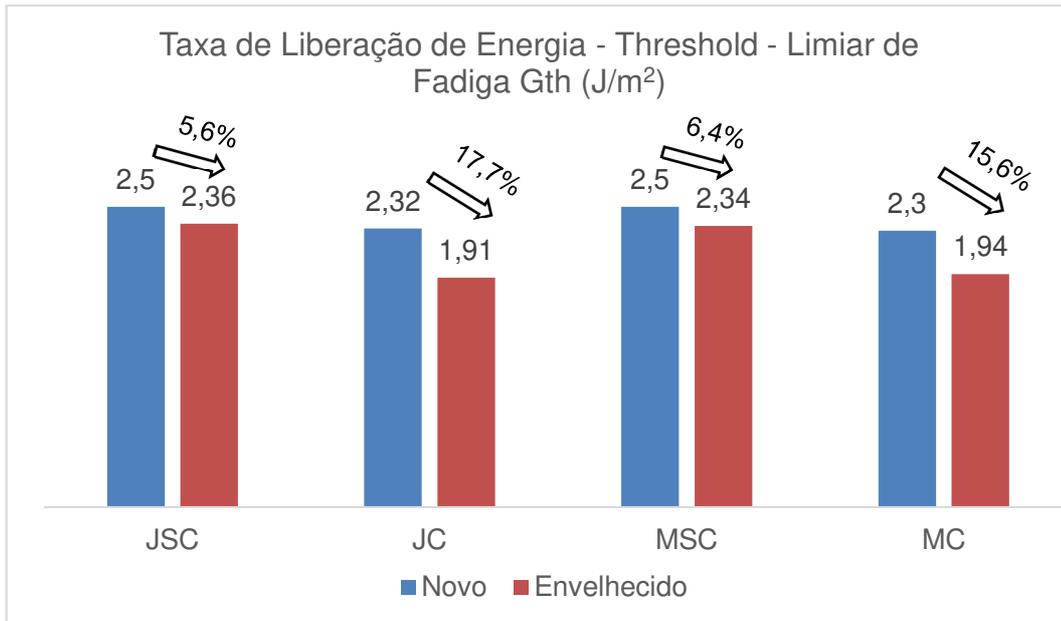


Figura 93: Taxa de liberação de energia no ponto de *threshold* (Gth) das juntas novas e envelhecidas após 12 meses em névoa salina.

As curvas obtidas na Figura 92 podem ser escritas no formato da Equação 8.

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right) = m \log G_{max} - B \quad (8)$$

Sabendo-se que $\ln(G_{max}) = 2,3 \log G_{max}$, tem-se a taxa de liberação de energia G é dada pela Equação 9:

$$G_{max} = e^{\left[\log\frac{da}{dN} + B\right] \frac{2,3}{m}} \quad (9)$$

Sendo m e B parâmetros dependentes da junta colada e da degradação, da/dN a taxa de propagação de descolamento. A Tabela 14 mostra os valores obtidos de m e B para todos tipos de juntas e a equação característica, assim como os valores de ajuste R².

Tabela 14: Valores dos parâmetros m e B e taxa de liberação G_{max} de cada junta.

Tipo de junta	Condição	m	B	G_{max} (J/m ²)	R ²
JSC	Nova	4,509	17,07	$G_{JSC-Novo} = e^{\left[\log\frac{da}{dN}+17,07\right]\frac{2,3}{4,509}}$	0,9885
JC	Nova	4,083	15,53	$G_{JC-Novo} = e^{\left[\log\frac{da}{dN}+15,53\right]\frac{2,3}{4,083}}$	0,9781
MSC	Nova	4,962	18,30	$G_{MSC-Novo} = e^{\left[\log\frac{da}{dN}+18,30\right]\frac{2,3}{4,962}}$	0,9816
MC	Nova	3,782	14,60	$G_{MC-Novo} = e^{\left[\log\frac{da}{dN}+14,60\right]\frac{2,3}{3,782}}$	0,9781
JSC	Envelhecida	3,767	14,72	$G_{JSC-Env.} = e^{\left[\log\frac{da}{dN}+14,72\right]\frac{2,3}{3,767}}$	0,9686
JC	Envelhecida	2,699	11,00	$G_{JC-Env.} = e^{\left[\log\frac{da}{dN}+11,00\right]\frac{2,3}{2,699}}$	0,9639
MSC	Envelhecida	3,756	14,59	$G_{MSC-Env.} = e^{\left[\log\frac{da}{dN}+14,59\right]\frac{2,3}{3,756}}$	0,967
MC	Envelhecida	2,841	11,39	$G_{MC-Env.} = e^{\left[\log\frac{da}{dN}+11,39\right]\frac{2,3}{2,841}}$	0,9687

5.8. Modo de Falha da Segunda Bateria de Testes

O mecanismo de falha foi caracterizado por inspeção visual e por microscopia como coesiva em juntas não corroídas (testes estáticos e de fadiga), indicando um tratamento de superfície adequado. Por outro lado, o modo de falha do tipo coesiva e adesiva foi observado em corpos de prova corroídos (testes estáticos e de fadiga), tanto nos testes sem degradação, quanto nos envelhecidos. O modo de falha tipo adesiva indica que a adesão entre o adesivo estrutural e o substrato precisa ser melhorado. Este fato também explica porque as juntas em chapas corroídas tiveram desempenho inferior aos da juntas sem corrosão, tanto nos testes estáticos, quanto nos testes de fadiga, sejam novos ou envelhecidos.

A Figura 94 mostra o modo de falha de juntas não corroídas e sem envelhecimento. Observa-se que o descolamento inicia-se no centro da junta. Adesivo pode ser visto em ambos os substratos, no aço e no compósito de fibra de carbono e alguns vazios também foram observados nas juntas. As falhas foram análogas para os dois tipos de tratamento de superfície, jateamento e máquina rotativa de impacto.

