

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

ITAN ALAN MARINHO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UNIÕES
PRFC/ALUMÍNIO COM PRFV COMO MATERIAL ISOLANTE CONTRA
CORROSÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PATO BRANCO
2019**

ITAN ALAN MARINHO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UNIÕES
PRFC/ALUMÍNIO COM PRFV COMO MATERIAL ISOLANTE CONTRA
CORROSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Bellini
Medeiros

PATO BRANCO

2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

Análise Comparativa do Comportamento Mecânico de Uniões PRFC/Alumínio com PRFV Como Material Isolante Contra Corrosão

ITAN ALAN MARINHO DE OLIVEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 28/11/2019 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Profa. Dra. Maria Nalu Verona Gomes
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Profa. Dra. Mariana de Souza Sikora
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Química)

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
(UTFPR – Departamento de Mecânica)
Orientador

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Evanilde do Nascimento Marinho e ao meu pai José de Jesus Oliveira, por todos os esforços que realizaram para a conclusão desta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ser firmamento, refúgio e abrigo.

Agradeço especialmente à Nork Hydro ASA, pelo fornecimento das placas de alumínio para a realização dos ensaios. À Gatron – Inovação em Compósitos e todos colaboradores que auxiliaram com apoio e informações.

Ao prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros pelas orientações, conversas, paciência e confiança.

À profa. Dra. Mariana de Souza Sikora por toda ajuda e dedicação no desenvolvimento dos ensaios eletroquímicos e por ter aceitado o convite para participar da banca examinadora.

À profa. Dra. Maria Nalu Verona Gomes por ter composto a banca examinadora.

Ao prof. MSc. Waldormiro Sebastião Moreira por toda ajuda, conhecimento e conteúdo compartilhado.

À minha família, em especial à minha mãe Evanilde do Nascimento Marinho, meu pai José de Jesus Oliveira, meus irmãos Ítalo José Marinho de Oliveira e Igor Apolinário Marinho de Oliveira e minhas irmãs Vivian Reis Oliveira e Vitória Reis Oliveira pelo apoio, conselhos e dedicação em fazerem parte desta conquista.

À minha namorada Larissa Lourdes Luz Ferreira, por sua ternura, ajuda e por estar presente em todos os momentos.

A todos meus amigos e colegas desta jornada na UTFPR – Câmpus Pato Branco.

EPÍGRAFE

“... E vi as borboletas. E meditei sobre as borboletas. Vi que elas dominam o mais leve sem precisar de ter motor nenhum no corpo. (Essa engenharia de Deus!) ”

(Manoel de Barros)

RESUMO

OLIVEIRA, Itan Alan Marinho de. **Análise comparativa do comportamento mecânico de uniões PRFC/Alumínio com PRFV como material isolante contra corrosão**. 2019. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

O tema junção de metal-compósito recebeu atenção crescente nos últimos anos devido ao desejo de obter propriedades otimizadas em diferentes locais de uma estrutura, porém este tipo de união apresenta o desafio da corrosão galvânica. Este trabalho apresenta um estudo comparativo do comportamento mecânico de diferentes configurações de uniões de polímero reforçado de fibra de carbono (PRFC) e alumínio utilizando o polímero reforçado de fibra de vidro (PRFV) como material isolante, a fim de verificar a sua influência nas propriedades mecânicas da junta. Para isto, foram realizados ensaios de cisalhamento em quatro diferentes configurações de corpos de prova: com e sem PRFV e de sobreposição de 50 mm e 12,5 mm. Os ensaios de corrosão foram executados em três tipos de arranjos: com lixamento do polímero do PRFC, sem lixamento e com PRFV. Os grupos de amostras com PRFV mostraram um prejuízo médio de 27% em sua resistência a ruptura e uma redução de 33% na taxa de corrosão. Assim, foi constatado que o isolamento melhora a proteção a corrosão, mas prejudica a resistência mecânica da junta.

Palavras-chave: Compósitos. Juntas adesivas. Corrosão Galvânica. PRFC. PRFV.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Itan Alan Marinho de. **Comparative analysis of the mechanical behaviour of joints of CFRP/Aluminium with GFRP as insulation material against corrosion**. 2019. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

The metal-composite joining topic has received increasing attention in recent years due to the desire to obtain optimized properties at different locations of a structure. This work presents a comparative study of the mechanical behaviour of different configurations of joints of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) and aluminium using the glass fibre reinforcer polymer (GFRP) as insulation material, with the objective of verifying its influence on the mechanical properties of the joint. For this purpose, lap-shear tests were performed in four different configurations of couple: with and without GFRP and overlap of 50mm and 12.5mm. The galvanic corrosion tests used three types of configurations: with CFRP polymer sanding, without sanding and with GFRP. The sample groups with GFRP presented an average loss of 27% in its resistance against fracture and a reduction of 33% in its corrosion rate. Therefore, it is stated that the insulation improves the protection against corrosion but impairs the mechanical resistance of the joint.

Keywords: Composites. Adhesive joints. Galvanic Corrosion. CFRP. GFRP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Arranjos entre o reforço e a matriz. (a) particulado; (b) fibras curtas e (c) fibras longas.....	18
Figura 2 - Ilustração do processo de moldagem à vácuo.....	22
Figura 3 - Esquemático mostrando a construção de um painel sanduíche com núcleo de colmeia.	23
Figura 4 - Tabela prática em água do mar.....	25
Figura 5 - Bolhas formadas em compósito de fibra de carbono acopladas ao alumínio na água do mar.....	26
Figura 6 - Arranjo esquemático para levantamento de curvas de polarização. ET= eletrodo de trabalho; ER= eletrodo de referência; CE= contra eletrodo.....	27
Figura 7 – Representação do potencial E em função do Log i para análise de corrosão por extrapolação das retas de Tafel.....	28
Figura 8 - Determinação das inclinações numa curva de Tafel.....	29
Figura 9 - Delaminação após a falha de uma junta mecânica por parafuso.....	30
Figura 10 - Ilustração dos modos de falhas para juntas mecânicas em materiais compósitos.....	31
Figura 11 - Tipos de juntas adesivas mais comuns.....	32
Figura 12 - Modos de ruptura em juntas adesivas: (a) ruptura coesiva, (b) ruptura adesiva, (c) ruptura do compósito e (d) ruptura mista.....	32
Figura 13 - Modos de carregamento em juntas adesivas: (a) compressão, (b) tração, (c) corte, (d) arrancamento e (e) clivagem.....	33
Figura 14 - Comparativo Tensão de Flexão x Deformação - fibra de vidro e fibra de carbono.....	35
Figura 15 - Configurações dos corpos de prova para o ensaio lap-shear (todas unidades em mm).....	38
Figura 16 - Tecidos de Fibra de Carbono e Fibra de Vidro cortados.....	39
Figura 17 – a) Empilhamento das camadas de Fibra de Vidro; b) Aplicação da matriz polimérica sobre o tecido.....	39
Figura 18 - a) Corpos sob a aplicação do vácuo; b) Pressão de Vácuo mantida constante por 8h.....	40
Figura 19 - Peças após o desmolde.....	40
Figura 20 - Placa de Alumínio preparada para o corte.....	41

Figura 21 - Corpos de prova de Alumínio após lixamento.....	42
Figura 22 - Linhas para auxílio do alinhamento dos corpos de prova	43
Figura 23 - a) Corpos sob a aplicação de vácuo; b) Pressão de Vácuo mantida constante por 8h.....	44
Figura 24 - Eletrodo de Trabalho.....	45
Figura 25 - Composição do Ensaio de Cisalhamento	46
Figura 26 - Célula Eletroquímica Utilizada	48
Figura 27 - Contra Eletrodos Utilizados.....	49
Figura 28 - Potenciostato PalmSens EmStat3+	49
Figura 29 - Superfície das falhas para 50 mm de overlap sem isolamento de PRFV	51
Figura 30 - Gráfico Força x Deslocamento do Grupo 1.....	52
Figura 31 - Superfície das falhas para 50 mm de <i>overlap</i> com isolamento de PRFV dos corpos de prova que obtiveram maiores resistência	53
Figura 32 - Representação da não conformidade de laminação das amostras 5 e 10	53
Figura 33 - Gráfico Força x Deslocamento do Grupo 2.....	54
Figura 34 – Falha do tipo mista, apresentada pelo corpo de prova 13.....	55
Figura 35 - Resistência de uma junta simples em função do comprimento de sobreposição	56
Figura 36 - Gráfico Força x Deslocamento do Grupo 3.....	56
Figura 37 - Gráfico Força x Deslocamento do Grupo 4.....	57
Figura 38 - Superfície após falha da junta 15.....	58
Figura 39 – Falhas na superfície da junta 16	58
Figura 40 - Falhas na superfície da junta 17	59
Figura 41 - Falhas na superfície das juntas 18 e 19.....	59
Figura 42 - Curvas de Potencial de Circuito Aberto	60
Figura 43 - Curvas de polarização	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação da densidade, resistência e resistência específica de diferentes materiais estruturais	20
Tabela 2 – Propriedade do Tecido de Fibra de Carbono UC225 IM	36
Tabela 3 - Propriedades do Tecido de Vidro VEW130	36
Tabela 4 - Propriedades da Resina Epóxi AR260	36
Tabela 5 - Propriedade Mecânicas Alumínio 5083 O/H111	37
Tabela 6 - Número de CPs para Ensaio de Cisalhamento	45
Tabela 7 - Comparação das Forças de Ruptura entre Grupos 1 e 2.....	54
Tabela 8 - Comparação das Forças de Ruptura entre Grupos 3 e 4.....	60
Tabela 9 - Resultados dos Ensaios de Cisalhamento	60
Tabela 10 - Corrente de corrosão, densidade de corrente de corrosão, potencial de corrosão, coeficientes de Tafel anódico e catódico, resistência de polarização e taxa de corrosão das amostras ensaiadas.....	61

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials	-
CP	Corpo de Prova	-
LMF	Laminado Fibra Metal	-
OCP	Potencial de Circuito Aberto (do inglês <i>Open Circuit Potential</i>)	-
PRF	Polímero Reforçado com Fibra	-
PRFC	Polímero Reforçado com Fibra de Carbono	-
PRFV	Polímero Reforçado com Fibra de Vidro	-

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1 Objetivo Principal	16
1.1.2 Objetivos Específicos	16
1.2 JUSTIFICATIVA	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS	18
2.1.2 Fibras de Reforço	19
2.1.3 Matriz Polimérica	20
2.1.4 Processos de Laminação	21
2.1.4.1 Moldagem à Vácuo.....	21
2.1.5 Estrutura Sanduíche.....	22
2.2 LIGAS DE ALUMÍNIO	23
2.2.1 Liga 5083 – O/H111	24
2.3 CORROSÃO GALVÂNICA	24
2.3.1 Corrosão Galvânica nas Uniões de PRFC e Alumínio	26
2.3.2 Ensaio Eletroquímico de Corrosão	27
2.3.2.1 Método de Extrapolação da Reta de Tafel	28
2.3.2.2 Potencial de Circuito Aberto	29
2.4 UNIÃO DE COMPÓSITOS COM ALUMÍNIO	29
2.4.1 Junta Mecânica	30
2.4.2 Junta Adesiva.....	31
2.5 ENSAIOS MECÂNICOS EM MATERIAIS COMPÓSITOS	34
2.5.1 Ensaio de Tração em Materiais Compósitos	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 MATERIAIS	36

3.1.1 Tecido de Fibra de Carbono.....	36
3.1.2 Tecido de Fibra de Vidro	36
3.1.3 Resina Epóxi	36
3.1.3 Liga de Alumínio.....	37
3.1.4 Outros Materiais	37
3.2 CONFIGURAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	37
3.3. FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	38
3.3.1 Corpos de Prova de PRFC e PRFV e Contra Eletrodo	38
3.3.2 Corpos de prova de Alumínio	41
3.3.3 União dos Corpos de Prova	42
3.3.4 Fabricação dos Eletrodos de Trabalho.....	44
3.4 ENSAIO DE CISALHAMENTO.....	45
3.5 ENSAIOS DE CORROSÃO.....	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	51
4.1.1 Ensaio de Cisalhamento.....	51
4.1.1.1 Resultados para o Grupo 1	51
4.1.1.2 Resultados para o Grupo 2	52
4.1.1.3 Resultados para o Grupo 3	54
4.1.1.4 Resultados para o Grupo 4	57
4.1.2 Ensaio de Corrosão.....	60
5 CONCLUSÃO	63
5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	63
REFERÊNCIAS.....	64
APÊNDICE A – DADOS DE SAÍDA DA MÁQUINA DE ENSAIO DE CISALHAMENTO	67
APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO PRFV E PRFC	69

ANEXO A – DATASHEET ALUMÍNIO 5083 – H111 HYDRO	73
ANEXO B – DATASHEET SISTEMA DE RESINA AR260 E AH260	74

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos séculos, a evolução do conhecimento esteve intimamente ligada ao aprimoramento e ao desenvolvimento de novos materiais, que permitiram atingir duas das mais importantes etapas do progresso humano: a navegação marítima e a exploração do espaço (MARINUCCI, 2011).

A partir da década de 60, os materiais compósitos de alto desempenho foram introduzidos de maneira definitiva em projetos de engenharia, para a fabricação de peças destinadas a diversos setores industriais, em particular às indústrias naval, automobilística, eletrônica, de construção civil e aeroespacial (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

A exigência dos requisitos de desempenho em estruturas aeroespaciais vem propiciando o desenvolvimento de novos materiais, bem como de novas técnicas de fabricação. Normalmente elevados valores de resistência e rigidez específica são procurados, obtendo-se frequentemente soluções por meio da utilização de materiais compósitos, particularmente polímeros termofixos dotados de reforços fibrosos (MARINUCCI, 2011).

Conforme Kocik et al. (2006, apud WOTTSCHEL, 2013), projetos leves e modernos incluem um número crescente de estruturas multimateriais para adaptar as propriedades às exigências locais específicas. Estruturas híbridas são aplicadas em aviação, engenharia automotiva e náutica (SCHUMACHER et al., 2007, apud WOTTSCHEL, 2013). O resultado é a necessidade de uniões híbridas apropriadas. Especialmente, metais leves e Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC), (WOTTSCHEL, 2013).

Os Laminados Metal-Fibra (LMF) têm recebido muita atenção para aplicações estruturais nos últimos 20 anos. Eles foram introduzidos em aplicações como na fuselagem da aeronave Airbus A380, em regiões inferiores das asas e em algumas partes internas das aeronaves (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

O assunto de junção de metal-compósito recebeu atenção crescente nos últimos anos devido ao desejo de obter propriedades otimizadas em diferentes locais de uma estrutura. Em muitas aplicações, a introdução de compósitos pode contribuir para uma redução geral de peso, no entanto, as interfaces de união compósito/estrutura metálica são desafiadoras (JOESBURY et al., 2018).

De acordo com Yari (2017), apesar das ótimas propriedades dos PRFCs, há problemas com o uso deste tipo de compósito e metais juntos. As fibras de carbono nos PRFCs fazem com que esse material se torne eletricamente condutivo. As fibras de carbono são eletricamente condutivas e, no aspecto eletroquímico, são condutoras e muito nobres. Portanto, quando um metal está em contato com um PRFC, ele é mais suscetível à corrosão galvânica. Essa situação se torna pior quando uma grande área de superfície de componentes compostos de carbono é acoplada a pequenas peças metálicas (como fixadores, parafusos e porcas). Nestas circunstâncias, a taxa de corrosão galvânica é alta devido à elevada razão de área de superfície cátodo-ânodo.

Ainda conforme Yari (2017), a corrosão galvânica de metais acoplados a compostos de carbono não é uma questão nova. Tem sido relatado desde a década 1960, mas esse problema ainda não foi resolvido.

Existem algumas formas de prevenir a corrosão galvânica (SIGAGNA et al., 2014). Segundo Hakansson (2016), a prática geral na engenharia é evitar o contato entre os metais menos nobres na tabela galvânica e o PRFC (ou materiais similares contendo carbono) em qualquer aplicação onde a umidade possa estar presente. A solução mais comum é isolar o PRFC do metal com uma camada de PRFV.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Principal

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo comparativo da influência do polímero reforçado com fibra de vidro como material de isolamento contra a corrosão galvânica nas propriedades mecânicas da junta PRFC/Alumínio.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar e analisar as propriedades mecânicas das uniões PRFC/PRFV/Alumínio e PRFC/Alumínio;
- Estudar e analisar corrosão galvânica das uniões PRFC/PRFV/Alumínio e PRFC/Alumínio.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os problemas de corrosão são frequentes e ocorrem nas mais variadas atividades. As perdas econômicas que atingem essas atividades podem ser classificadas em diretas e indiretas. A indústria aeronáutica tem grande preocupação com a manutenção de aviões e helicópteros para evitar, ou minimizar, processos de deterioração que poderiam causar custos diretos elevados e perda de vidas humanas (GENTIL, 2012).

Gentil (2012) ainda afirma que quanto mais avançado tecnologicamente for um país, mais elevado o seu gasto com corrosão. Assim, pode-se considerar que a corrosão avança paralelamente ao desenvolvimento tecnológico e, por isso, as medidas para sua prevenção e combate não podem ser relegadas a plano secundário.

Segundo a International Zinc Association (2016, apud FATOR BRASIL, 2016), 4% do PIB brasileiro, o equivalente a 236 bilhões de reais, é consumido pela corrosão. O impacto é grande, agravado pela extensão litorânea do Brasil, onde os níveis de corrosão podem ser até 150 vezes superiores aos da zona rural. O mesmo relatório ainda indica que a corrosão poderia ser facilmente atenuada com as tecnologias já existentes de proteção a estruturas metálicas.