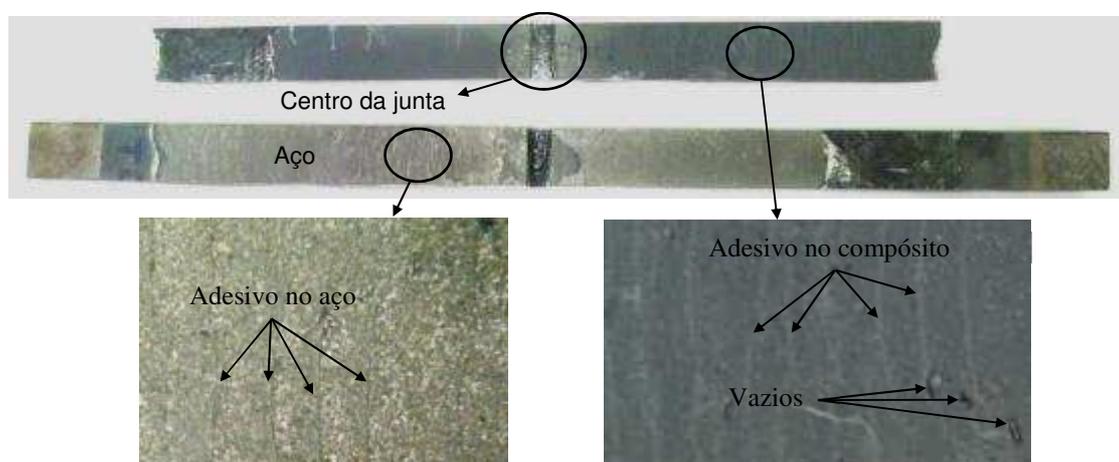


Figura 94: Falha nas juntas sem corrosão, estáticos e fadiga, sem degradação.

A Figura 95 mostra que as juntas altamente corroídas e sem envelhecimento apresentaram dois tipos de modo de falha em diferentes pontos, coesiva e adesiva. Os testes estáticos e de fadiga apresentam falhas similares para juntas corroídas, bem como para não corroídas.

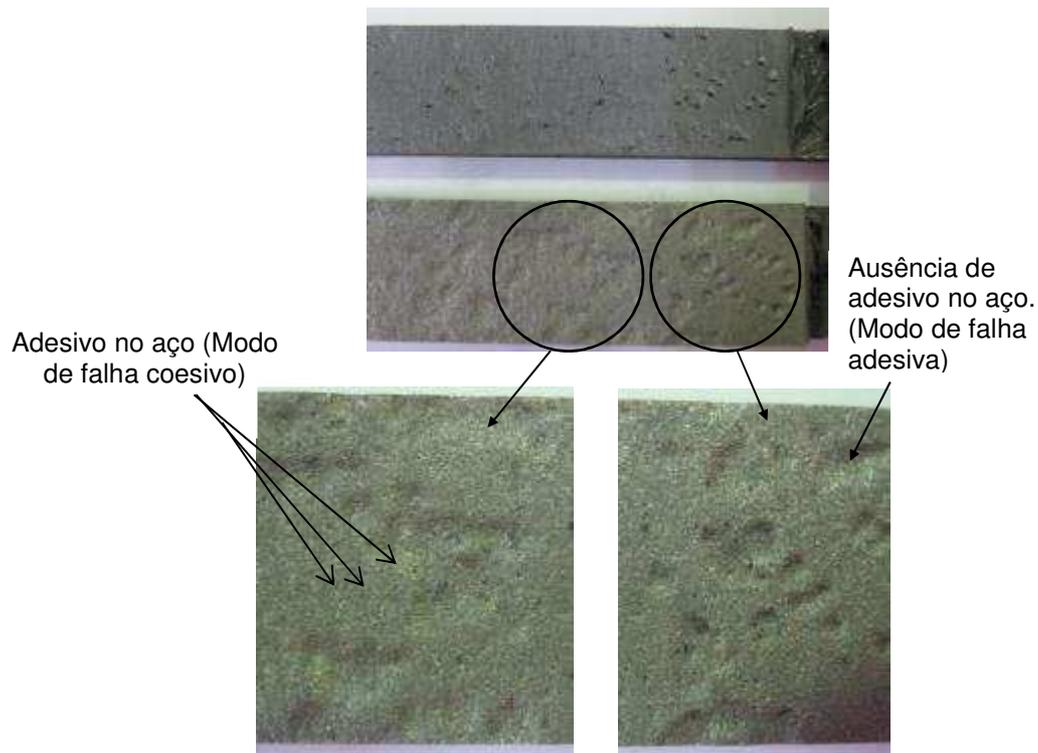


Figura 95: Falha nas juntas com corrosão, estáticos e fadiga, sem degradação.

A literatura [60, 128] relata que o modo de falha ideal é o coesivo e a falha adesiva pode ser evitada por meio de uma seleção cuidadosa do adesivo e preparação adequada da superfície do aço. Sugere-se que o tratamento de superfície deve ser melhorado para juntas corroídas, como por exemplo, o uso de silanos organofuncionais. Estes são geralmente utilizados como agentes de acoplamento para aumentar a adesão entre materiais orgânicos e inorgânicos, como polímeros e metais [129].

Assim como as tensões de cisalhamento, tensões de arrancamento surgem nas extremidades do reparo, que podem induzir a falhas devido à baixa resistência a cargas fora do plano (através da espessura) [128, 130]. MCGEORGE *et al.* [48] e MENICONI *et al.* [6] recomendam que o reparo por compósito seja confeccionado com uma redução de espessura gradual na extremidade para reduzir as tensões de arrancamento (fora do plano), fato que foi aplicado neste estudo.

A Figura 96 mostra a falha do corpo de prova sem corrosão e envelhecido, referente aos testes estático e fadiga, após 12 meses na névoa salina. Este modo de falha foi similar tanto para o tratamento com jateamento, quanto por máquina rotativa de impacto. Observa-se que o modo de falha é do tipo coesivo, ou seja, tem-se adesivo tanto na parte metálica, quanto no laminado compósito. Pode-se notar que houve um processo de corrosão/degradação na interface, promovendo o descolamento da junta colada nas extremidades, onde é possível observar óxidos de corrosão. Este mecanismo de degradação é denominado corrosão por fresta. Nota-se que no interior

da junta colada não foi encontrado produtos de corrosão, mantendo a integridade da região que foi submetida ao tratamento de jato ou por máquina rotativa de impacto. A taxa de corrosão medida na interface dos corpos de prova sem corrosão foi de 3,3 mm/ano.

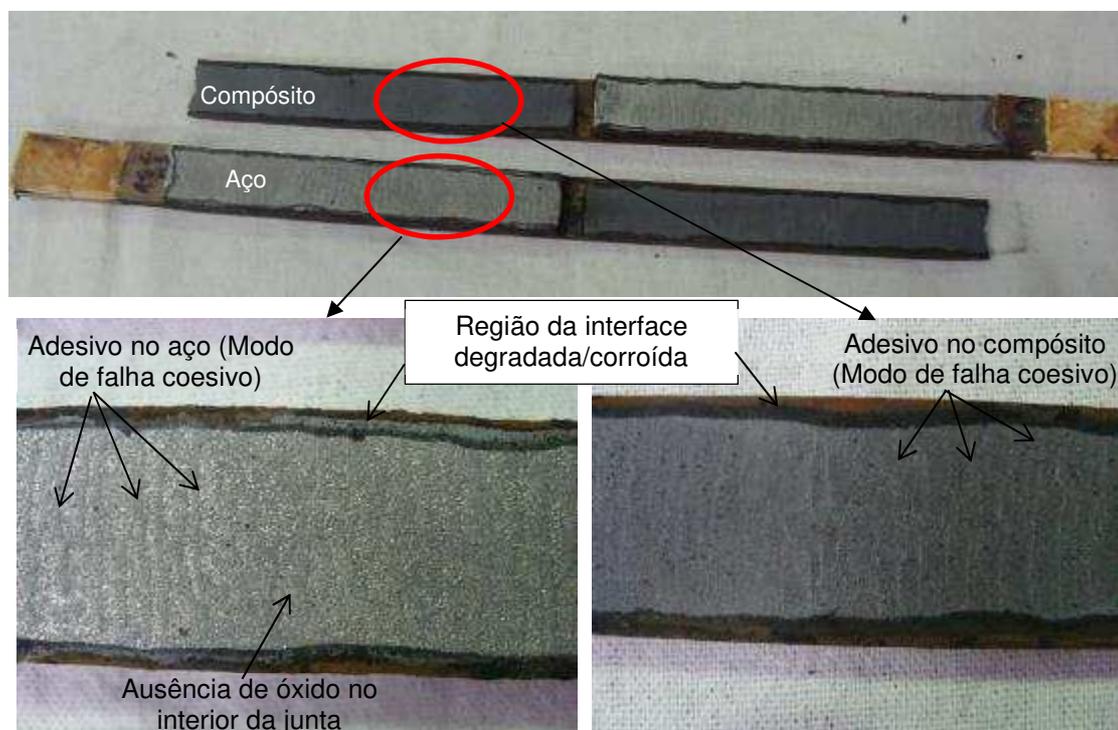


Figura 96: Falha das juntas coladas sem corrosão após degradação de 12 meses em juntas coladas sem corrosão (chapas lisas).

A Figura 97 mostra a falha do corpo de prova envelhecido após 12 meses na névoa salina, referente aos testes estático e fadiga dos corpos de prova com corrosão. Este modo de falha foi similar tanto para o tratamento com jateamento, quanto por máquina rotativa de impacto. Observa-se o mesmo fenômeno de corrosão por fresta, porém com maior avanço nas laterais, quando comparado com as juntas sem corrosão. Para estas juntas, a taxa de corrosão medida na interface foi de 5 mm/ano. É possível notar também que produtos de corrosão foram capazes de penetrar no interior da junta colada, ou seja, não se restringiram às extremidades. Este fato tem alto potencial para reduzir a resistência ao carregamento estático e a fadiga das juntas coladas, uma vez que os produtos de corrosão promovem o descolamento entre o laminado compósito e o substrato metálico. Da mesma forma que os corpos de prova sem corrosão e sem degradação, observam-se regiões com falhas adesivas e outras com falha coesiva.

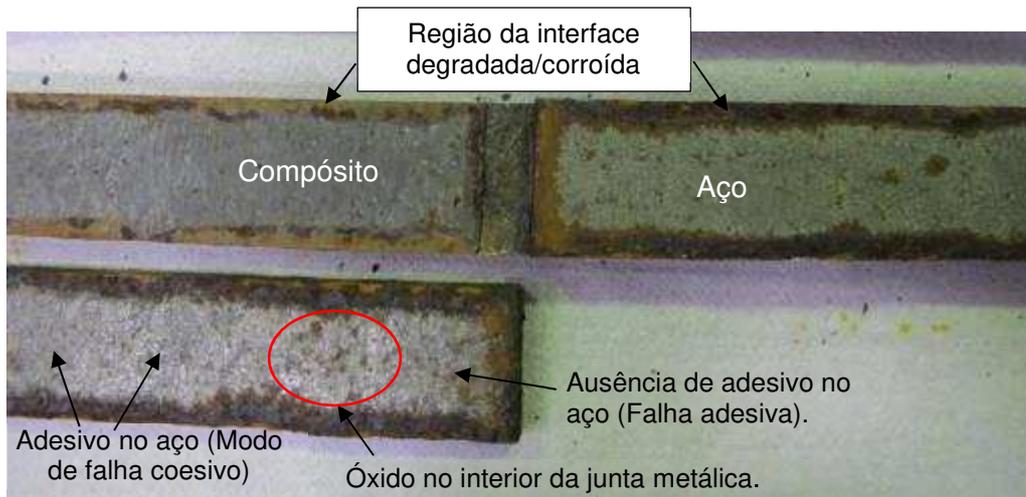


Figura 97: Falha das juntas coladas com corrosão após degradação de 12 meses na névoa salina.

O processo de envelhecimento ocorrido nas juntas coladas após 12 meses de exposição em névoa salina explica o motivo da queda na resistência estática e na vida a fadiga das juntas coladas. A queda mais significativa nos corpos de prova provenientes de chapas com corrosão pode ser explicada pelo fato de maior avanço da corrosão por fresta pelas laterais da interface e também pela presença de produtos de corrosão (óxidos) no interior das juntas.

A Figura 98 mostra a falha dos corpos de prova envelhecidos na névoa salina após 18 meses. Nota-se que a corrosão por fresta penetrou toda a interface, promovendo a ruptura dos corpos de prova com cargas extremamente baixas. As juntas coladas falharam apenas com as cargas promovidas durante a fixação na máquina de ensaios universal. Mediante este fato, não foi possível realizar os testes mecânicos. Esta falha ocorreu em todos corpos de prova. Foi observado que o fenômeno de corrosão na interface teve um drástico aumento. A velocidade de avanço da degradação na interface entre o décimo segundo mês e o décimo oitavo foi bastante superior aos primeiros 12 meses de exposição na névoa salina. A taxa de corrosão medida foi de 8 mm/ano. Este fato pode ser explicado devido aos produtos de corrosão (óxidos) serem bastante volumosos e isto pode ter gerado um carregamento do tipo arrancamento na junta.

Estas falhas inesperadas impediram a elaboração de um modelo de comportamento do envelhecimento da junta em função do tempo, pois com apenas dois tempos de falha, tempo zero e 12 meses, não é possível construir uma tendência.