Apesar da prática de isolar o PRFC da peça metálica com PRFV ser muito utilizada, quase sempre é feita de maneira empírica, não havendo conhecimento da influência dessa aplicação nas propriedades mecânicas das juntas e do laminado como um todo. Há poucos estudos na literatura sobre a influência deste e de outros tipos de isolamentos nas uniões metais-PRFC.

Sendo assim, pelas questões apresentadas, o presente trabalho visa o estudo das propriedades mecânicas de diferentes tipos de uniões resistentes à corrosão galvânica, entre metais e PRFC. Além disso, é feito um levantamento de dados do comportamento mecânico de tais junções por meio de ensaios mecânicos.

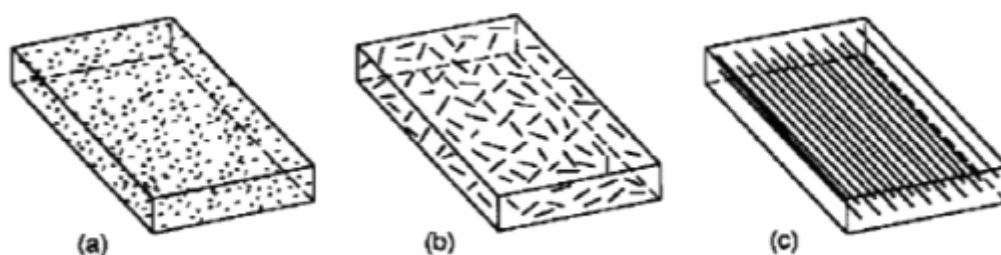
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Materiais compósitos são materiais formados por duas ou mais fases que exibem uma proporção significativa de propriedades das fases que o constrói, de forma a obter um desempenho superior se comparado a cada material constituinte de forma individual (FILHO, 2017).

Para Marinucci (2011), a definição atual de compósito ou material compósito, passa a admitir que as fases constituintes apresentem nítida diferença nas propriedades físicas e químicas, mostrando uma fase descontínua e uma fase contínua. Onde a fase descontínua é chamada de reforços, enquanto a fase contínua é denominada de matriz.

Os compósitos podem ser formados por elementos particulados, fibrados ou fibra/metal (MARTINUCCI, 2011). Alguns desses arranjos são mostrados na Figura 1. Os reforços encontrados em uso na indústria para a fabricação de componentes estruturais são: fibra de carbono, fibra de vidro, fibra de boro e aramida (NARITA, 2010).



Fonte: Jones (1999).

Reforços de fibras contínuas possuem resistência muitas vezes maior que o mesmo material em seu estado maciço (MOURA; DE MORAIS; MAGALHÃES, 2005). Narita (2010) cita a fibra de vidro como um exemplo desta constatação. A maior resistência do vidro na forma de fibras se deve à redução da quantidade e do tamanho de defeitos críticos que levam à fratura, como demonstrado por Griffith (1921). O reforço é o responsável pela resistência ao carregamento e tem uma maior influência

sobre as propriedades mecânicas do material final (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

A característica anisotrópica e a possibilidade de formular os laminados com as propriedades mecânicas adequadas para cada aplicação torna os compósitos um tipo de material de engenharia estratégico para aplicações estruturais (CARVALHO, 2014, apud COSTA, 2018).

2.1.2 Fibras de Reforço

Dentro da estrutura do material compósito, as fibras são responsáveis pela transferência das tensões através da matriz de resina. Geralmente, quanto maior a quantidade de fibras, maior a resistência do laminado, entretanto a partir de 70% de fração em volume, a tendência é haver redução das propriedades mecânicas (NASSEH, 2007).

As fibras de vidro têm boas propriedades elásticas e um baixo custo o que as torna atrativas para competir com os metais não ferrosos, como o alumínio, por exemplo. As fibras de carbono apresentam excepcional resistência e módulo específico, permitindo que se tornem ideais para aplicações que requerem elevada resistência, rigidez e reduzido peso. As fibras aramidas possuem boa resistência mecânica e apresentam um módulo de elasticidade intermediário entre fibras de vidro e a fibra de carbono, sendo bastante empregadas em componentes que necessitam de resistência a impacto (MARINUCCI, 2011).

As fibras de carbono são as mais indicadas a aplicações com maior desempenho. Embora tenham melhores propriedades mecânicas quando comparadas às fibras de vidro ou de aramida, possuem menor resistência ao impacto graças à elevada rigidez, além de, em contato com metais, provocarem corrosão galvânica (COMPOSITESWORLD, 2015).

Em aplicações de engenharia, quase sempre se procura um material com alta resistência específica, em vez de baixa densidade de massa (YARI, 2017). A Tabela 1 compara a resistência específica de diferentes materiais utilizados em aplicações estruturais.

Tabela 1 - Comparação da densidade, resistência e resistência específica de diferentes materiais estruturais

Material	Densidade de Massa (g/cm ³)	Resistência à Tração (MPa)	Resistência Específica ¹ (kN.m/kg)
Alumínio 7075-T6	2,8	600	214
Liga de Magnésio AZ91D	1,7	230	135
Titânio	4,4	950	216
Aço Carbono (0,45% C)	7,8	850	108
Aço Maraging ²	8,1	2500	300
Compósito de Carbono	1,6	1240	785

Fonte: Yari (2017).

Os materiais com alta resistência mecânica e baixa densidade fornecem uma alta resistência específica¹ e são ideais para aplicações de engenharia. Pode-se notar que os PRFC possuem a maior resistência específica. Esta propriedade dos compósitos de carbono é pelo menos duas vezes maior que o aço maraging², que é caracterizado com a maior resistência entre todos os tipos de aços (YARI, 2017).

2.1.3 Matriz Polimérica

Os materiais mais comumente utilizados como matriz no campo dos materiais compósitos poliméricos são estruturas poliméricas denominadas popularmente de resinas. Estas resinas podem ser classificadas como termofixas ou termoplásticas. Nas primeiras, existem ligações químicas primárias covalentes entre as cadeias poliméricas, as chamadas ligações cruzadas ou reticulações. Estas são formadas durante o processo de cura, no qual, com interligação e exotermia, estas ligações se formam de maneira irreversível. Ou seja, com excesso de temperatura, o material se degradará ao invés de fundir. Já as resinas termoplásticas, não possuem

¹ Resistência específica: Razão entre propriedade mecânica por massa ou volume.

² Aço maraging: Aços de ultra resistência, cujo o limite de escoamento pode atingir 2 GPa.

tais reticulações. Com o aumento da temperatura, as ligações secundárias existentes entre as cadeias podem ser quebradas, possibilitando o amolecimento do material e a obtenção de uma nova conformação (CANEVAROLO JR. 2002, apud GALLI, 2016).

A resina epóxi é uma resina termofixa e será o material utilizado como matriz polimérica neste trabalho. Seu processo de cura pode ocorrer à temperatura ambiente, graças a reticulação proveniente da reação de polimerização com o endurecedor.

2.1.4 Processos de Laminação

Existem vários métodos para fabricar componentes compósitos. Alguns métodos foram adaptados (moldagem por injeção da indústria de plásticos, por exemplo), mas muitos foram desenvolvidos para atender a desafios específicos de projeto ou fabricação enfrentados por polímeros reforçados com fibra. A seleção dependerá do design da peça e do uso final ou da aplicação. (COMPOSITESWORLD, 2015).

Os métodos de fabricação de um material compósito de matriz polimérica reforçados por fibras consistem, de forma geral, na impregnação da fase de reforços com a resina (GALLI, 2016). A seguir será feita uma descrição do processo de moldagem à vácuo, pois é o método de fabricação relevante para este trabalho.

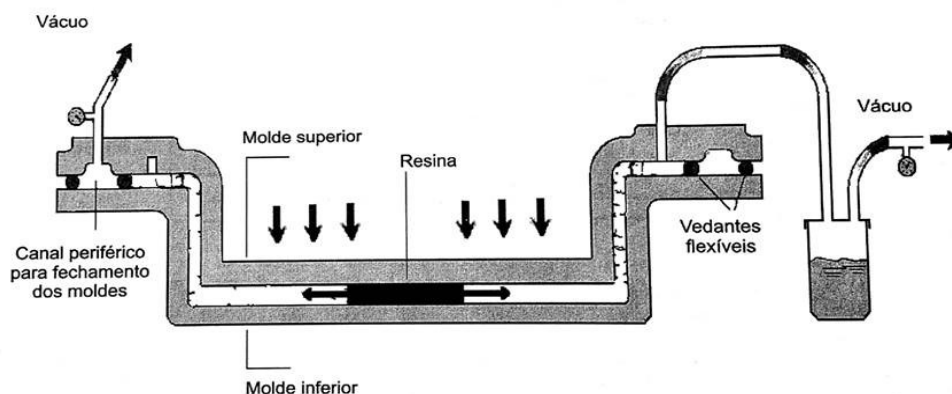
2.1.4.1 Moldagem à Vácuo

O sistema de laminação a vácuo se baseia no uso da pressão atmosférica para compactar o laminado durante seu processo de cura. O laminado é revestido com uma bolsa plástica, que é conectada a uma bomba de vácuo para remover todo o ar existente dentro da cavidade, como representado na Figura 2. O resultado da remoção do ar dentro deste envelope é o aparecimento de uma pressão igual ou menor que a pressão atmosférica pelo lado externo do envelope (NASSEH, 2007).

É um processo para fabricação de peças de pequeno e médio porte, com pouca espessura e em séries relativamente pequenas, que exigem acabamento liso em pelo menos uma das faces (MARINUCCI, 2011).

O reforço é colocado sobre um molde fêmea ainda sem resina ou na forma *prepreg*³, no primeiro caso ele será impregnado de maneira manual por pincel ou rolo. O molde superior, ou bolsa de vácuo, é posicionado e acionado o vácuo pelo canal externo para fechamento dos moldes (MARINUCCI, 2011).

Figura 2 - Ilustração do processo de moldagem à vácuo



Fonte: Marinucci (2011).

2.1.5 Estrutura Sanduíche

As estruturas sanduíche são formadas por duas placas delgadas (faces) de compósito, alumínio ou mesmo outro material, cuja função é promover uma resistência à compressão, bem como às solicitações cisalhantes no plano das placas. Essas placas são separadas por um núcleo para garantir a integridade estrutural do conjunto. Frequentemente são comparadas a estruturas sanduíche com uma viga tipo “I”, onde as faces resistem aos esforços de tração e compressão, como os flanges da viga, e o núcleo resiste ao esforço de cisalhamento entre as faces (MARINUCCI, 2011).

O núcleo também é o principal responsável pela rigidez do sanduíche. A rigidez é estabelecida como sendo o produto do módulo de elasticidade pelo momento de inércia da seção transversal, sendo este último apenas dependente da geometria do elemento. Portanto, ao inserir um núcleo, é possível elevar a rigidez de modo significativo, uma vez que o aumento da espessura proporciona um aumento no momento de inércia da placa, como pode ser observado na Equação 1. Onde $E=$

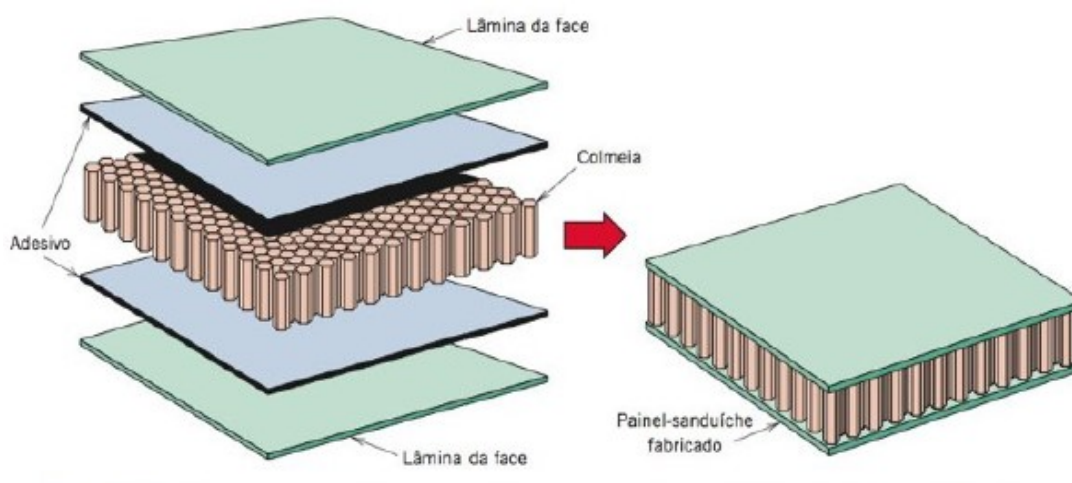
³ Prepeg: Compósito pré-impregnado de fibras de reforço e polímeros aglutinantes (resinas) com os devidos sistemas de iniciação de reação química de polimerização.

módulo de elasticidade, b =largura, t =espessura da placa de face, h =distância entre centros das placas de face (MARINUCCI, 2011).

$$D_s = E \times I = \frac{E \times (b \times t \times h^2)}{2} \quad (1)$$

Existe uma grande variedade de núcleos disponíveis, desde madeira balsa, ao compensado naval, uma variedade de espumas sintéticas e colméias tipo honeycomb. Cada tipo de núcleo possui vantagens e desvantagens, que só podem ser avaliadas de acordo com a aplicação (NASSEH, 2007). Na Figura 3 temos uma ilustração da construção de um painel sanduíche com núcleo de colmeia.

Figura 3 - Esquemático mostrando a construção de um painel sanduíche com núcleo de colmeia.



Fonte: Callister; Rethwish (2012).

2.2 LIGAS DE ALUMÍNIO

Poucas das várias ligas de alumínio são próprias para a construção de barcos, as mais utilizadas são a 5086 e a 5083 por sua boa resistência à corrosão e soldabilidade (NASSEH, 2011).

2.2.1 Liga 5083 – O/H111

A liga 5083 possui de 4,0 a 4,9% de magnésio e 0,05 a 0,25% de cromo e é uma liga não-tratável, cujo a resistência só pode ser aumentada a frio. Do mesmo modo que todas as ligas de alto magnésio da série 5000, o 5083 alcança alta resistência com tratamentos como o encruamento, identificado pela letra “H” (ATLAS STEELS, 2013). Também pode ser submetida a tratamentos térmicos como de estabilização e recozimento, identificado pela letra “O” (ABAL, 2017).

Possui uma ótima resistência à corrosão em uma variedade de atmosferas corrosivas, como no processamento de alimentos e aplicações arquitetônicas. Mas a principal aplicação para o 5083 são as atmosferas marinhas. O teor de magnésio superior a 3,5% torna a liga suscetível a trincas sob tensão, o que limita sua aplicação a menos de 65°C (ATLAS STEELS, 2013).

2.3 CORROSÃO GALVÂNICA

Quando dois materiais, com diferentes potenciais, estão em contato em um eletrólito, ocorre uma diferença de potencial e a consequente transferência de elétrons. Tem-se então o tipo de corrosão chamado corrosão galvânica, que resulta do acoplamento de materiais dissimilares imersos em um eletrólito, causando uma transferência de carga elétrica de um para outro, por terem potenciais elétricos diferentes. Ela se caracteriza por apresentar corrosão localizada próxima à região do acoplamento, ocasionando profundas perfurações no material metálico que funciona como ânodo (GENTIL, 2012).

A corrosão galvânica é um dos tipos mais comuns de corrosão. Pode ser encontrada na junção de uma tubulação de água, onde um tubo de cobre encontra um tubo de aço, ou em um material compósito com matriz de metal no qual materiais de reforço, como carbono, são dispersos em um metal, ou em uma embarcação metálica, onde vários componentes imersos em água são feitos de diferentes ligas metálicas. Em muitos casos, a corrosão galvânica pode resultar na rápida deterioração dos metais, mas, em outros casos, a corrosão galvânica de um metal pode resultar na proteção contra corrosão de um metal conectado, que é a base da proteção catódica por ânodos de sacrifício. A corrosão galvânica é um assunto extensivamente investigado e é qualitativamente bem entendido, mas, devido à sua

natureza altamente complexa, tem sido difícil lidar de forma quantitativa até recentemente (ZHANG, 2011)

A água do mar permite a passagem de corrente elétrica entre materiais condutores de potenciais diferentes, quando estão em contato ou próximos um do outro. A corrente passa do ânodo para o cátodo, ou seja, os fixadores anódicos (menos nobres) são atacados e destruídos pela corrosão galvânica (NASSEH, 2011).

A morfologia e a intensidade da corrosão galvânica dependem fortemente do tipo de metal conectado aos compostos de carbono, da relação entre a área de superfície cátodo-ânodo e das condições ambientais (YARI, 2017).

Uma tabela de grande utilidade é chamada tabela prática em água do mar, onde os principais metais e as ligas mais usadas estão dispostos seguindo sua maior ou menor tendência a sofrer corrosão, conforme seu potencial de oxidação (GENTIL, 2012). A Figura 4 mostra essa tabela. Quando a união for de diferentes metais, eles devem estar relativamente próximos na tabela, diminuindo a diferença de potencial e, conseqüentemente, o processo corrosivo.