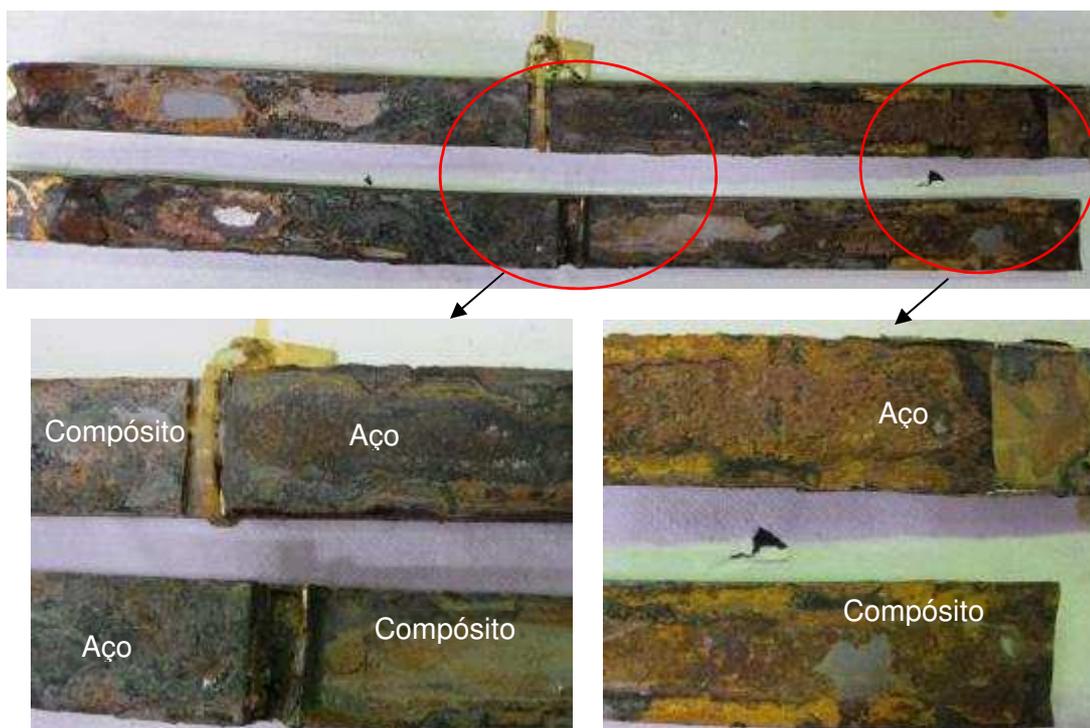


Figura 98: Falha das juntas coladas após 18 meses de envelhecimento em névoa salina.

Salienta-se que o modo de falha das juntas coladas da segunda bateria de testes foi diferente do obtido na primeira. Como mencionado anteriormente, o modo de falha da primeira bateria de testes deu-se por delaminação entre as camadas de compósito e na segunda bateria de testes foi obtido descolamento na interface. Este fato está associado ao fato do adesivo estrutural dos primeiros testes possuir tensão de cisalhamento na interface superior ao limite de cisalhamento do compósito.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, uma metodologia alternativa de preparação de superfície, empregando uma máquina rotativa com impacto para tratar a superfície do aço, foi avaliada por testes estáticos e de fadiga em juntas coladas de compósito de fibra de carbono em substrato metálico, simulando reparos estruturais de estruturas corroídas de plataformas.

Os testes nas juntas coladas de compósito de fibra de carbono e aço foram divididas em duas etapas. A primeira utilizou como reforço um compósito de fibra de carbono com uma resina éster-vinílica como matriz e jateamento para preparar superfície em chapa metálica sem corrosão e com proteção anticorrosiva. A segunda

também utilizou como reforço compósito de fibra de carbono, porém teve como matriz uma resina epóxi e havia uma simulação de defeito na proteção anticorrosiva. Nesta segunda etapa, dois tratamentos de superfície foram utilizados, jateamento e máquina rotativa com impacto. Além disso, dois tipos de substratos foram utilizados, chapa de aço sem e com corrosão. Em ambas as etapas as juntas coladas foram envelhecidas.

As seguintes conclusões foram obtidas no estudo deste trabalho:

- O comportamento estático das juntas coladas da primeira bateria de testes foi um pouco superior ao da segunda bateria de testes, enquanto que não foi observado diferença no comportamento dinâmico, quando comparado com as juntas sem envelhecimento.
- O comportamento estático e de fadiga das juntas coladas tratadas pela máquina rotativa de impacto foi comparável às juntas preparadas por jateamento.
- O comportamento estático e de fadiga de juntas coladas de aço corroídas apresentou propriedades inferiores (carga de ruptura final e taxa de liberação de energia - GMax) em relação a substratos de aço não corroídos. A interação entre o adesivo e a superfície de aço altamente corroída pode afetar a força de adesão. Além disso, uma maior espessura do adesivo pode levar a propriedades menores em amostras corroídas.
- O modo de falha para as juntas não corroídas foi identificado como coesiva, o que indica uma boa preparação da superfície. Para as juntas corroídas, foram identificados dois tipos de modo de falha, coesiva e adesiva, indicando que a preparação de superfície precisa ser melhorada.
- Os limites de fadiga para os corpos de prova novos podem ser estimados em 26% para a junta tipo MC, 27% para a junta JC, 30% para a junta JSC e 31% para a junta MSC, em relação à carga final de falha.
- Os limites de fadiga para os corpos de prova envelhecidos após 12 meses na névoa salina apresentaram queda em relação às juntas novas. Sendo que os corpos de prova corroídos apresentaram uma redução mais significativa. O modo de falha dos corpos de prova corroídos e envelhecidos mostram um grande avanço da degradação na interface e também no centro da junta.
- Os resultados mostram que o nível de corrosão no substrato metálico é fator importante tanto no dimensionamento da junta colada, quanto no nível de degradação pela névoa salina. Mediante este fato, sugere-se que seja utilizado um fator de segurança maior no

projeto de reparo em regiões com corrosão externa, onde o perfil geométrico é mais complexo.

- Não foi observado degradação do compósito de fibra de carbono após a exposição dos corpos de prova durante 180 dias em diferentes temperaturas. Também não foi identificado queda de propriedades mecânicas deste mesmo material após 60 dias de exposição em câmara de UV. Este fato corrobora que a degradação de reparos por materiais compósitos está concentrada na interface entre o compósito polimérico e o substrato metálico.
- Este trabalho mostrou que os compósitos de fibra de carbono são uma opção viável para reparar danos em substratos metálicos de estruturas offshore submetidas a esforços de cisalhamento e que o modo de falha predominante desta técnica de reparo é o descolamento na interface compósito e aço, quando os reparos possuem defeito no revestimento anticorrosivo externo.
- O estudo também conclui que a proteção anticorrosiva é de fundamental importância para proteger a interface e evitar a corrosão por fresta.