Figura 4 - Tabela prática em água do mar

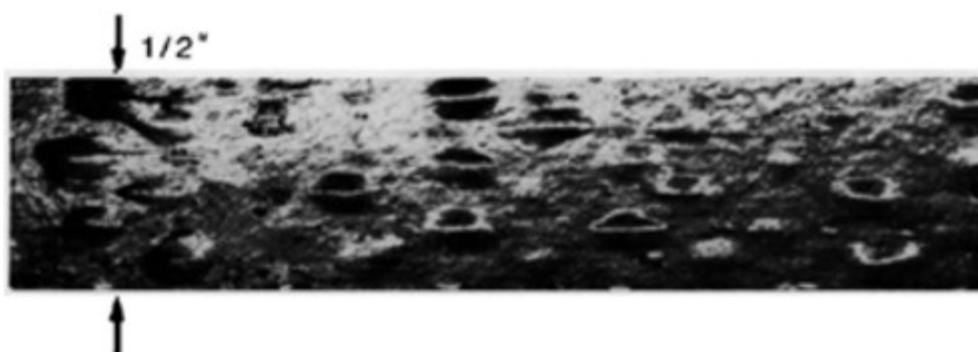
Extremidade anódica (corrosão)	
1. Magnésio	24. Latão Almirantado
2. Ligas de Magnésio	25. Latão Alumínio
3. Zinco	26. Latão Vermelho
4. Alclad 38	27. Cobre
5. Alumínio 3S	28. Bronze
6. Alumínio 61S	29. Cupro-Níquel 90/10
7. Alumínio 63S	30. Cupro-Níquel 70/30 (baixo teor de ferro)
8. Alumínio 52	31. Cupro-Níquel 70/30 (alto teor de ferro)
9. Cádmio	32. Níquel (passivo)
10. Aço doce	33. Inconel (passivo)
11. Aço baixo teor liga	34. Monel
12. Aço liga	35. Hastelloy C
13. Ferro fundido	36. Aço AISI 410 (passivo)
14. Aço AISI 410 (ativo)	37. Aço AISI 430 (passivo)
15. Aço AISI 430 (ativo)	38. Aço AISI 304 (passivo)
16. Aço AISI 304 (ativo)	39. Aço AISI 316 (passivo)
17. Aço AISI 316 (ativo)	40. Titânio
18. Chumbo	41. Prata
19. Estanho	42. Grafite
20. Níquel (ativo)	43. Ouro
21. Inconel (ativo)	44. Platina
22. Metal Muntz	Extremidade catódica
23. Latão Amarelo	(proteção)

Fonte: Gentil (2012).

2.3.1 Corrosão Galvânica nas Uniões de PRFC e Alumínio

O alumínio e suas ligas são extremamente vulneráveis à corrosão galvânica quando unidos a um compósito reforçado com fibra de carbono. Esta união não só causará problemas para o metal, mas também para o PRFC. Isto devido ao fato de que, com o aumento da presença do gás hidrogênio nos locais defeituosos do compósito (como vazios e rachaduras), bolhas com hidrogênio podem se formar na superfície do compósito (YARI, 2017). A Figura 5 mostra bolhas em um PRFC que foi unido a um componente de alumínio na água do mar.

Figura 5 - Bolhas formadas em compósito de fibra de carbono acopladas ao alumínio na água do mar



Fonte: W.C. Tucker (1989, apud Yari, 2017).

Yari (2017), Gentil (2012) e Sigagna et al. (2014) apresentam algumas maneiras de mitigar a corrosão de metais conectados a PRFC:

- Substituir a parte metálica por uma liga de alta resistência à corrosão. Nestes casos, a melhor opção é o titânio e suas ligas;
- Usar resinas epóxi sem qualquer ligação hidrolisável, como ligações de éster, para reduzir a penetração da água no compósito e, em seguida, diminuir a área da superfície catódica;
- Usar adesivos de colagem como um vedante na superfície das fibras de carbono antes de fabricar compósitos;

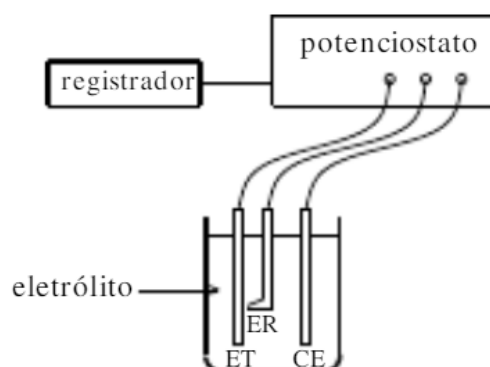
- Seleção de materiais de potenciais próximos;
- Estabelecer condições de relação área anódica/área catódica maior que um;
- Isolamento elétrico entre os materiais de potenciais diferentes colocando um material eletricamente isolante, como polímero reforçado com fibra de vidro, entre elas. Esta é a opção escolhida para este estudo.

2.3.2 Ensaio Eletroquímico de Corrosão

Para a determinação da taxa de corrosão são utilizados os ensaios eletroquímicos. Para isto, utiliza-se um equipamento denominado potenciostato

Figura 6 - Arranjo esquemático para levantamento de curvas de polarização. ET= eletrodo de trabalho; ER= eletrodo de referência; CE= contra eletrodo.

(WOLYNEC, 2003).
uma representação
ensaio que utiliza o



A Figura 6 é
um arranjo de
potenciostato.

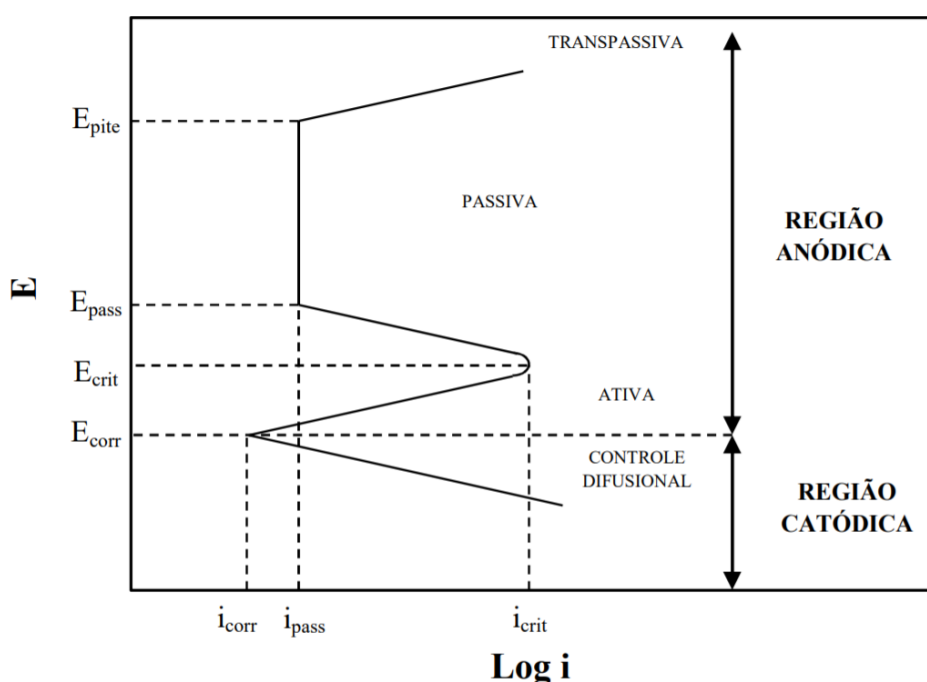
Fonte: Woly nec (2003).

O potenciostato é um equipamento que tem como principal atributo a capacidade de impor ao eletrodo de trabalho o potencial desejado. Ou seja, o potencial do metal sob análise é mantido constante a um valor positivo ou negativo em relação ao eletrodo de referência (WOLYNEC, 2003).

A corrente é uma medida direta da velocidade de corrosão instantânea. Os experimentos podem ser de polarização catódica e anódica. Através da técnica de polarização potenciodinâmica é possível fazer o levantamento da curva de polarização do metal dentro da solução de ensaio (neste trabalho uma solução aquosa de NaCl).

A curva de polarização é obtida por meio de uma varredura linear em um determinado intervalo de potenciais, a baixas velocidades de varredura. Assim, é determinada uma corrente anódica (i_a) e outra catódica (i_c). O potencial em que os valores das correntes anódica e catódica são iguais é denominado potencial de corrosão (E_{corr}). O potencial aplicado e a corrente são registrados e plotados como curvas de polarização em um gráfico do logaritmo da corrente em função do potencial, como representado na Figura 7 (PAGOTTO, 2013).

Figura 7 – Representação do potencial E em função do Log i para análise de corrosão por extrapolação das retas de Tafel



Fonte: Pagotto (2013).

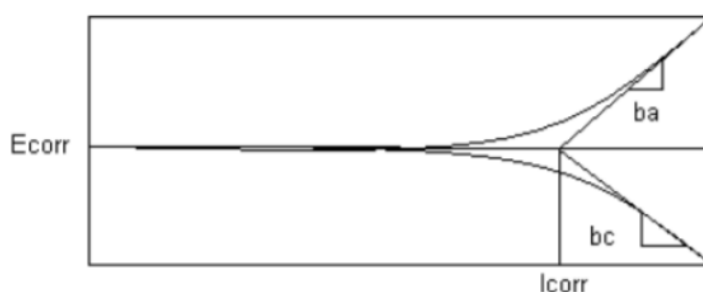
A partir de E_{corr} , com o aumento do potencial, a corrente também aumenta até serem atingidos os valores de potencial crítico de passivação (E_{crit}) e a corrente crítica (i_{crit}), onde a transição ativo-passivo ocorre (SILVEIRA, 2018).

2.3.2.1 Método de Extrapolação da Reta de Tafel

A técnica de extrapolação de Tafel baseia-se na teoria de potencial mista, a qual afirma que a reação anódica e catódica são realizadas simultaneamente, de modo que a densidade de corrente total é a diferença de correntes das reações (WOLYNEC, 2003).

Esta técnica é utilizada para medir i_{corr} , então, assim, a velocidade de corrosão é calculada. Uma curva de Tafel proporciona diretamente a i_{corr} , através das inclinações de Tafel, anódica B_a e catódica B_c . Um método de extrapolação é traçando uma linha ao longo da porção linear da curva anódica ou catódica até interceptar o eixo Y (E_{corr}), como representado na Figura 8. Em condições ideais, a curva de Tafel deve ser linear em algum intervalo de potenciais (ROJAS, 2014).

Figura 8 - Determinação das inclinações numa curva de Tafel



Fonte: Wolynech (2003, apud ROJAS).

2.3.2.2 Potencial de Circuito Aberto

As medidas de Potencial de Circuito Aberto (OCP) são feitas a partir do potencial do eletrodo de trabalho em contraste a um eletrodo de referência. Os resultados permitem avaliar a variação dos potenciais em determinada solução (PAGOTTO, 2013).

2.4 UNIÃO DE COMPÓSITOS COM ALUMÍNIO

Messler (2004) destaca que os tipos de uniões são, principalmente, selecionadas de acordo com o tipo de matriz do compósito. Para os compósitos com matriz poliméricas, há duas opções básicas: colagem adesiva e fixação mecânica. Os que possuem matriz de um polímero termoplástico, soldagem ou ligação térmica também é uma técnica utilizada com frequência. Neste trabalho, foi utilizada a colagem adesiva.

Segundo Bashford (1986), Davies et al (1991) e Groß et al (1990), respectivamente, conforme citado por Woizeschke (2013), para unir peças de metal e PRFC é necessária uma sobreposição para permitir juntas por união mecânica (parafusos e rebites, por exemplo), colagem adesiva ou técnicas combinadas de junção.

2.4.1 Junta Mecânica

É o tipo de união entre componentes por meio da utilização de um componente mecânico. Neste tipo de junta, o componente mecânico, ou fixador, promove a união das peças através de esforços puramente mecânicos transmitidos pelo fixador ou pela interface de junção, como atrito, por exemplo (MESSLER, 2004, apud NARITA, 2010).

Nos PRFC e outros compósitos, a resistência mecânica pode ser consideravelmente afetada devido a introdução de furos para estes fixadores. Isto é, em parte, devido à grande concentração de tensão (mensurada por um fator K) que ocorre na região de descontinuidade estrutural. Fatores de concentração de tensão podem ser de até $K=8$ em compósitos, contra $K=3$ para materiais isotrópicos. Isso é resultado, em partes, da falta de plasticidade do PRF (MESSLER, 2004). A furação ainda pode se comportar como um iniciador de delaminação e promover trincas nas camadas de laminados (PRAMANIK et al., 2017). A Figura 9 mostra a delaminação ocasionado no laminado devido a um esforço na união mecânica.

Figura 9 - Delaminação após a falha de uma junta mecânica por parafuso

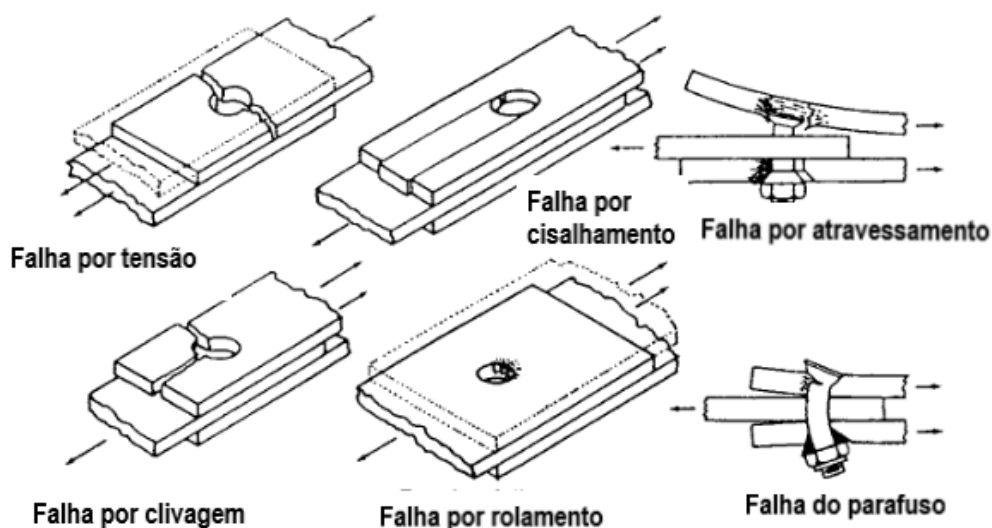


Fonte: Kweon, et al. (2006, apud PRAMANIK et al., 2017).

Além da delaminação, juntas fixadas em PRF exibem os mesmos modos básicos de falha que os metais (ou seja, tensão, rolamento e cisalhamento). Dois

modos adicionais de falha também podem ser possíveis em compósitos: a clivagem e o atravessamento. Esses modos de falha são mostrados na Figura 10. Os mecanismos de falha são complexos e variados em comparação com os metais e dependem do tipo e orientação da fibra de reforço, tratamento superficial, projeto de junta, qualidade de furo e tipo de matriz (MESSLER, 2004).

Figura 10 - Ilustração dos modos de falhas para juntas mecânicas em materiais compósitos



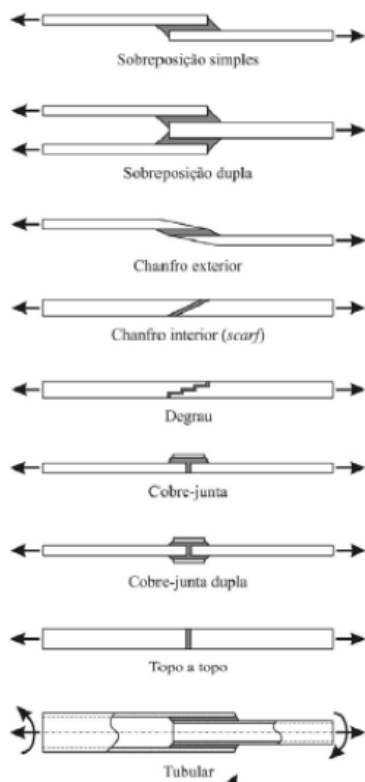
Fonte: Smith (1986, apud MESSLER, 2004).

2.4.2 Junta Adesiva

A colagem ou união adesiva é um processo de união que envolve a utilização de um adesivo ou agente químico. As forças que promovem este tipo de junção são de natureza química, mas também podem ser mecânicas ou eletrostáticas (MESSLER, 2004, apud NARITA 2010).

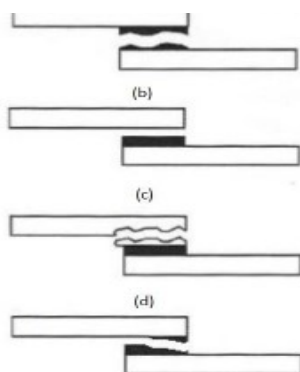
Os adesivos mais utilizados para as uniões são os adesivos poliméricos sintéticos que são, geralmente, semelhantes à matriz do compósito ou compatível com ela. Os epóxis têm sido a matriz mais comum para PFRC, assim os adesivos epóxi também têm sido os tipos mais comuns usados em junções (MESSLER, 2004). Uma prática comum em junções adesivas é a inserção de cargas de baixa densidade no adesivo, a fim de reduzir a sua densidade e aumentar sua tixotropia. Os tipos de juntas adesivas são apresentados na Figura 11, os tipos de ruptura são mostrados na Figura 12 e a Figura 13 ilustra os tipos de carregamento que as juntas adesivas podem sofrer.

Figura 11 - Tipos de juntas adesivas mais comuns



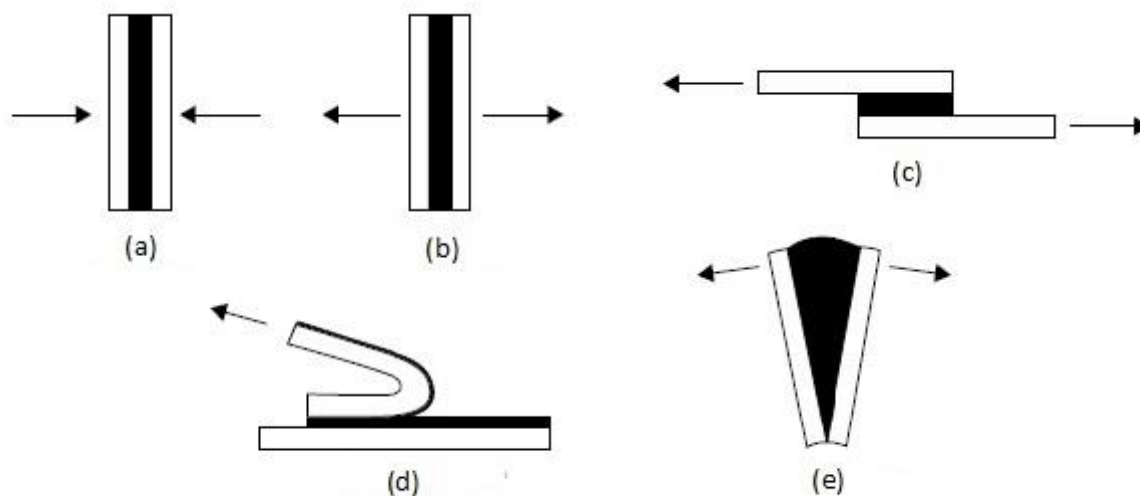
Fonte: da Silva, Magalhães e Moura (2007, apud XARÁ, 2016).

Figura 12 - Modos de ruptura em juntas adesivas: (a) ruptura coesiva, (b) ruptura adesiva, (c) ruptura do compósito e (d) ruptura mista



Fonte: da Silva, Magalhães e Moura (2007, apud XARÁ, 2016).

Figura 13 - Modos de carregamento em juntas adesivas: (a) compressão, (b) tração, (c) corte, (d) arrancamento e (e) clivagem



Fonte: Ebnesajjad (2008, apud XARÁ, 2016).

As ligações adesivas apresentam diversas vantagens em relação às junções mecânicas. Xará (2016) apresentou algumas delas:

- Distribuição mais uniforme das tensões ao longo da interface ligada, aumentando a rigidez e transmissão de carga, possibilitando também uma redução de peso, menor custo e melhor resistência à fadiga;
- Amortecimento de vibrações, permitindo a absorção parcial das tensões, melhorando a resistência à fadiga;
- Ligação eficiente de chapas finas;
- Permite estruturas com contornos regulares;
- Maior flexibilidade no projeto de juntas;
- Permite ligar componentes de todas as formas;
- Minimização ou prevenção da corrosão galvânica;
- Permite estruturas com melhor relação peso/resistência.

As principais desvantagens, também citadas por Xará (2016), deste tipo de união são:

- É necessário um projeto de ligação que reduza ao máximo esforços de arrancamento, clivagem e impacto;

- Quando um dos dois materiais unidos não é rígido, a ligação pode estar sujeita a esforços de arrancamento e quando os dois materiais são rígidos, a ligação pode estar sujeita a esforços de clivagem;
- É muito importante utilizar geometrias que evitem tensões localizadas e que deem uma distribuição uniforme de esforços. Se as tensões não estiveram perpendiculares ao adesivo, podem-se originar esforços de arrancamento ou de clivagem;
- Resistência limitada a condições de temperatura e umidade extremas devido à natureza polimérica do adesivo;
- A ligação não é, normalmente, realizada instantaneamente e por isso é necessária a utilização de ferramentas de fixação para manter as peças em posição durante o processo de cura;
- É necessário um preparo das superfícies que serão unidas;
- Dificuldade no controle de qualidade;
- Alguns adesivos necessitam ser curados em elevadas temperaturas para melhor desempenho;
- Inexistência de um critério de dimensionamento universal que permita projetar qualquer estrutura.

Os adesivos funcionam pela capacidade de adesão. Esta é a propriedade de atração entre duas substâncias resultante de forças intermoleculares que se estabelecem entre elas. Este conceito é diferente de coesão, que só envolve forças intermoleculares dentro de uma substância. As forças intermoleculares que atuam na adesão e na coesão são principalmente forças de van der Waals (DA SILVA, ÖCHSNER E ADAMS, 2011, apud XARÁ 2016).

2.5 ENSAIOS MECÂNICOS EM MATERIAIS COMPÓSITOS

Para Garcia, Spim e dos Santos (2008), os ensaios mecânicos permitem a determinação de propriedades mecânicas que se referem ao comportamento do material quando sob a ação de esforços e que são expressos em função de tensões e/ou deformações. Tensões representam resposta interna aos esforços externos que atuam sobre uma determinada área em um corpo.

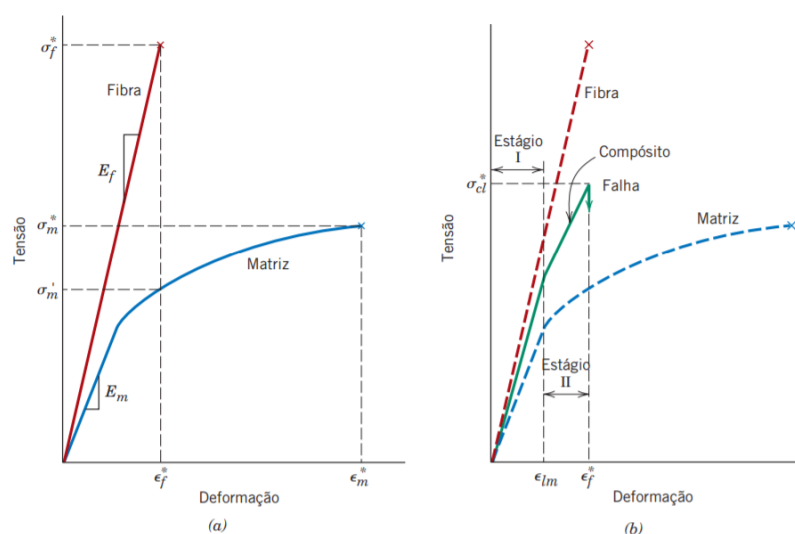
2.5.1 Ensaio de Tração em Materiais Compósitos

O comportamento dos materiais compósitos é diferente do apresentado pelos materiais metálicos, já que para os polímeros reforçados com fibras as propriedades são dadas pela soma das contribuições do reforço (fibra) e da matriz. O início da falha do compósito ocorre conforme as fibras começam a fraturar (CALLISTER, 2012). A norma que regulamenta o ensaio de tração em materiais compósitos é a ASTM D3039.

As curvas de tensão-deformação dos compósitos podem ser divididas em dois estágios, como mostrado na Figura 14. No Estágio I, a fibra e matriz se deformam elasticamente; geralmente, esse estágio apresenta um comportamento linear. No Estágio II, a matriz escoou e se deforma plasticamente, enquanto as fibras continuam a deformar elasticamente. Isso se deve ao limite de resistência à tração das fibras que é significativamente maior do que o limite de escoamento da matriz (CALLISTER, 2012).

Os compósitos não apresentam falha catastrófica. Primeiro por nem todas as fibras fraturarem ao mesmo tempo, pois sempre existe uma variação considerável na resistência à fratura dos materiais fibrosos frágeis. Segundo pela matriz suportar deformações maiores que as fibras, dessa forma as fibras fraturadas (mais curtas que as originais) continuarão inseridas na matriz ainda sendo capazes de suportar cargas reduzidas enquanto a matriz continua seu processo de deformação plástica (CALLISTER, 2012).

Figura 14 - Comparativo Tensão de Flexão x Deformação - fibra de vidro e fibra de carbono



Fonte: Callister (2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Tecido de Fibra de Carbono

O tecido de fibra de carbono utilizado neste estudo foi unidirecional 0° de módulo intermediário, UC225 IM, fabricado nos Estados Unidos e comprado de um distribuidor brasileiro. As propriedades do material informadas pelo distribuidor estão apresentadas na Tabela 2:

Tabela 2 – Propriedade do Tecido de Fibra de Carbono UC225 IM

	Propriedades	Valores
Tecido de Fibra de Carbono UC225 IM	Densidade	225 g/m ²
	Módulo de Elasticidade	280 GPa
UC225 IM + AR260 Laminado à Vácuo	Módulo de Elasticidade	113,73 GPa

Fonte: e-

3.1.2 Tecido de Fibra de Vidro

O tecido de fibra de vidro escolhido para este trabalho foi unidirecional de 0° de fibra de vidro tipo E, VEW130, fabricados nos Estados Unidos e comprado de um distribuidor brasileiro. Algumas propriedades do material fornecidas pelo distribuidor estão apresentadas na Tabela 3:

Tabela 3 - Propriedades do Tecido de Vidro VEW130

	Propriedades	Valores
Tecido de Fibra de Vidro VEW130	Densidade	450 g/m ²
	Módulo de Elasticidade	26,27 GPa
VEW + AR260 Laminado à Vácuo	Módulo de Elasticidade	36,63 GPa

Fonte: e-

3.1.3 Resina Epóxi

A matriz polimérica e adesivo utilizados neste estudo foi a resina epóxi AR260 em conjunto com o endurecedor AH260. Este adesivo tem sido muito utilizado na indústria náutica e possui as propriedades informadas na Tabela 4:

Tabela 4 - Propriedades da Resina Epóxi AR260

	Propriedades	Valores
Resina AR260	Densidade	60 kg/m ³
	Módulo de Elasticidade	2,8 – 3,2 GPa

Fonte: e-

3.1.3 Liga de Alumínio

A liga de alumínio utilizada foi a 5083 – O/H111, sendo o Magnésio o principal elemento de liga. Esta liga se destaca por sua resistência à corrosão e por possuir boa previsibilidade de resistência pós-soldagem (HYDRO, 2019). O material em estudo foi fornecido em chapas nas dimensões 300 mm por 300 mm, com 3 mm de espessura e foi uma contribuição da Nork Hydro ASA, Noruega. As propriedades mecânicas desta liga são apresentadas na Tabela 5:

Tabela 5 - Propriedade Mecânicas Alumínio 5083 O/H111

	Propriedade	Valores
Alumínio 5083	Densidade	2660 kg/m ³
	Módulo de Elasticidade	70 GPa

Fonte: Hydro (2019).

3.1.4 Outros Materiais

Estão listados abaixo alguns equipamentos pertencentes à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Pato Branco e à Gatron – Inovação em Compósitos que foram utilizados para o desenvolvimento experimental deste trabalho:

- Máquina Universal de Ensaio – EMIC;
- Bomba de Vácuo;
- Vacuômetro;
- Potenciostato.

3.2 CONFIGURAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

As configurações dos corpos de prova foram baseadas nas recomendações da norma ASTM D3164 e adaptada conforme o estudo de (PALMARES, 2016) para uma melhor adequação aos materiais compósitos de matrizes poliméricas. A norma recomenda o *overlap*⁴ de 12,7 mm, enquanto a medida industrial mais comum e estudada por Palmares (2016) é 50 mm e então estas duas dimensões foram utilizadas neste estudo. A espessura dos corpos de prova dos PRF são de difícil previsão, então são controladas por sua quantidade de camadas. Neste estudo tanto os corpos de prova de PRFC, quando os isolamentos de PRFV foram fabricados com 10 camadas de tecido, resultando em espessuras aproximadas de 2,0

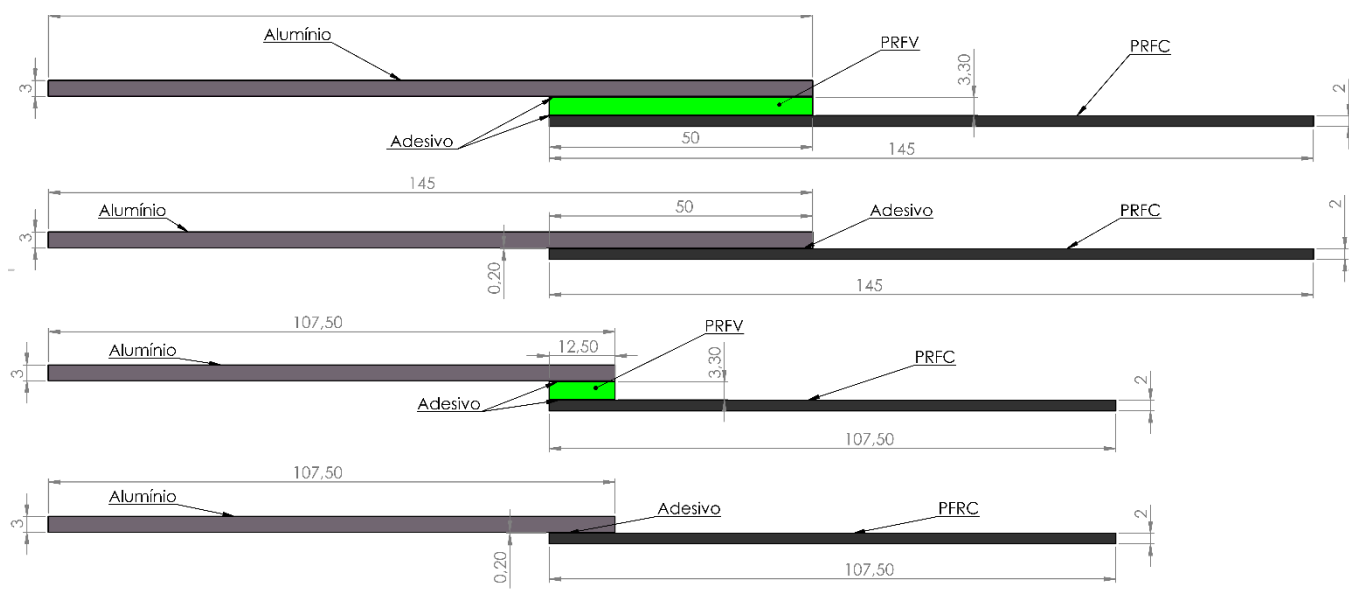
⁴ **Overlap: sobreposição dos substratos.**

mm e 3,3 mm, respectivamente. Os corpos de prova de alumínio ensaiados possuem os mesmos 3,0 mm de espessura das placas fornecidas.

Não foi possível cortar as chapas da maneira desejada, sem danificar os materiais e com um bom controle das dimensões, devido à alta resistência desses materiais e difícil acesso às ferramentas adequadas.

Assim, as configurações escolhidas são apresentadas na Figura 15:

Figura 15 - Configurações dos corpos de prova para o ensaio lap-shear (todas unidades em mm)



Fonte: Autoria Própria 2019.

3.3. FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

3.3.1 Corpos de Prova de PRFC e PRFV e Contra Eletrodo

O processo de laminação dos corpos de prova de PRFC e PRFV foram fabricados no Laboratório de Tecnologia Automotiva da UTFPR – Câmpus Pato Branco pelo método de modelagem a vácuo, seguindo os procedimentos:

1. Os tecidos foram cortados em medidas para fabricação de placas para um melhor aproveitamento. Foram cortadas dez camadas para cada medida (Figura 16). Também foram laminadas pequenas tiras de fibra de carbono: quatro não envolvidas por fibra de vidro e três com esse isolamento para serem utilizados como contra eletrodos nos ensaios de corrosão;

2. Foi utilizado uma placa de vidro como molde para as placas. A superfície foi preparada com a aplicação de cera desmoldante e posteriormente polida com estopa;

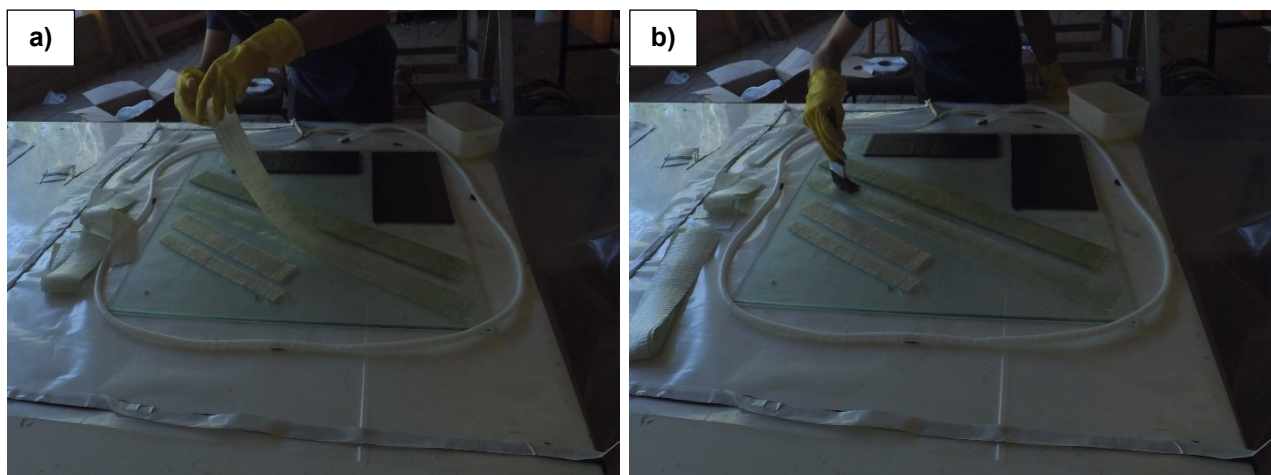
Figura 16 - Tecidos de Fibra de Carbono e Fibra de Vidro cortados



Fonte:

3. As camadas de tecidos foram empilhadas manualmente, mantendo a orientação das fibras no mesmo sentido, sendo impregnadas camada a camada com resina epóxi (Figura 17);

Figura 17 – a) Empilhamento das camadas de Fibra de Vidro; b) Aplicação da matriz polimérica sobre o tecido.