As principais contribuições deste trabalho consistem na determinação do comportamento mecânico de juntas coladas em termos de resistência estática e vida à fadiga envelhecidas em névoa salina em dois tipos de tratamento superficial, jateamento e máquina rotativa de impacto. Estas juntas representam reparos por materiais compósitos em áreas com defeitos tipo perda de espessura em plataformas de petróleo. Por meio dos resultados, será possível realizar reparos em áreas de difícil acesso, tendo em vista o conhecimento adquirido nesta tese. Além disso, com o entendimento do processo de envelhecimento deste tipo de reparo, será possível atuar de maneira preventiva de modo a evitar uma falha prematura.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliação do comportamento mecânico de juntas coladas em carregamentos de flexão e torção, separadas e combinadas, para viabilizar reparos por compósitos em regiões de plataformas sujeitas a estes carregamentos.

Estudo da degradação de juntas coladas na presença de hidrocarbonetos, tendo em vista que os reparos por materiais compósitos podem ser aplicados em regiões internas de tanques.

Avaliar a utilização de agentes promotores de adesão do tipo silanos organometálicos, pois tem potencial de promover o impedimento do avanço da corrosão por fresta.

Estudar o efeito da inserção de nanotubos de carbono nos adesivos estruturais e na matriz do compósito de fibra de carbono nas propriedades mecânicas de juntas coladas.

Estudar o mecanismo de degradação nos substratos corroídos que provocaram a presença de óxidos no interior das juntas coladas.

Redimensionar o tempo e a largura das juntas coladas de modo a obter mais dados de juntas degradadas pelo processo de corrosão na interface para elaboração de modelo de comportamento estático e dinâmico em função do tempo.

Outros trabalhos devem ser realizados para fornecer um conjunto de dados maior de vida útil de fadiga de juntas coladas. Além disso, diferentes tipos de adesivos e compósitos devem ser testados para investigar seu efeito no desempenho de fadiga e melhorar a confiabilidade em seu desempenho de longo prazo em ambientes *offshore*.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Hollaway, L.C., Cadei, J., “Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites”, *Progress in Structural Material Engineering*, v. 42, n. 2, pp. 131-148, Jun. 2002.
- [2] Zhao, X., Zhang, L., “State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures”, *Engineering Structures*, v. 29, n. 8, pp. 1808-1823, Ago. 2007.
- [3] Colombi, P., Fava, G., “Fatigue behaviour of tensile steel/CFRP joints”, *Composite Structures*, v. 94, n. 8, pp. 2407-2417, Jul. 2012.
- [4] Cadei, J., Stratford, T., Duckett, W., *et al.*, *Strengthening metallic structures using externally bonded fibre-reinforced composites*. 1 ed. Londres, Construction Industry Research & Information Association (CIRIA), 2004.
- [5] Schnerch, D., Dawood, M., Rizkalla, S., *et al.*, “Proposed design guidelines for strengthening of steel bridges with FRP materials”, *Construction Building Materials*, v. 21, n. 5, pp. 1001-1040, Mai. 2007.
- [6] Meniconi, L., Perrut, V., Lana, L., Morikawa, S., *et al.*, *Reparo do Costado de Plafatorma por meio de Materiais Compósitos*. In: CT TMEC 013/2015, Petrobras, Rio de Janeiro, 2015.
- [7] Martin, R., *Ageing of Composites*. 1 ed., Cambridge, Woodhead Publishing, 2008.
- [8] Costa, M., Viana, G., da Silva, L., Campilho, R., “Environmental effect on the fatigue of adhesive joints: A review”, *The Journal of Adhesion*, v. 93, n. 1-2, pp. 127-146, Set. 2016.
- [9] Harris, A., Beevers, A., “The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion”, *Adhesion & Adhesives*, v. 19, n. 6, pp. 445-52, Dez. 1999.
- [10] Meniconi, L., Freire, J., Vieira, R., *et al.*, “Stress analysis of pipelines with composite repairs”. *4th International Pipeline Conference*, pp. 2031-2037, Calgary, Out. 2002.
- [11] Perrut, V., Lana, L., Fampa, A., *et al.*, “Reparo de tubulações metálicas com vazamento de óleo por meio de materiais compósitos”. *VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Uberlândia, Ago. 2014.
- [12] Mattos, H., Reis, J., Paim, L., *et al.*, “Analysis of a glass fibre reinforced polyurethane composite repair system for corroded pipelines at elevated temperatures”, *Composite Structures*, v. 114, pp. 117-123, Ago. 2014.

- [13] Perrut, V., Meniconi, L., Filho, B., "Evaluation of composite sleeves for reinforcement of dented pipelines". *6th International Pipeline Conference*, pp. 865-872, Calgary, Out. 2006.
- [14] Perrut, V., Petry, G., Lana, L., "Evaluation of composite sleeves for reinforcement of dented pipelines on longitudinal weld," *1st Brazilian Conference on Composite Materials - BCCM1*, Natal, Jul. 2012.
- [15] Meniconi, L., *Reparo de Tanques de Armazenamento por meio de Materiais Compósitos*. In: CT TMEC 072/2009, Petrobras, Rio de Janeiro, 2009.
- [16] Meniconi, L., Porciúncula, I, McGeorge, D., *et al.*, "Structural repair at a production platform by means of a composite material patch", *Offshore Technology Conference - OTC*, Houston, Mai. 2010.
- [17] Meniconi, L., Lana, L., Morikawa, S., "Experimental fatigue and aging evaluation of the composite patch repair of a metallic ship hull", *Applied Adhesion Science*, pp. 2-27, Dez. 2014.
- [18] da Silva, L.F.M., Magalhães, A., Moura, M., *Juntas Adesivas Estruturais*. 1 ed. Porto, Publindústria, 2007.
- [19] Kinloch, A. J., *Adhesion and Adhesives*, 1 ed. London. Chapman & Hall, 1987.
- [20] Monteiro, D. F., *Análise do comportamento à fratura de juntas de aço efectuados com adesivos estruturais*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Porto, Porto, Portugal, 1995.
- [21] Sampaio, E., Garcia, F., Limaverde, A., *et al.*, "Aderência de Juntas Metálicas de Cisalhamento Coladas com Adesivos Epoxídicos de Baixa e Alta Viscosidade", *CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, Foz do Iguaçu - PR, Nov. 2006.
- [22] Mendonça, P., *Materiais Compostos & Estruturas Sanduíches*. 1 ed. Florianópolis, Manole, 2005.
- [23] Griffith, A. A., "The phenomenon of rupture and flow in flow", *Philosophical Trans. of the Royal Society*, v. 221A, pp. 163-198, 1992.
- [24] Gordon, J. E., *The new science of strong materials*. 2 ed. Princeton University Press, 1976.
- [25] Chawla, K., *Composite Materials, Science and Engineering*. 1 ed. New York, Springer-Verlag, 1987.
- [26] Morgan, P., *Carbon Fibers and their Composites*, 1 ed. New York, Taylor & Francis, 2005.