Fonte:

4. Foi utilizado o tecido *peel-ply*, que garante ao laminado uma superfície texturizada, que permite uma melhor adesão para uma união adesiva posterior;

5. Após a aplicação do *peel-ply*⁵, ainda foi empregado o filme perfurado e o *breather* para controle do teor de resina que permanecerá no laminado após o processo;
6. Um vácuo com pressão de 600 mBar (450 cmHg) por 8 horas nos tecidos impregnados (Figura 18);

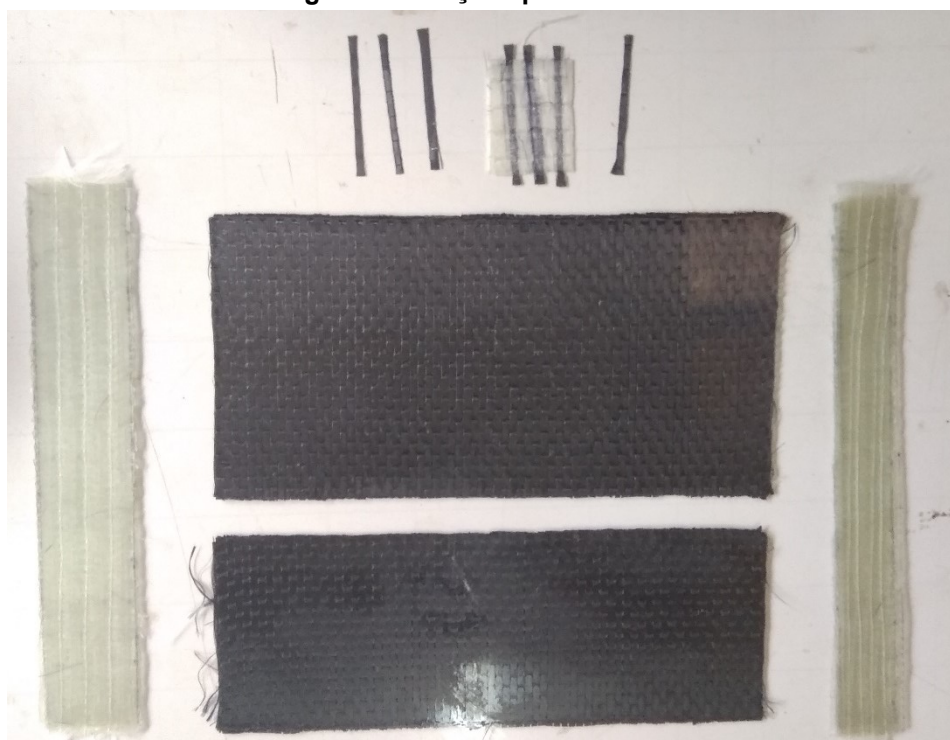
Figura 18 - a) Corpos sob a aplicação do vácuo; b) Pressão de Vácuo mantida constante por 8h.



Fonte:

7. 24 horas após o desligamento do vácuo, as peças foram desmoldadas e pré acabadas com o lixamento das arestas cortantes (Figura 19);

Figura 19 - Peças após o desmolde



Fonte:

⁵ Peel ply: tecido sintético que produz uma rugosidade determinada na superfície do laminado.

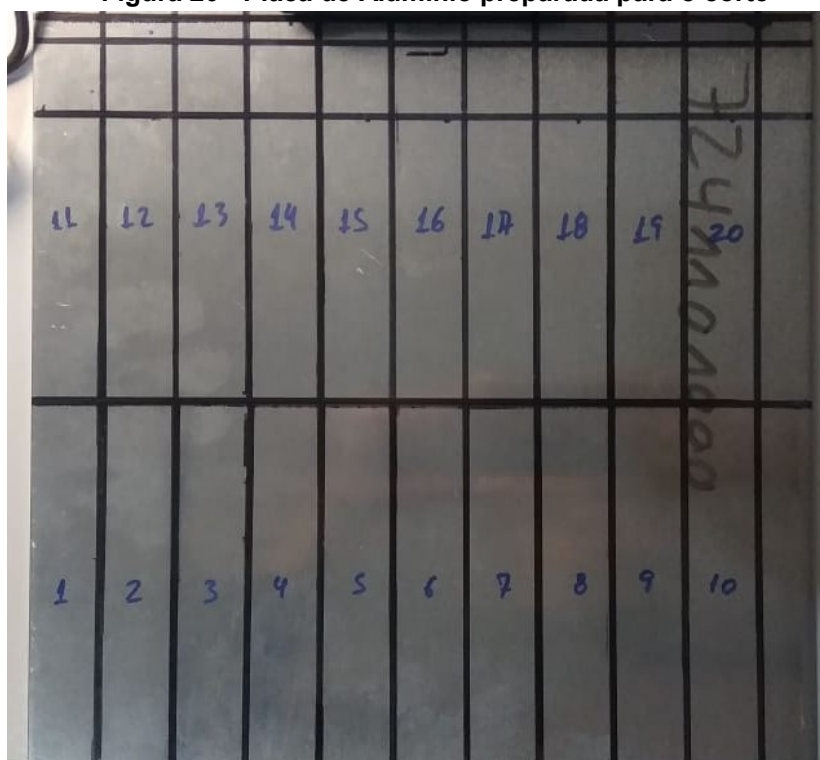
8. Após a cura completa, em temperatura ambiente, a peça foi cortada no Centro de Desenvolvimento da Gatron - Inovação em Compósitos utilizando uma máquina de corte manual com disco de diamante industrial.

3.3.2 Corpos de prova de Alumínio

O processo de fabricação dos corpos de prova para o ensaio cisalhamento foi o seguinte:

1. A placa foi marcada com o planejamento dos cortes dentro das dimensões que atenderam os ensaios realizados, prevendo uma perda de material de 3 mm por corte, como mostra a Figura 20;

Figura 20 - Placa de Alumínio preparada para o corte

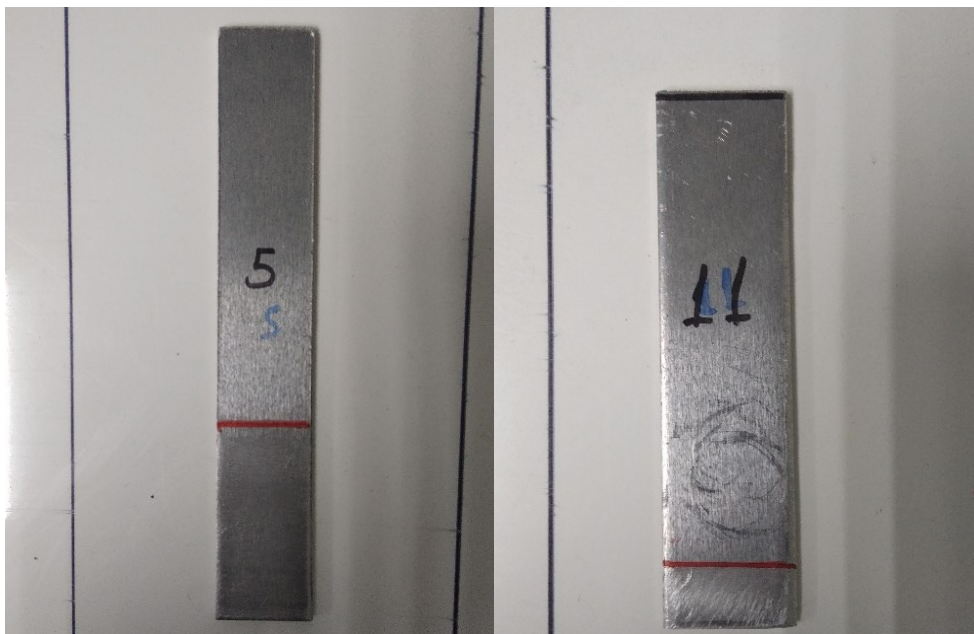


Fonte:

2. Os corpos de prova foram cortados no Centro de Desenvolvimento da Gatron – Inovação em Compósitos (São José do Pinhais - PR) utilizando uma máquina de corte manual;

3. Após o corte, a região dos corpos de prova que foram unidas para os ensaios foram preparadas para a união com lixamento utilizando lixa de grão 120.

Figura 21 - Corpos de prova de Alumínio após lixamento



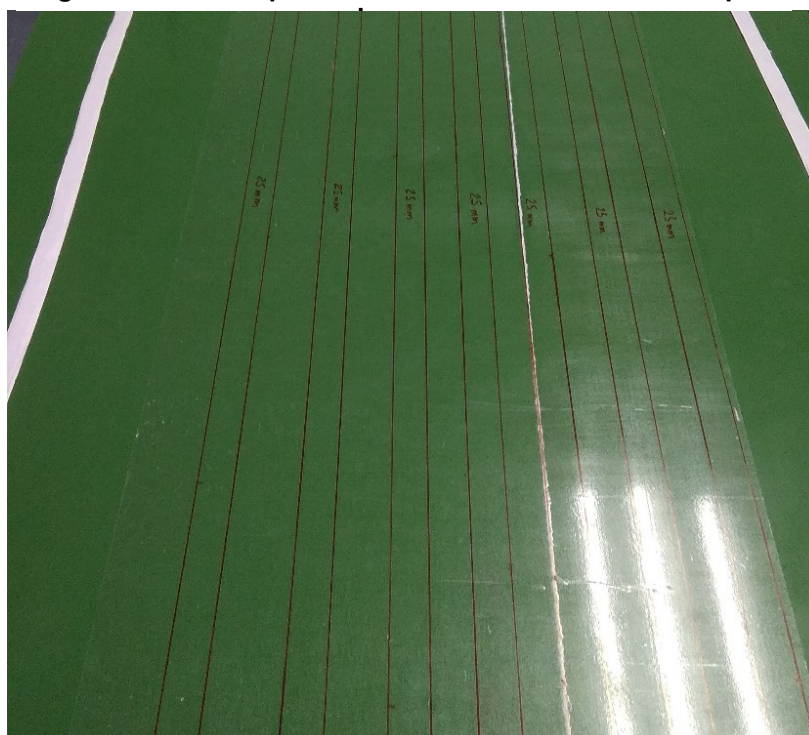
Fonte:

3.3.3 União dos Corpos de Prova

A união dos corpos de prova foi realizada no Centro de Desenvolvimento da Gatron – Inovações em Compósitos, também utilizando a aplicação de vácuo com filme. Seguindo o procedimento a seguir:

1. Para o alinhamento dos corpos de prova, a mesa de laminação foi marcada com linhas de espaçamento constante, como demonstrado na Figura 22;

Figura 22 - Linhas para auxílio do alinhamento dos corpos



Fonte:

2. Os corpos de prova foram alinhados e posteriormente foi aplicado resina epóxi nas regiões de união. Todas as uniões foram feitas utilizando a superfície dos laminados que receberam peel-ply e as regiões dos corpos de alumínio que receberam lixamento;
3. A bolsa de vácuo foi montada. A aplicação da pressão de vácuo foi feita de maneira gradual, pois foram necessários ajustes no alinhamento dos corpos de prova durante o período de *gel time*⁶ da resina. Também para estes ajustes, um dos vincos da bolsa de vácuo foi mantido para que pudesse se ter acesso aos corpos de prova dentro desta. Após o

⁶ *Gel time* (Tempo de Gel): o tempo em que a temperatura da matriz praticamente não varia, mantendo sua consistência líquida.

alinhamento a bolsa foi completamente selada e uma pressão de -860 mBar foi aplicada durante 8h.

Figura 23 - a) Corpos sob a aplicação de vácuo; b) Pressão de Vácuo mantida constante por 8h.



Fonte:

4. Após a aplicação do vácuo, os corpos foram mantidos em repouso sobre a mesa de vácuo por 24 horas para evitar empenamentos durante o processo de polimerização completa do adesivo e posteriormente ensaiados.

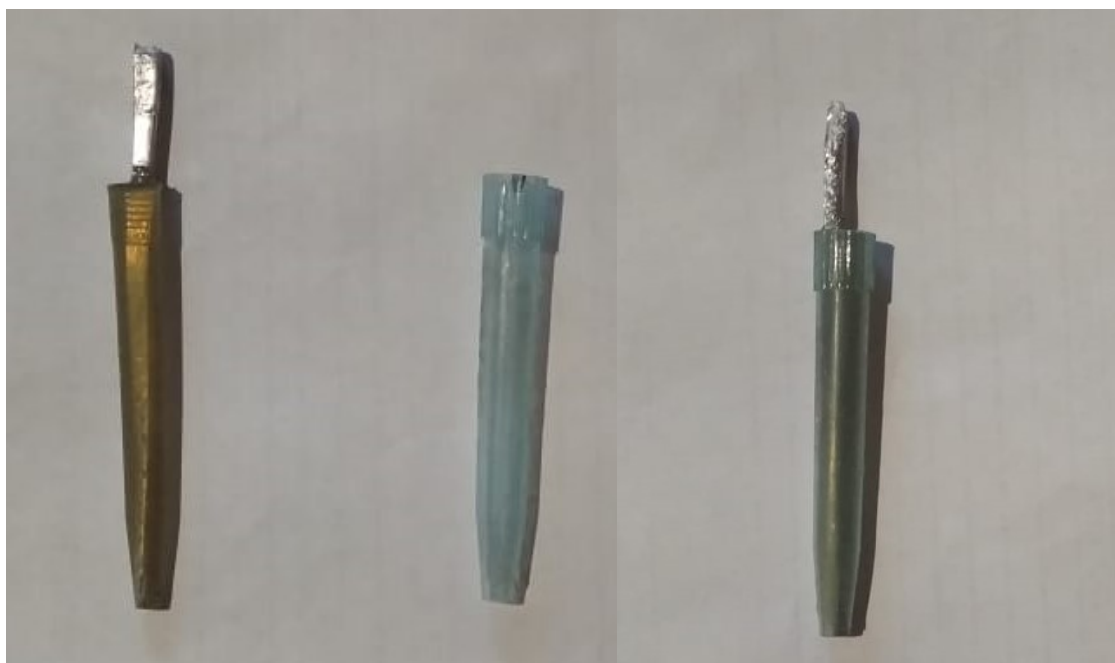
3.3.4 Fabricação dos Eletrodos de Trabalho

Foram fabricados dois eletrodos de trabalho para os ensaios de corrosão galvânica, no Laboratório de Materiais no Câmpus Pato Branco da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, da seguinte forma:

1. Retirou-se dois filetes da placa de alumínio, com seção transversal de aproximadamente 0,09 cm²;
2. O filete de alumínio foi alojado em um tubo cônico de polipropileno, posteriormente a ponta cônica do tubo foi vedada com fita de Teflon;
3. Depositou-se resina poliéster dentro do tubo para fixação do eletrodo e isolamento elétrico de sua superfície;
4. As pontas dos conjuntos foram lixadas até chegar na superfície dos eletrodos de alumínio;

5. As superfícies de contato dos eletrodos foram polidas.

Figura 24 - Eletrodo de Trabalho



Fonte:

3.4 ENSAIO DE CISALHAMENTO

O ensaio de cisalhamento foi realizado seguindo os procedimentos orientados pela norma ASTM D3164-03. A quantidade de corpos de prova ensaiada para cada configuração foi determinada com base nas informações desta norma e está apresentada na Tabela 10. Um corpo de prova do Grupo 3 foi danificado em um incidente durante os ensaios e foi excluído dos estudos.

Tabela 6 - Número de CPs para Ensaio de Cisalhamento

	Overlap	Número de Amostras
Grupo 1	50 mm sem PRFV	5
Grupo 2	50 mm com PRFV	5
Grupo 3	12,5 mm sem PRFV	4
Grupo 4	12,5 mm com PRFV	5

Fonte:

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais da Gatron – Inovação em Compósitos utilizando a máquina de tração EMIC DL 10000, com uma velocidade de 5 mm/min e célula de carga de 10 kN. Os corpos de prova foram ensaiados até sua fratura. A composição do ensaio foi a demonstrada na Figura 25:

Figura 25 - Composição do Ensaio de Cisalhamento

Fonte:

Os valores de força de ruptura e deslocamento foram determinados, e posteriormente foi realizado um estudo associado às tensões de falha de cada junta, bem como o tipo de falha sofrida do adesivo junto aos aderentes.

Algumas equações que foram empregadas nos cálculos de força média de ruptura (F_m), tensão de ruptura (τ_{rup}), tensão de cisalhamento (τ) e desvio padrão (DP) estão apresentadas a seguir.