- [27] Isaraelachvili, J. N., *Intermolecular and Surface Forces*, 3 ed. Londres, Academic Press, 2011.
- [28] Barcia, F. L., *Modificação de Resina Epoxídica com Polibutadieno Líquido Hidroxilado*, Tese de D.Sc., IMA/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [29] Pocius, A. V., *Adhesion and Adhesives*, 2 ed. Alemanha, Hanser Publishers, 2002.
- [30] Berry, N. G., *Avaliação de Propriedades Mecânicas e Adesivas de Resinas Epoxídicas com e sem Envelhecimento*, Tese de D.Sc., PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- [31] Harkings, W. D., *Physical Chemistry of surface Films*, 1 ed. Nova Iorque, Reinhold Publishing, 1952
- [32] Quini, J. G., *Adesivos Estruturais Uretânicos Aplicados a Combinações de Compósitos, Plásticos e Metais*. Tese de D.Sc., IPEN/USP, São Paulo, Brasil, 1997.
- [33] Sampaio, E., *Um Modelo de Dano para Juntas Coladas*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998.
- [34] da Silva, L. R., Carbas, R., G. Critchlow, *et al.*, "Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, v. 29 n. 6, pp. 621-632, Set. 2009.
- [35] Baldan, A., "Review adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: adhesives, adhesion theories and surface pretreatment", *Journal of Materials Science*, v. 39, n. 1, pp. 1-49, Jan. 2004.
- [36] Dawood, M., Rizkalla, S., "Environmental durability of a CFRP system for strengthening steel structures", *Construction Building Materials*, v. 24, n. 9, pp. 1682-1689, Set. 2010.
- [37] Carvalhão, M., Dionísio, A., "Evaluation of mechanical soft-abrasive blasting and chemical cleaning methods on alkyd-paint graffiti made on calcareous stones", *Journal of Cultural Heritage*, v. 16, n. 4, pp. 579-590, Jul. 2015.
- [38] Perrut, V., Lana, L., *Avaliação de Reparo por Material Compósito em superfície Metálica Úmida*. In: CT TMEC 37/2012, Petrobras, Rio de Janeiro, 2012.
- [39] Jones, S., Civjan, S., "Application of fiber reinforced polymer overlays to extend steel fatigue life", *Journal of Composites for Construction*, v. 7, n. 4, pp. 331-338, Nov. 2003.

- [40] Bocciarelli, M., Colombi, P., Fava, G., *et al.*, "Fatigue performance of tensile steel members strengthened with CFRP plates" *Composite Structures*, v. 87, n. 4, pp. 334-343, Fev. 2009.
- [41] Critchlow, G., *Handbook of Adhesion Technology*, pp. 119-146, Berlin, Heidelberg, Springer, 2011.
- [42] Gude, M., Prolongo, S., Urena, A., "Adhesive bonding of carbon fibre/epoxy laminates: correlation between surface and mechanical properties", *Surface and Coating Technology*, v. 207, pp. 602-607, Ago. 2012.
- [43] Batuwitage, C., Fawzia, C., Thambiratnam, D., *et al.*, "Durability of CFRP strengthened steel plate double-strap joints in accelerated corrosion environments", *Composite Structures*, v. 160, pp. 1287-1298, Jan. 2017.
- [44] Liu, M., Dawood, M., "Reliability analyses of adhesively bonded CFRP-to-steel double lap shear joint with thin outer adherends", *Construction and Building Materials*, v. 141, pp. 52-63, Jun. 2017.
- [45] Teng, J., Fernando, D., Yu, T., *et al.*, "Treatment of steel surfaces for effective adhesive bonding". In: *Advances in FRP Composites in Civil Engineering*, Berlin, Heidelberg, Springer, pp. 865-868, 2011.
- [46] Fernando, D., Teng, J., Yu, T., *et al.*, "Preparation and characterization of steel surfaces for adhesive bonding", *Journal of Composites for Construction*, v. 17, n. 6, Dez. 2013.
- [47] Grabovac, I., Whittaker, D., "Application of bonded composites in the repair of ships structures - A 15-year service experience", *Composites: Part A*, v. 40, n. 9, pp. 1381-1398, Set. 2009.
- [48] McGeorge, D., Echtermeyer, A., Leong, K., *et al.*, "Repair of floating offshore units using bonded fibre composite materials", *Composites Part A*, v. 40, n. 9, pp. 1364-1380, Set. 2009.
- [49] Stango, R. J., Khullar, P., "Fundamentals of bristle blasting process for removing corrosive layer", *NACE Corrosion Conference & Expo*, Milwaukee, USA, Set. 2009.
- [50] Aggelopoulos, E. S., 2007, *Composite patch repair of fatigue-damaged*. Ph.D thesis, University of Surrey, Surrey, USA.
- [51] Volkersen, O., "Die Niekraftverteilung in Zugbeanspruchten mit konstanten Laschenquerschritten," *Luftfahrtforschung*, v. 15, pp. 41-47, 1938.

- [52] Adams, R., Comyn, J., Wake, W., *Structural Adhesive Joints in Engineering*. 2 ed. New York, Chapman & Hall, 1997.
- [53] Goland, M., Reissner, E., "The stresses in cemented joints", *Journal of Applied Mechanics*, v. 11, pp. A17-A27, 1944.
- [54] Hart-Smith, L., *Adhesive bonded single-lap joints*. In: *NASA CR-112235*, Washington, USA, 1973.
- [55] Zou, G., Shahin, K., Taheri, F., "An analytical solution for the analysis of symmetric composite adhesively bonded joints", *Composite Structures*, v. 65, n. 3, pp. 499-510, Set. 2004.
- [56] Mortensen, F., Thomsen, O., "Analysis of adhesive bonded joint: a unified approach", *Composites Science and Technology*, v. 62, n. 7, pp. 1011-1031, Jun. 2002.
- [57] McGeorge, D. "Inelastic fracture of adhesively bonded overlap joints", *Engineering Fracture Mechanics*, v. 77, n. 1, pp. 1-21, Jan. 2010.
- [58] Hadj-Ahmed, R., Foret, G., Erlacher, A., "Probabilistic analysis of failure in adhesive bonded joints", *Mechanical Materials*, v. 33, n. 2, pp. 77-84, Fev. 2001.
- [59] John, S., *Predicting the strength of bonded carbon fibre/epoxy composite joints*. In: *ASTM STP 1227*, ASTM, Philadelphia, USA, 1994.
- [60] Osnes, H., McGeorge, D., "Experimental and analytical strength analysis of double-lap joints for marine applications", *Composites Part B: Engineering*, v. 40, n. 1, pp. 29-40, Jan. 2009.
- [61] Mallick, V., Adams, R., "The stresses and strains in bonded joints between metal and composite materials", *International Conference Plastics & Rubbers - Adhesion 87*, London, 1987.
- [62] McGeorge, D., "On the long term properties of steel-composite interfaces for marine applications", *4th Composite Materials for Offshore Operations*, Houston, USA, Oct. 2005.
- [63] da Silva, L., Adams, R., "Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 27, n. 3, pp. 227-235, Abr. 2007.
- [64] Crocombe, A., Adams, R., "Influence of the spew fillet and other parameters on the stress distribution in the single lap joint", *The Journal of Adhesion*, v. 13, n. 2, pp. 141-155, Jun. 1981.

- [65] Lang, T., Mallick, P., "Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 18, n. 3, pp. 167-177, Jun. 1988.
- [66] Tsai, M., Morton, J., "The effect of a spew fillet on adhesive stress distributions in laminated composite single-lap joints", *Composite Structures*, v. 32, n. 1, pp. 123-131, 1995.
- [67] Adams, R., Peppiat, N., "Stress analysis of adhesive-bonded lap joints", *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, v. 9, pp. 185-196, Jul. 1974.
- [68] Liljedahl, C., Crocombe, A., Wahb, M., *et al.*, "Damage modelling of adhesively bonded joints," *International Journal of Fracture*, vol. 141, pp. 161-74, 2006.
- [69] Andersson, T., Stigh, U., "The stress elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces", *International Journal of Solids Structures*, v. 41, n. 2, pp. 413-34, Jan. 2004.
- [70] Marchezin, E., Pardini, L., Guimarães, V., "Avaliação do comportamento em fadiga de juntas estruturais de ligas de Al2024T3 coladas com adesivo epóxi", *Revista Matéria*, v. 17, n. 1, pp. 889-900, 2012.
- [71] McGrath, G. C., "Fracture and toughening in fibre reinforced polymer composites", *Rubber Toughened Engineering Plastics*, pp. 57-89, 1994.
- [72] Jones, T. B., Williams, N. T. "The Fatigue Properties of Spot Welded, Adhesive Bonded and Weldbonded Joints in high Strength Steels". *SAE International Congress and Exposition*, v. 10, pp. 1075-1080, Detroit, Michigan, USA, 2011.
- [73] Andrews, E. H., *Testing of Polymers IV*, New York: W. A. Brown, 1969.
- [74] Hart-Smith, L. J., "Stress analysis of adhesively bonded joints: A continuum mechanics approach", *Development in Adhesives*, London, Applied Science Publishers, 1986.
- [75] H. Liu, X. Zhao e R. Al-Mahaidi, "The effect of fatigue loading on bond strength of CFRP bonded steel plate joints". In: *Proceedings of international symposium on bond behaviour of FRP in structures*, Hong Kong, 2005.
- [76] Deng, J., Lee, M., "Fatigue performance of mettalic beam strenggthened with a bonded CFRP plate", *Composite Structures*, pp. 78:222-31, v. 2, Abr. 2007.
- [77] Matta, F., Karbhari, V., Vitaliani, R., "Tensile response of steel/CFRP adhesive bonds for the rehabilitation of civil structures", *Structural Engineering Mechanical*, v.20, pp. 589-608, 2005.

- [78] Moy, S., "Early ageing curing under cycling loading - an investigation into stiffness development in carbon fibre reinforced steel beams", *Advanced polymer composites for structural applications in construction*, pp. 187-94, 2002.
- [79] Chin, J. W., Nguyen, T., Aouadi, K., "Effects of environmental exposure on fiber reinforced", *Journal of Composite Technology*, v. 19, n. 4, pp. 205-213, Out. 1997.
- [80] Karbhari, V., Shulley, S., "Use of composites for rehabilitation of steel structures: determination of bond durability", *Journal of Materials Civil Engineering*, v. 7, pp. 239-45, 1995.
- [81] Pizzi, A., Mittal, K., *Handbook of adhesive technology*, New York, Marcel Dekker, 2003.
- [82] Gledhill, R., Kinloch, A. J., Shaw, S., "A Model for Predicting Joint Durability", *The Journal of Adhesion*, v. 11, pp. 3-15, 1980.
- [83] Brewis, D., Comyn, J., Raval, A., *et al.*, "The effect of humidity on the durability of aluminum-epoxide joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 10, pp. 247-53, 10.
- [84] Bowditch, M., "The durability of adhesive joints in the presence of water", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 16, pp. 73-9, 1996.
- [85] Ripling, E., Mostovoy, S., Bersch, C., "Stress corrosion cracking of adhesive joints", *Journal of Adhesives*, v. 3, pp. 145-63, 1971.
- [86] Thrall, E., Shannon, R., *Adhesive bonding of aluminum alloys*, New York, USA, 1985.
- [87] Perrut, V., Cardoso, A., Chiapim, E., *et al.*, *Reparo de Dutos: Técnicas e Durabilidade*. In: RT TMEC 026/2012, Petrobras, Rio de Janeiro, 2012.
- [88] West, T., *Enhancement to the bond between advanced composite materials and steel for bridge rehabilitation*. Dissertation, University of Delaware, 2001.
- [89] Knox, E., Cowling, M., "Durability aspects of adhesively bonded thick adherend lap shear joints", *International Journal of adhesion and adhesives*, v. 20, pp. 323-31, 2000.
- [90] Nguyen, T, Bai, Y., Zhao, X., *et al.*, "Durability of steel/CFRP double strap joints exposed to sea water, cyclic temperature and humidity", *Composite Structures*, v. 94, n. 5, pp. 134-45, Abr. 2012.
- [91] Bordes, P., Davies, J., Cognard, L., *et al.*, "Prediction of long term strength of adhesively bonded steel/epoxy joints in sea water", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 29, n. 6, pp. 595-608, Set. 2009.