A força média de ruptura foi calculada através de uma média aritmética simples das forças de ruptura, de acordo com a Equação (2):

$$F_m = \frac{\sum F_{rup}}{n} \quad (2)$$

Onde:

F_m = Força média de ruptura em Newtons;

$\sum F_{rup}$ = Somatório das forças de ruptura em Newtons;

n = Número de amostras ensaiadas;

A Equação 3 foi utilizada para obter a tensão de ruptura:

$$\tau_{rup} = \frac{F_{rup}}{A_s} \quad (3)$$

Onde:

τ_{rup} = Tensão de ruptura em MPa;

A_s = Área de sobreposição em mm²;

A tensão de cisalhamento foi obtida realizando a média aritmética da tensão na ruptura, conforme a Equação (4):

$$\tau = \frac{\sum \tau_{rup}}{n} \quad (4)$$

Onde:

τ = Tensão de cisalhamento em MPa;

$\sum \tau_{rup}$ = Somatório das tensões de ruptura em MPa;

n = Número de amostras;

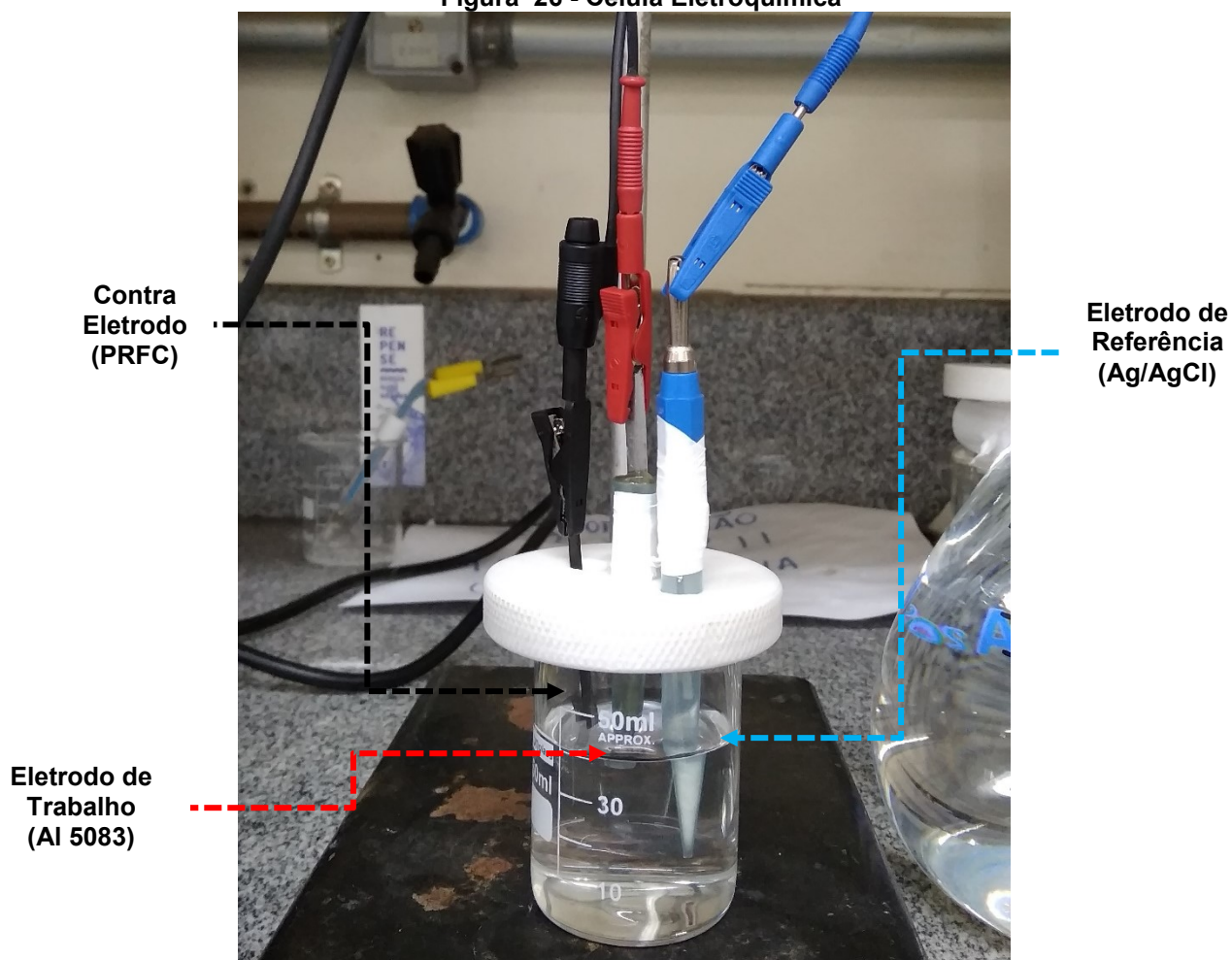
E, por último, para a realização do cálculo estatístico do desvio padrão a Equação 5 foi utilizada:

$$DP = \sqrt{\frac{\sum (\tau_{rup} - \tau)^2}{(n - 1)}} \quad (5)$$

3.5 ENSAIOS DE CORROSÃO

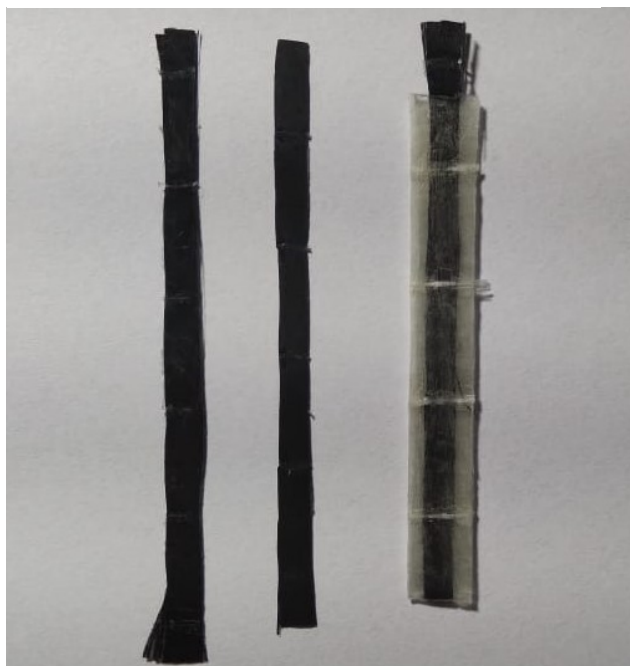
Os ensaios de corrosão foram baseados em trabalhos anteriores como (HAKANSSON, 2016) e Bosze (2008). O sistema foi constituído por uma célula eletroquímica convencional com três eletrodos: o eletrodo de referência de prata-cloreto de prata, o eletrodo de trabalho de alumínio 5083 O-H11 e o contra eletrodo de fibra de carbono. Os ensaios foram realizados em solução de 3,5% (em massa) de NaCl, à temperatura ambiente e em condição estacionária. A Figura 26 mostra a célula utilizada:

Figura 26 - Célula Eletroquímica



Fonte:

Os ensaios foram realizados com três configurações de contra eletrodos: o primeiro foi previamente lixado até uma parcial eliminação do polímero na superfície externa do compósito; o segundo está com a superfície sem tratamento ou lixamento (com o polímero de base epóxi na superfície do modo como foi laminado); e o terceiro com um isolamento de PRFV, como mostra a Figura 27:

Figura 27 - Contra Eletrodos Utilizados

Fonte:

O equipamento utilizado para os ensaios de corrosão foi um Potenciostato PalmSens EmStat3+ do Laboratório de Materiais do Departamento Acadêmico de Química da UTFPR – Câmpus Pato Branco, mostrado na Figura 28. Para compilação e análise dos dados fornecidos pelo potenciostato, foi utilizado o software PalmSens PSTrace 5.6. As amostras foram imersas no eletrólito em potencial de circuito aberto por 20 minutos para estabilização antes das polarizações eletroquímicas. Dessa forma, o potencial de corrosão (E_{corr}), foi o potencial obtido ao fim dos 20 minutos de imersão das amostras.

Figura 28 - Potenciostato PalmSens EmStat3+

Fonte:

Posteriormente, sem a retirada dos eletrodos da solução, foi executado a polarização linear de -1,8V a -0,7V a uma velocidade de varredura de 5 mV/s, de forma

que os parâmetros de potencial de corrosão, corrente de corrosão, resistência de polarização, coeficientes de Tafel anódico e catódico, e a taxa anual de corrosão foram obtidos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios mecânicos e eletroquímicos, alguns cálculos realizados para determinação das tensões de cisalhamento, modos de falha de juntas, gráficos, interpretação e exposição dos resultados.

4.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

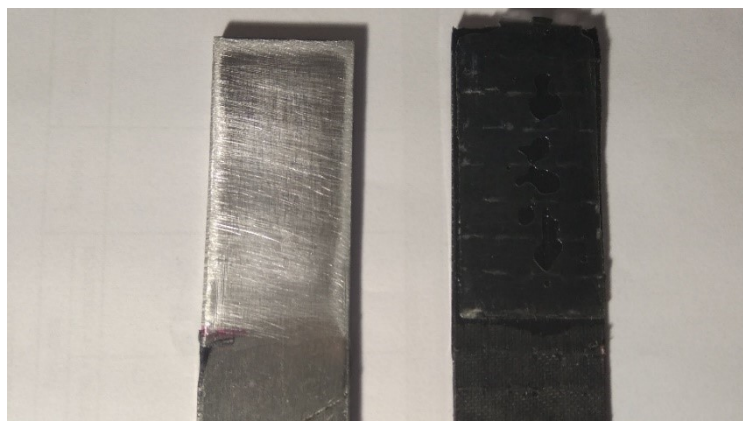
Os resultados dos ensaios de cisalhamento foram divididos nos quatro grupos apresentados na Tabela 6 e para os ensaios de corrosão a classificação foi realizada de acordo com o tipo de contra eletrodo.

4.1.1 Ensaio de Cisalhamento

4.1.1.1 Resultados para o Grupo 1

O Grupo 1, composto pelas amostras com *overlap* de 50 mm e sem o isolamento de PRFV, apresentou uma força média de ruptura de 1898,65 N e desvio padrão de $\pm 6,38$ N. A tensão de cisalhamento média foi de 1,56 MPa, com desvio padrão de $\pm 0,12$ MPa. As tensões de ruptura variaram de 1,35 MPa a 1,69 MPa e todas as falhas foram de natureza adesiva, quando a falha ocorre na interface entre o adesivo e o substrato, como se pode observar na Figura 29:

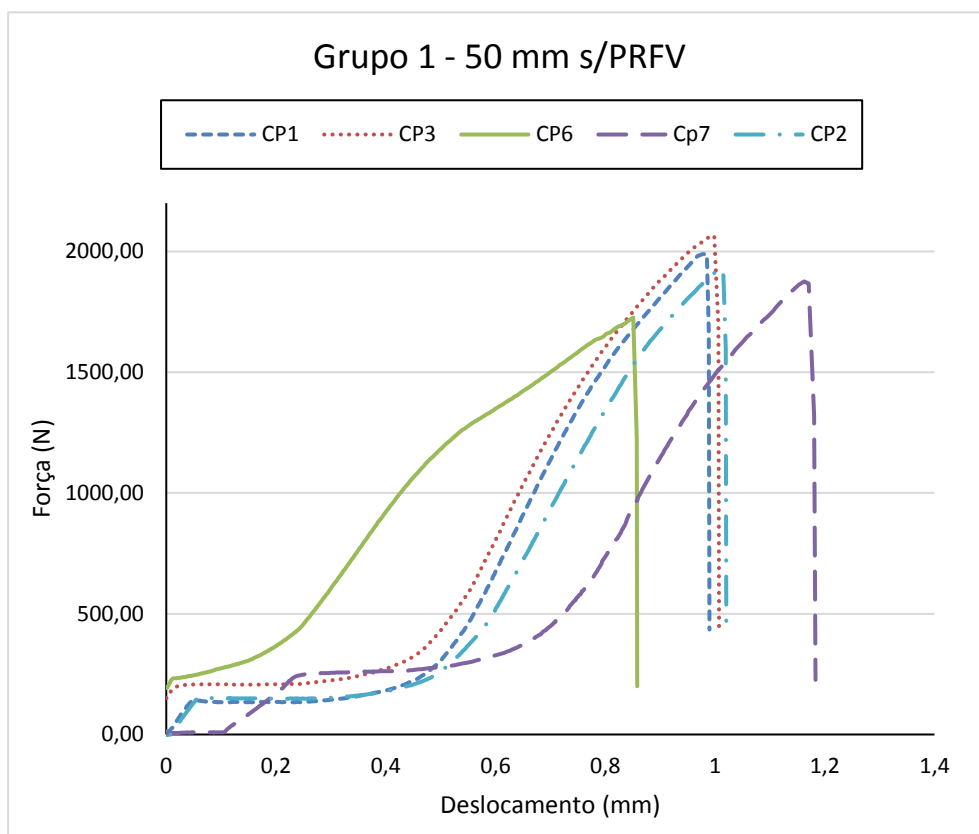
Figura 29 - Superfície das falhas para 50 mm de overlap sem isolamento de PRFV



Fonte:

Na Figura 30 estão as curvas Força x Deslocamento resultante dos ensaios de cisalhamento. É possível observar que houve uma compatibilidade entre os resultados das cinco amostras em força de ruptura, bem como em deslocamento.

Figura 30 - Gráfico Força x Deslocamento do Grupo 1

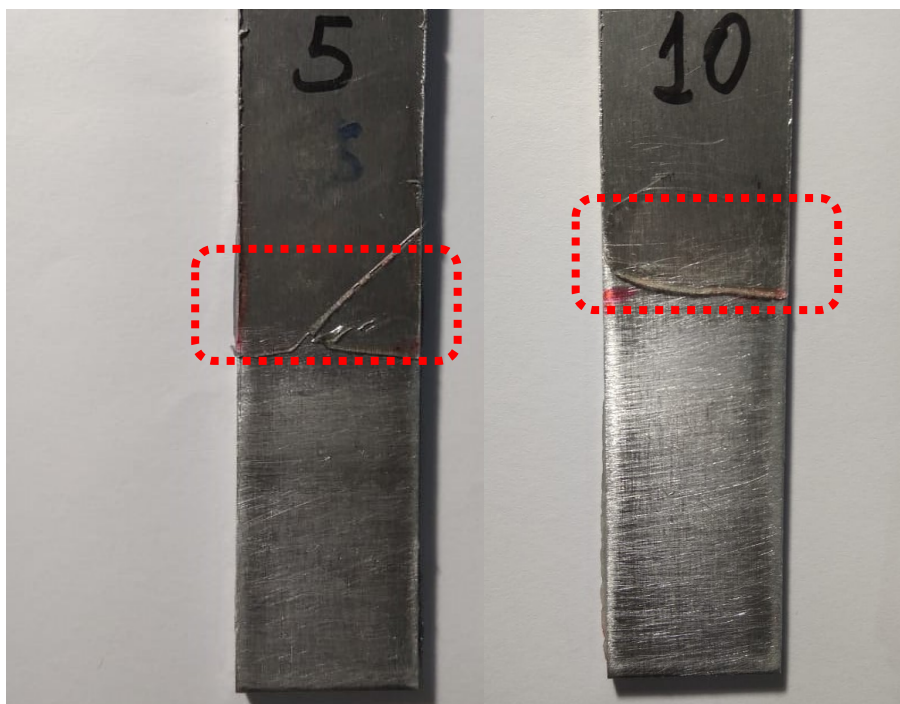


Fonte:

4.1.1.2 Resultados para o Grupo 2

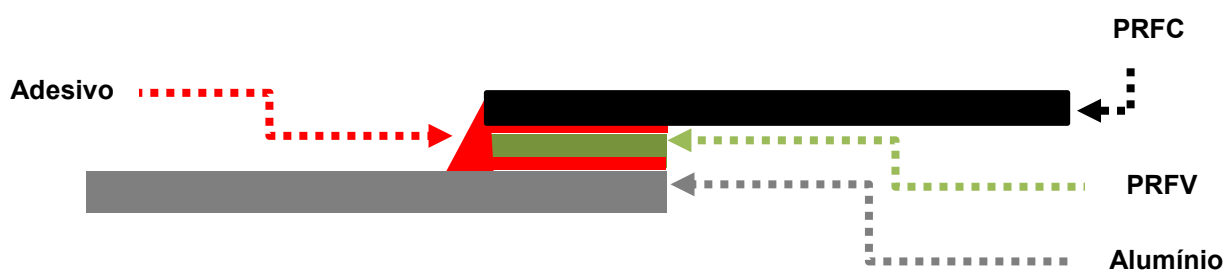
O Grupo 2, também formado por corpos de prova com sobreposição de 50 mm, mas com isolamento de PRFV entre os substratos, resistiu a uma força média de ruptura de 1341,24 N e desvio padrão $\pm 393,55$ N. A tensão média de cisalhamento foi de 1,11 MPa, com desvio padrão 0,39 MPa. A força máxima de ruptura foi de 1912,1 N e a mínima de 1022,4 N. As duas amostras que apresentaram maiores resistência, possuem uma não conformidade na fabricação que foi a formação de um chanfro feito por excesso de resina, destacado na Figura 31 e representado na Figura 32. Esses defeitos ocorreram pela não conformação adequada do filme de vácuo na região, algo de difícil controle no método de laminação utilizado.

Figura 31 - Superfície das falhas para 50 mm de *overlap* com isolamento de PRFV dos corpos de prova que obtiveram maiores resistência



Fonte: Autoria Própria (2019).

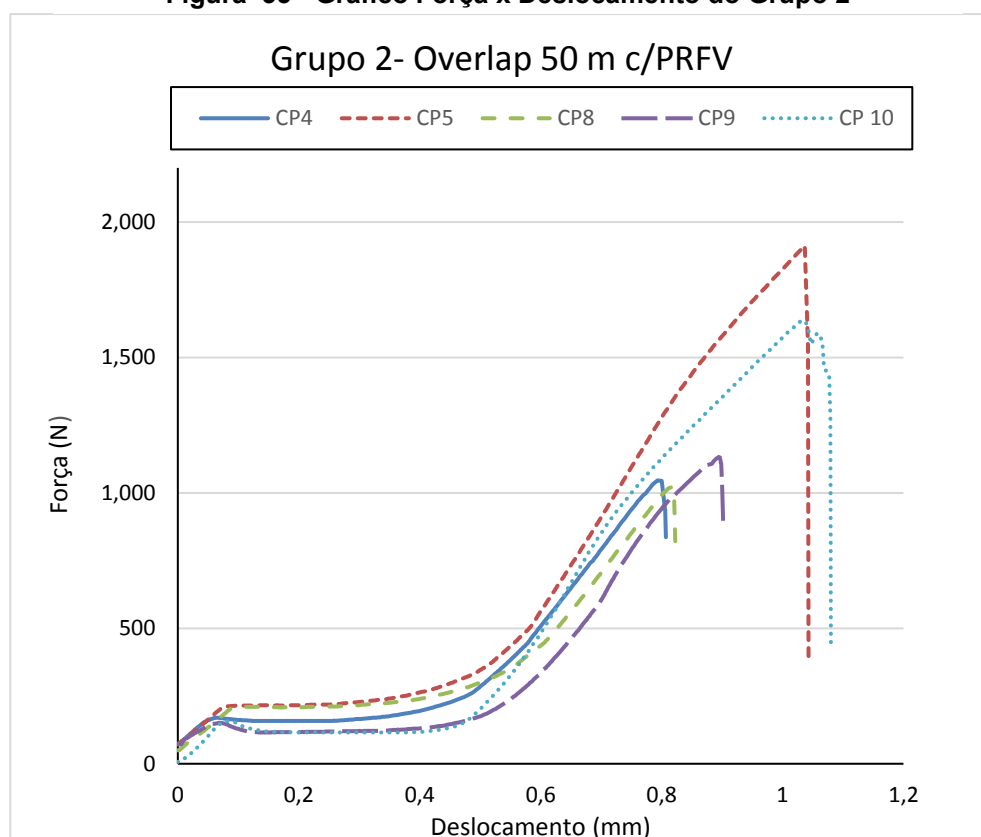
Figura 32 - Representação da não conformidade de laminação das amostras 5 e 10



Fonte: Autoria Própria (2019).

As curvas Força X Deslocamento estão representadas na Figura 33. Pode-se observar uma proximidade dos resultados dos CPs 4, 8 e 9 e uma disparidade nos valores dos CPs 5 e 10.

Figura 33 - Gráfico Força x Deslocamento do Grupo 2



Fonte: Autoria Própria (2019).

Em comparação com o Grupo 1, há uma diferença média de 557,41 N nas forças de ruptura o que representa uma redução de 29,36% na resistência das juntas. Esses dados estão organizados na Tabela 7.

Tabela 7 - Comparação das Forças de Ruptura entre Grupos 1 e 2

Força de Ruptura do Grupo 1 (N)	Força de Ruptura do Grupo 2 (N)	Diferença entre forças de ruptura (N)	Redução percentual de resistência
1898,65	1341,24	557,41	29,63%

Fonte: Autoria Própria (2019).

4.1.1.3 Resultados para o Grupo 3

Quatro das cinco amostras do Grupo 3, com overlap de 12,5 mm apresentaram resultados próximos. A forma máxima de ruptura foi de 1918,2 N e a mínima de 1467,6. Força média foi de 1775,275 N com desvio padrão de 182,485 N. A tensão média de ruptura foi de 14,269 MPa e o desvio padrão de 1,035 MPa.

O C.P. 13, que apresentou a menor resistência, foi a única amostra que apresentou falha do tipo mista, quando a falha é parte adesiva e parte no substrato, como pode ser visto na Figura 34.

Figura 34 – Falha do tipo mista, apresentada pelo corpo de prova 13.



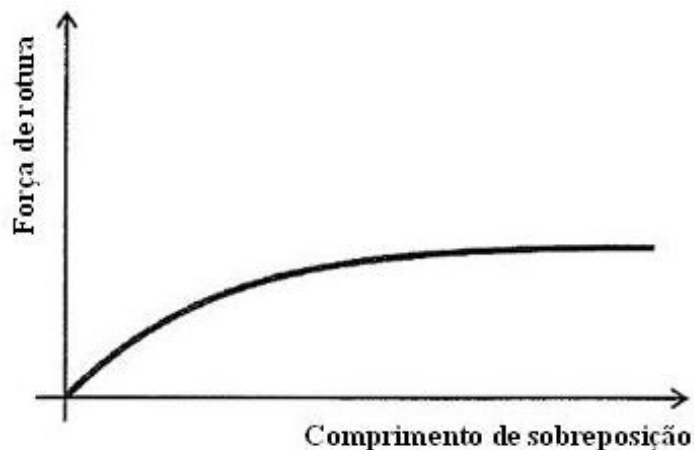
Fonte: Autoria Própria (2019).

Apesar de possuir a mesma não conformidade apresentada pelas amostras 5 e 10, o substrato falhou em um defeito em sua superfície provocado por uma bolha, o que diminui sua área de contato em relação aos CPs deste grupo.

Também é possível observar, que, apesar de possuir uma superfície de contato menor, aos valores das forças de ruptura foram próximos aos demonstrados pelo Grupo 1 e superiores as apresentadas pelo Grupo 2. Já para valores de tensão, as cargas suportadas pelo Grupo 3 foram bem maiores que dos grupos 1 e 2. Isso pode ser consequência de uma propriedade das juntas de sobreposição simples: as bordas da união são as zonas que apresentam uma maior concentração de tensão. A tensão média é menor que a tensão nas bordas, e essa distribuição de esforços não uniforme na camada adesiva faz com que a falha ocorra para cargas inferiores aos que o adesivo consegue suportar. A resistência da junta aumenta para valores pequenos da razão entre o comprimento do *overlap* e a espessura do substrato. Todavia, a partir de determinados valores desta razão, o ganho de resistência é mínimo e o peso do conjunto aumenta de forma desnecessária (CARBAS, 2008). Para a configuração utilizada neste trabalho, este comprimento de sobreposição ótimo

aparenta ser imediatamente após 12,5 mm. A Figura 35 demonstra esse comportamento.

Figura 35 - Resistência de uma junta simples em função do comprimento de sobreposição

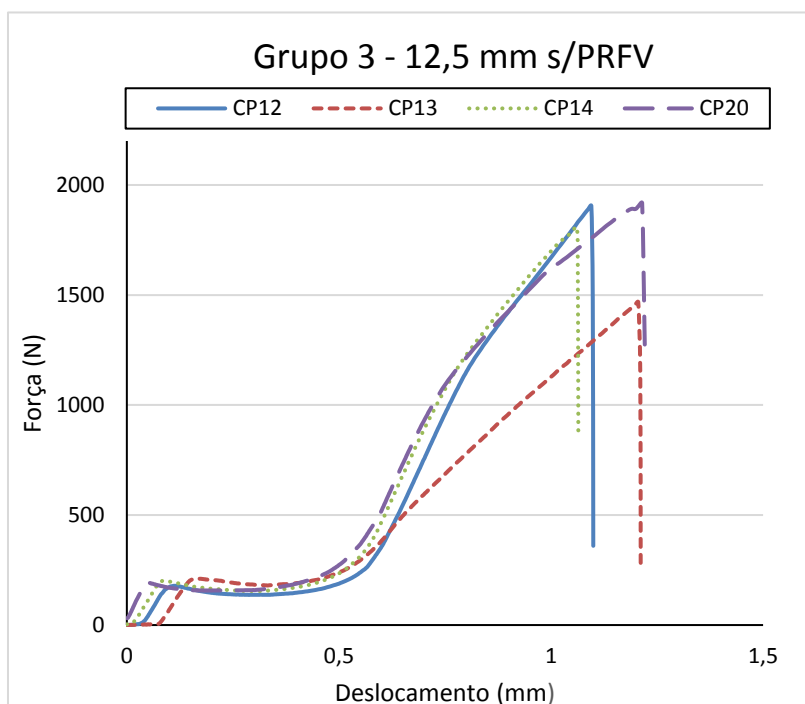


Fonte: da

A maior resistência em relação às amostras do Grupo 2, possivelmente, pode ser explicada por dois fatores que podem reduzir a resistência das amostras com PRFV: O aumento de espessura do adesivo, o que pode introduzir um maior número de defeitos como bolhas de ar e micro fendas; e o aumento da espessura do substrato, o que amplifica o momento fletor.

Os resultados dos ensaios realizados para o Grupo 3 estão apresentados na Figura 36 - Gráfico Força x Deslocamento do Grupo 3

Figura 36 - Gráfico Força x Deslocamento do Grupo 3

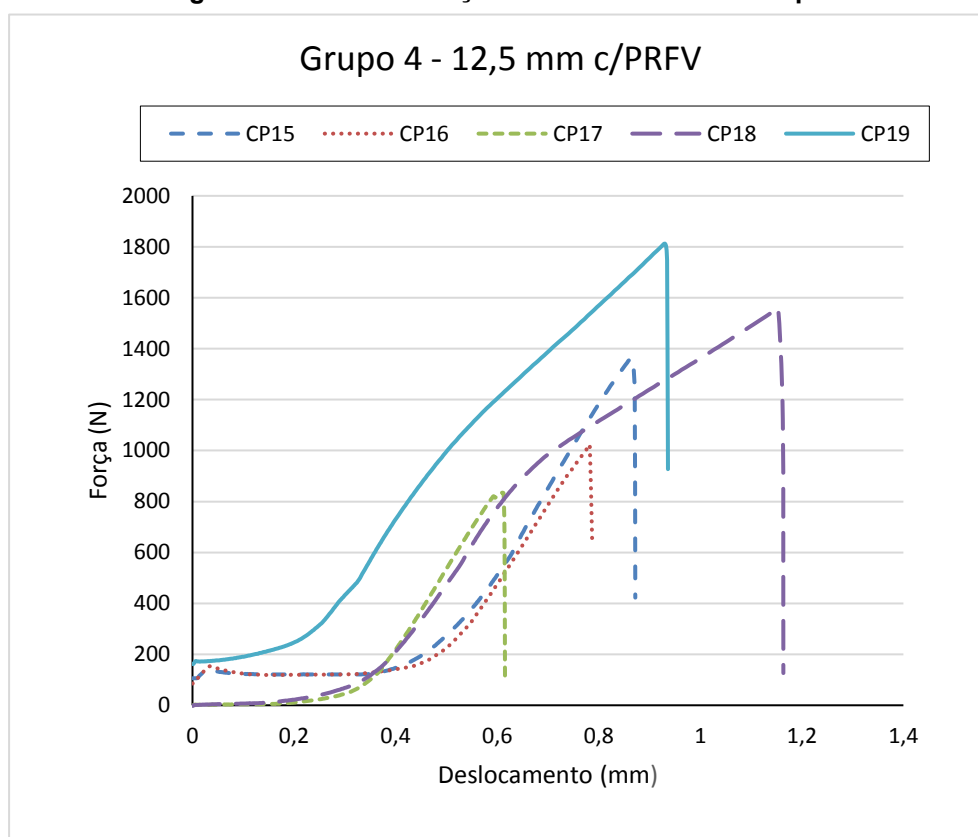


Fonte: Autoria Própria (2019).

4.1.1.4 Resultados para o Grupo 4

O Grupo 4 foi o que apresentou maior disparidade nos resultados, por isso as falhas serão apresentadas individualmente. De forma geral, a força máxima de ruptura foi de 1812,7 N e a mínima de 833,18 N. A força de ruptura média foi de 1317,156 N, com desvio padrão de 354,14 N. A tensão média foi de 8,02 MPa com desvio padrão de 2,07 MPa. Os resultados estão apresentados na Figura 37.

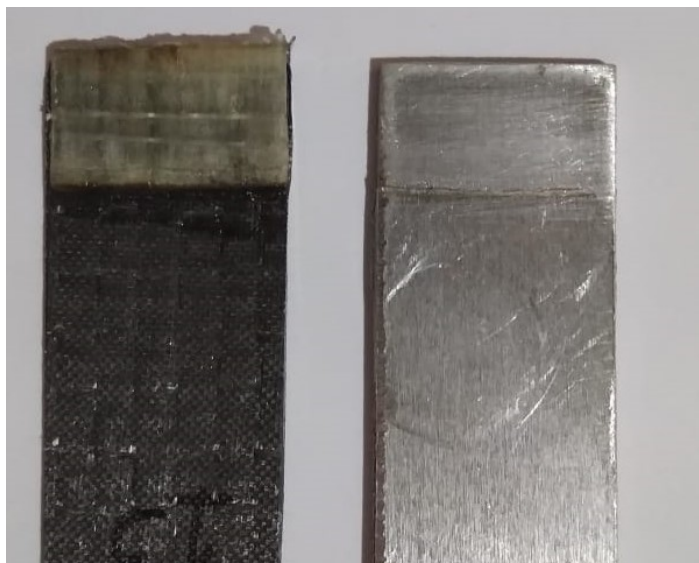
Figura 37 - Gráfico Força x Deslocamento do Grupo 4



Fonte: Autoria Própria (2019).

O CP 15, foi a amostra onde a falha foi a mais semelhante com a maioria dos corpos ensaiados. A falha foi puramente adesiva e a camada adesiva não apresentou defeitos aparentes, como pode ser observado na Figura 38.

Figura 38 - Superfície após falha da junta 15



Fonte: Autoria Própria (2019).

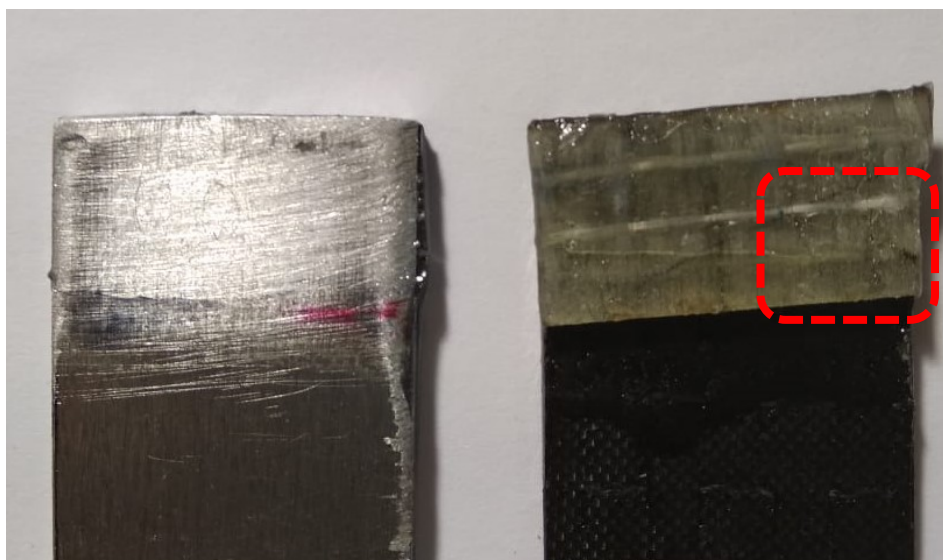
A amostra 16 apresentou falhas em sua superfície de contato (destaque na Figura 39), possivelmente causadas por bolhas de ar, o que pode ter reduzido sua resistência consideravelmente.

Figura 39 – Falhas na superfície da junta 16



Fonte: Autoria Própria (2019).

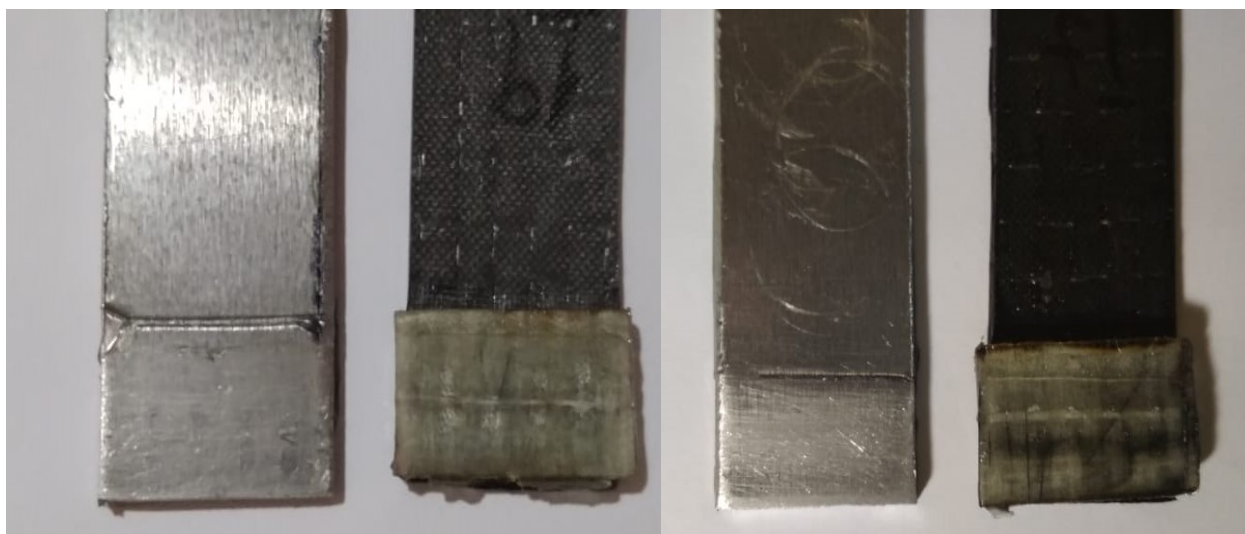
A junta 17 apresentou a menor resistência de todas as amostras ensaiadas, a superfície do adesivo se mostrou a mais falha também. Praticamente toda a área destacada na Figura 40 aparenta estar sem adesivo.



Fonte: Autoria Própria (2019).

As amostras 18 e 19 (Figura 41) apresentaram a mesma não conformidade em forma de chanfro das amostras 5 e 10, o que pode ter ocasionado em essas duas amostras possuírem as maiores resistências do Grupo 4.

Figura 41 - Falhas na superfície das juntas 18 e 19



Fonte: Autoria Própria (2019).

Este grupo foi o que apresentou a maior dificuldade durante o processo de união devido a sua pequena sobreposição e dificuldade de posicionamento do substrato de PRFV enquanto a resina ainda estava em estado líquido, o que resultou nos defeitos apresentados e menor compatibilidade nos resultados. Confrontando com os resultados do Grupo 3, há uma diferença média de 463,119 N nas forças de ruptura o que representa uma redução de 26,09% da resistência da junta. Esses valores estão expostos na Tabela 8.

Tabela 8 - Comparação das Forças de Ruptura entre Grupos 3 e 4

Força de Ruptura do Grupo 3 (N)	Força de Ruptura do Grupo 4 (N)	Diferença entre forças de ruptura (N)	Redução percentual de resistência
1775,275	1312,156	463,119	26,09

Fonte: Autoria Própria (2019).