- [92] Phani, K, Bose, N., "Temperature dependence of hydrothermal ageing of CSM laminate", *Composite Science Technology*, v. 29, n. 2, pp. 79-87, 1987.
- [93] Nguyen, T., Bai, Y., Zhao, X., *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, pp. 3563-73, Dez. 2012.
- [94] Feldman, D., "Polymer Weathering: Photo-Oxidation", *Journal of Polymers and the Environment*, v. 10, n. 4, pp. 163-73, Out. 2002.
- [95] Liao, W., Tseng, F., "The effect of long term ultraviolet light irradiation on polymer matrix composites", *Polymer Composites*, v. 19, n. 4, pp. 440-445, Abr. 1998.
- [96] ISO 8501-1, *Preparation of Steel Substrates before Application of Paints and Related Products*, 2007.
- [97] ASTM D 638, *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, 2014.
- [98] ASTM D 3039, *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, 2017
- [99] ISO 4288, *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture*, 1996.
- [100] ASTM D 3528, *Standard Test Method for Strength Properties of Double Lap Shear Adhesive joints*, 2016.
- [101] Hollaway, L., *Handbook of Polymer Composites for Engineers*, Abington, Woodhead Publishing, 1994.
- [102] DNV RP C-301, *Design, Fabrication, Operation and Qualification of Bonded Repair of Steel Structures*, 2006.
- [103] Quintela, J., Vieira, G., Pinto, E., *et al.*, *Solda a Frio para Fixação de Calhas em Regiões de Suporte de Tubulações*. In: CT080/2005, Petrobras, Rio de Janeiro, 2005.
- [104] Cavalcanti, E., "Analysis of experimental solar radiation data for Rio de Janeiro - Brazil", *Solar Energy*, v. 47, pp. 231-35, 1991.
- [105] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Relatório de Energia Solar. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar%283%29.pdf. Acesso em 24 fev 2018, 19:30:30.
- [106] Abanilla, M., Li, Y., Karbhari, V., "Durability characterization of wet layup graphite/epoxy composites used in external strengthening", *Composites Engineering Part B*, v. 37, n. 2, pp. 200-12, Abr. 2006.

- [107] Zhang, Y., Vassiloupoulos, A. P., Keller, T., "Fracture of adhesively -bonded pultruded GFRP joints under constant amplitude fatigue loading," *International Journal of Fatigue*, pp. 979-987, Abr. 2010.
- [108] Performance Composites LTDA. Disponível em: http://www.performance-composites.com/carbonfibre/mechanicalproperties_2.asp. Acesso em 20 mar 2018, 19:30:30.
- [109] McGeorge, D., Echtermeyer, A. T., *Project Recommended Practice for Composite Patch Repair of FPSO Structures*, Det Norske Veritas, Hovik, Norway, 2006.
- [110] Park, Y., Song, M., Kim, J., *et al.*, "Strength of carbon/epoxy composite single-lap bonded joints in various environmental conditions", *Composite Structures*, v. 92, pp. 2173-80, 2010.
- [111] SSPC-VIS 1, *Guide and Reference Photographs for Steel Surfaces*, *The Society of Protective*, 2002.
- [112] Stango, R. J., Kargol, E., *Evaluation of Bristle Blasting Process for Surface Preparation of Ship-Construction Steel*, NACE Corrosion Conference & Expo, Milwaukee, USA, 2012.
- [113] Sadowski, L., Czarnecki, S., Hola, J., "Evaluation of the height 3D roughness parameters of concrete substrate and the adhesion to epoxy resin", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 67, pp. 3-13, Jun. 2016.
- [114] Antonio, P., Lasalvia, M., Perna, G., *et al.*, "Scale-independent roughness value of cell membranes studied by means of AFM technique", *Biochimica et Biophysica Acta*, v. 1818, n. 12, pp. 3141-3148, Dez. 2012.
- [115] Romoli, L., Moroni, F., Khan, M., "A study on the strength of bonded joints in aluminium alloys", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 66, n. 1, pp. 237-240, 2017.
- [116] Roach, D., Rackow, K., Dunn, D., *Joining and Repair of Composites Structures*, Est Conshohocken, PA, ASTM International, 2004, pp. Section II, 110-123.
- [117] Huy, M. L., "Methodologies for lifetime predictions of rubber using Arrhenius and WLF models," *International Conference on Advances in the Stabilization and Degradation of Polymers*, Switzerland, 1998.
- [118] ISO 24817 - *Petroleum, petrochemical and natural gas industries -- Composite repairs for pipework -- Qualification and design, installation, testing and inspection*, 2015.

- [119] Hart-Smith, L. J., *Analysis and design of advanced composite bonded joints*. In: NASA-CR-2218, Langley, Washington, 1974.
- [120] Crocombe, A., "Global yielding as a failure criterion for bonded joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 9, n. 3, pp. 145-153, Jul. 1989.
- [121] Xu, W., Wei, Y., "Influence of adhesive thickness on local interface fracture and overall strength of metallic adhesive bonding structures", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 40, pp. 158-167, Jan. 2013.
- [122] da Silva, L., Rodrigues, T., Figueiredo, *et al.*, "Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength", *The Journal of Adhesion*, v. 82, n. 11, 2006.
- [123] Kinloch, A. J., *Adhesion and Adhesives*, pp. 264-338, Cambridge, Chapman & Hall, 1994.
- [124] Mostovoy, S., Ripling, E., Bersch, C., "Fracture toughness of adhesive joints", *The Journal of Adhesion*, v. 3, pp. 125-144, 1971.
- [125] Pascoe, J., Alderliesten, R., Benedictus, R., "Methods for the prediction of fatigue delamination growth in composites and adhesives bonds - A critical review," *Engineering of Fracture Mechanics*, v. 112, pp. 72-96, Nov. 2013.
- [126] ASTM E 647, *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth*, 2000.
- [127] Allegri, G., Jones, M., Wisnom, M., *et al.*, "A new semi-empirical model for stress ratio effect on mode II fatigue delamination growth", *Composites: Part A*, v. 42, pp. 733-740, Jul. 2011.
- [128] Tsai, M., Morton, J., "An investigation into the stress in double adhesive joints laminated composite adherends", *International Journal of Solids and Structures*, n° 47, n. 24, pp. 3317-25, Dez. 2010.
- [129] Baldan, A., "Adhesion phenomena in bonded joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 38, pp. 95-116, Out. 2012.
- [130] Akpınar, S., "Effects of laminate carbon/epoxy composite patches on the strength of double-strap adhesive joints: experimental and numerical analysis", *Materials and Design*, v. 51, pp. 501-512, Out. 2013.