Na Tabela 9 estão apresentados os resultados de todos os Grupos de amostras ensaiadas.

Tabela 9 - Resultados dos Ensaios de Cisalhamento

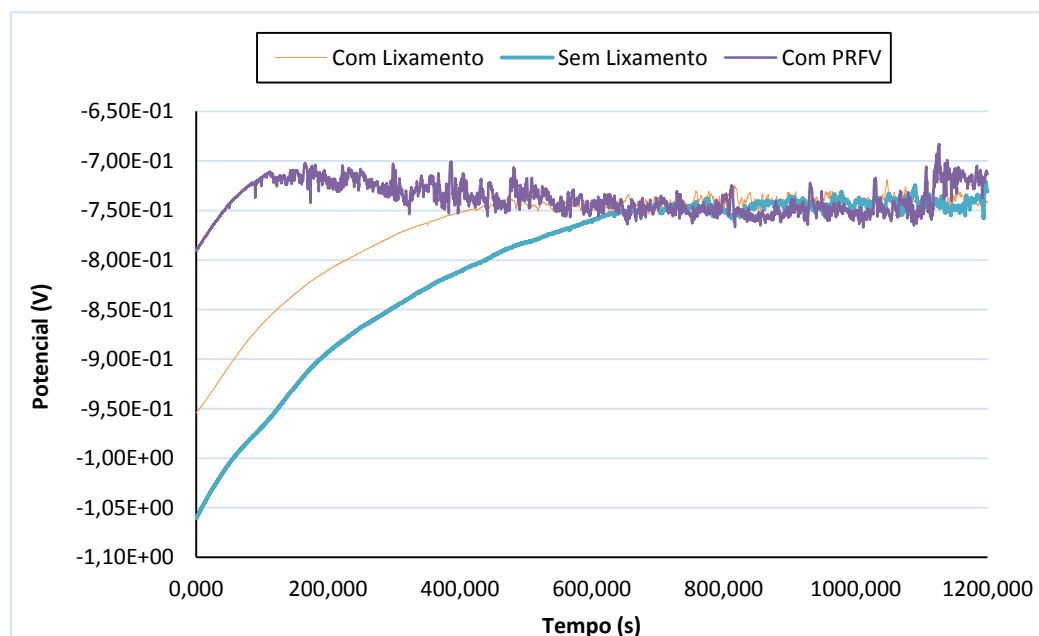
Tipo de Amostras	Força de Ruptura (N)	Tensão de Ruptura (MPa)
Grupo 1	1898,65 ± 6,38	1,56 ± 0,12
Grupo 2	1341,24 ± 393,55	1,11 ± 0,39
Grupo 3	1775,27 ± 182,48	14,27 ± 1,03
Grupo 4	1312,15 ± 354,14	8,02 ± 2,07

Fonte: Autoria Própria (2019).

4.1.2 Ensaio de Corrosão

As medidas de OCP, exibidas na Figura 42, orientaram para a obtenção do potencial de equilíbrio entre os eletrodos de trabalho e solução eletrolítica.

Figura 42 - Curvas de Potencial de Circuito Aberto



Fonte: Autoria Própria (2019).

Por meio das curvas de polarização foi extrapolado o melhor ajuste de uma linha reta ao longo da porção linear da curva anódica e catódica no software do potenciostato para obtenção das retas de Tafel. Posteriormente, através dessa

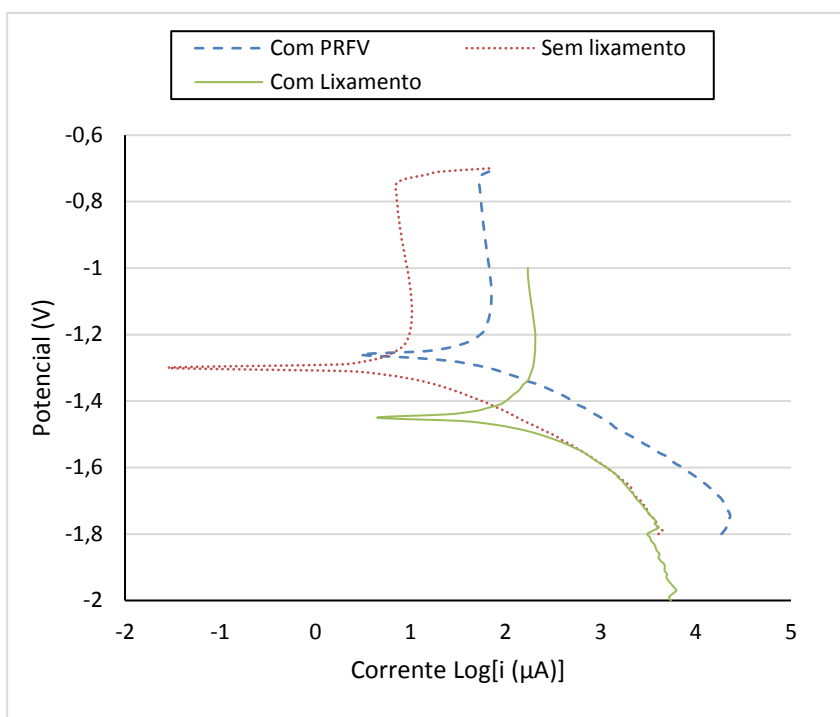
extrapolação, foram obtidos os valores de potencial de corrosão (E_{corr}), corrente de corrosão (I_{corr}), densidade da corrente de corrosão (I_{cpsa}), resistência de polarização, coeficiente de Tafel anódico e catódico e taxa anual de corrosão. Estes resultados estão apresentados na Tabela 10 e as curvas de polarização representadas na Figura 43.

Tabela 10 - Corrente de corrosão, densidade de corrente de corrosão, potencial de corrosão, coeficientes de Tafel anódico e catódico, resistência de polarização e taxa de corrosão das amostras ensaiadas

Contra Eletrodo	I_{corr} (μA)	I_{cpsa} ($\mu A/cm^2$)	E_{corr} (V)	Ba (V/década)	Bb (V/década)	R_p (k Ω)	T_{cor} (mm/ano)
PRFC com lixamento	251,9 \pm 0,2	3000 \pm 14,9	-1,451 \pm 0,1	2,623 \pm 0,3	0,270 \pm 0,02	0,421 \pm 0,01	92,90 \pm 2
PRFC sem lixamento	12,11 \pm 0,2	137,7 \pm 1,2	-1,300 \pm 0,1	2,288 \pm 0,2	0,145 \pm 0,04	4,891 \pm 0,2	4,466 \pm 0,5
PRFC com Isolamento de PRFV	7,639 \pm 0,2	84,88 \pm 1,4	-1,257 \pm 0,1	2,448 \pm 0,3	0,179 \pm 0,03	9,504 \pm 0,5	2,817 \pm 0,2

Fonte: Autoria Própria (2019).

Os valores de potencial de corrosão foram próximos, com a amostra de PRFC com lixamento, um pouco mais catódica, com valor de -1,451 V e a amostra com PRFV, a mais anódica, com -1,257 V. Quanto menos negativo é o valor deste potencial, menor a corrosão do sistema, mostrando assim uma vantagem da aplicação do PRFV. As amostras sem lixamento e com PRFV apresentaram os maiores valores de resistência de polarização, 4,891 k Ω e 9,504 k Ω , respectivamente. Estes valores elevados de R_p resultam em baixos valores de corrente de corrosão para estas amostras, com 12,11 μA e 7,639 μA , respectivamente, contra 251,9 μA para amostra com lixamento. A Figura 43 apresenta as curvas de polarização dos arranjos:

Figura 43 - Curvas de polarização

Fonte: Autoria Própria (2019).

As amostras sem lixamento e com PRFV, também apresentaram resultados inferiores de taxa de corrosão em comparação com a amostra com lixamento. Os valores foram de 4,466 mm/ano para o primeiro, 2,817 mm/ano para o segundo e 92,90 mm/ano para o último. O que representa uma melhoria de 33,71% do PRFC com PRFV quando comparado ao PRFC sem lixamento.

Os isolamentos apenas com resina e o com PRFV no contra eletrodo confirmaram uma proteção à corrosão ao eletrodo de trabalho, visto os valores inferiores de taxa de corrosão e valores maiores de potenciais de corrosão. Esse comportamento pode estar relacionado à menor área de contato do PRFC com o eletrólito, o que diminui a razão entre áreas de PRFC e Al na célula eletroquímica. Como já provado por Hakansson (2016), esta razão entre áreas é um fator importante nos resultados de corrosão.

5 CONCLUSÃO

Quando se iniciou este estudo, constatou-se não haver parâmetros comparativos entre as propriedades mecânicas de juntas que utilizam ou não o PRFV como material isolante contra a corrosão mecânica entre PRFC e alumínio. Portanto, o presente trabalho alcançou seus objetivos propostos.

Através dos ensaios de cisalhamento, notou-se uma redução de 29,63% da força de ruptura para as amostras com sobreposição de 50 mm e uma perda de 26,06% desta propriedade para sobreposição de 12,5 mm. Constatou-se que as falhas foram, em sua maioria, de natureza adesiva o que isenta as diferenças de resistência entre os materiais como motivo das rupturas.

No que se refere à proteção à corrosão, não se pôde concluir a eficiência do isolamento elétrico da barreira de PRFV em casos de separação completa do PRFC e alumínio pela barreira de PRFV. Entretanto, a aplicação deste isolamento possibilitou uma redução da razão entre área de contatos do PRFC e Alumínio, resultando em uma redução na taxa de corrosão de 33,71%. Assim, a utilização do PRFV mostrou-se fundamental quando se necessita de proteção à corrosão, porém ocasiona prejuízos às propriedades mecânicas da união PRFC/Alumínio.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo sobre comprimento de sobreposição ótima em uniões PRFC/Alumínio e PRFC/PRFV/Alumínio;
- Estudar o impacto da corrosão galvânica nas propriedades mecânicas das uniões PRFC/PRFV/Alumínio e PRFV/PRFV;
- Análise comparativa da influência do PRFV como material isolante contra corrosão em juntas parafusadas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G71 - 81: Standard Guide for Conducting and Evaluating Galvanic Corrosion Tests in Electrolytes**. West Conshohocken – PA, United States. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (ABAL). **Alumínio: Características Químicas e Físicas**. 2017. Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/temperas/>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

ATLAS STEELS. **Aluminium Alloy Data Sheet 5083**. 2013. Disponível em: <http://www.atlassteels.com.au/documents/Atlas_Aluminium_datasheet_5083_rev_Oct_2013.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2019.

CALLISTER, William D.; RETHWISH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos S.A., 2012.

CARBAS, Ricardo João Camilo. **Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi**. 2008. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, [s. l.], 2008. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~em03159/#_Toc203027605>

COMPOSITESWORLD. **Fabrication Methods**. 2015. Disponível em: <<https://www.compositesworld.com/articles/fabrication-methods-2015>>. Acesso em: 8 set. 2018.

COSTA, Estevão Moura. **Análise Estrutural de um Vagão Granelero em Compósitos**. 2018. Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville - SC, 2018.

FATOR BRASIL. **Brasil perde 4% do PIB com corrosão**. 2016. Disponível em: <https://www.revistafatorbrasil.com.br/ver_noticia.php?not=334281>. Acesso em: 29 set. 2018.

FILHO, Anael Pereira. **Análise de Modos de Falha em Compósitos de Carbono/Epóxi Submetidos a Carregamentos de Tração e Compressão Monitorados por Emissão Acústica**. 2017. Universidade Federal de Itajubá, [s. l.], 2017.

GALLI, Cecília Antunes. **Caracterização das Propriedades Mecânicas de Compósitos de Matriz de Epóxi com Fibras de Carbono Unidirecionais**. 2016. Universidade Federal do Rio de Janeiro, [s. l.], 2016. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10016041.pdf>>

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos S.A., 2012.

HAKANSSON, Eva. **Galvanic Corrosion of Aluminum/Carbon Composites Systems**. 2016. University of Denver, [s. l.], 2016. Disponível em: <<https://digitalcommons.du.edu/etd/979/>>

JONES, M. Robert. **Mechanics of Composite Materials**. Second Edition. New York - NY: Taylor & Francis Group, 1999.

MARINUCCI, Gerson. **Materiais Compósitos Poliméricos**. São Paulo - SP: Artiber Editora, 2011.

MESSLER, Robert W. **Joining of Materials and Structures**: Oxford, UK: Elsevier Ltd, 2004.

MOURA, Marcelo F. S. F.; DE MORAIS, Alfredo B.; MAGALHÃES, Antônio G. **Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico**. 2. ed. Porto: Publindústria, 2005.

NARITA, Eiji Nilson. **Estudo de Juntas Soldadas em Compósito de Fibra de Carbono com Matriz Termoplástica**. 2010. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos -SP, 2010.

NASSEH, Jorge. **Barcos: Métodos Avançados de Construção em Composites**. Rio de Janeiro - RJ: Sem Editora, 2007.

NASSEH, Jorge. **Manual de Construção de Barcos**. Rio de Janeiro - RJ: Sem Editora, 2011.

PAGOTTO, Josia Falararo. **Universidade De São Universidade De São**. 2013. Universidade de São Paulo, [s. l.], 2013.

PALMARES, Miguel Pereira. **Strength of Hybrid Laminates Aluminium Carbon-Fibre Joints with Different Lay-up Configurations**. 2016. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, [s. l.], 2016.

PRAMANIK, A. et al. Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys – A review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 101, n. November, p. 1–29, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.06.007>>

REZENDE, Mirabel Cerqueira; COSTA, Michelle Leali; BOTELHO, Edson Cocchieri. **Compósitos Estruturais: tecnologia e prática**. São Paulo - SP: Artiliber Editora, 2011.

ROJAS, Yuly Andrea Herrera. **Estudo Eletroquímico e Caracterização das Camadas de Produtos de Corrosão por CO₂ em Aços API5L e API 5CT P11**. 2014. Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, [s. l.], 2014.

SIGAGNA, Eric de Souza et al. **Corrosão em Aeronaves (Aircraft Corrosion)**. 2014. Universidade de Taubaté, [s. l.], 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/311513017_Corrosao_em_Aeronaves_Aircraft_Corrosion>

SILVEIRA, Luciana Leita. **Resistência à Corrosão e Cavitação de Revestimentos FeMnCrSi Depositados por Processos de Aspersão Térmica de Alta Velocidade**. 2018. Universidade Tecnológica do Paraná, [s. l.], 2018.

WOIZESCHKE, P.; WOTTSCHEL, V. Recent Developments for Laser Beam Joining of CFRP-aluminum Structures. **Procedia Materials Science**, [s. l.], v. 2, p. 250–258, 2013. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211812813000321>>

WOLYNEC, Stephan. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. São Paulo - SP: EDUSP, 2003.

XARÁ, João Tiago da Silva. **Previsão da Resistência de Juntas Adesivas pelo Método de Elementos Finitos Extendido**. 2016. Instituto Superior de Engenharia do Porto, [s. l.], 2016.

YARI, Mehdi. **Galvanic Corrosion of Metals Connected to Carbon Fiber Reinforced Polymers**. 2017. Disponível em: <<https://www.corrosionpedia.com/galvanic-corrosion-of-metals-connected-to-carbon-fiber-reinforced-polymers/2/1556>>. Acesso em: 20 set. 2018.

ZHANG, X. G. Galvanic Corrosion. In: **Uhlig's Corrosion Handbook**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011. p. 123–143.

APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO PRFV E PRFC



Newtech - Assessoria, Consultoria e Prestação de Serviços S/S Ltda.
 Rua Geminiano Costa, 959 – Centro – CEP 13.560-641
 Rua D. Pedro II, 676 - Vila Monteiro – CEP 13.560-320
 São Carlos - SP
www.labnewtech.com.br

Telefone: (16) 3412-9292 (Comercial) / 3412-9191 (Técnica)

Cliente: **GATRON INOVAÇÃO EM COMPÓSITOS S.A. - SJP**
 Rua Maria Isabel Zagonel, nº 205 – Afonso Pena.
 CEP 83045-430 – São José dos Pinhais - PR
 Sra. Pamella Soares
 (41) 2141-3272 / pamella.soares@gatron.com.br

Nº Orçamento ou contrato: 9381-19 Revisão 1
 Data realização do serviço: 13/11/2019 a 20/11/2019

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº RNT4534/2019

1 – OBJETIVO DO SERVIÇO:

Realizar ensaios de tração em duas amostras.

2 – IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS:

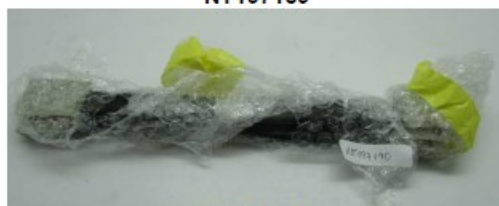
Tabela 1: Identificação das amostras

<i>Identificação Cliente</i>	<i>Identificação Newtech</i>	<i>Data Recebimento</i>
Corpos de prova com fibra de vidro	NT197189	13/11/2019
Corpos de prova com fibra de carbono	NT197190	

Nota: A amostragem relativa a este relatório é de responsabilidade do cliente. As amostras serão armazenadas na Newtech pelo período de dois meses quando serão descartadas ou devolvidas ao cliente se solicitado pelo mesmo. Os documentos dos resultados gerados na execução do serviço ficarão armazenados na Newtech pelo período de cinco anos a partir desta data. Quando necessário, há subcontratação de ensaios.



NT197189



NT197190

Figura 1: Amostras no estado de fornecimento.

3 – METODOLOGIA:

3.1 Tração

3.1.a - Norma de referência:

ASTM D3039/D3039M-17 – “Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials”.

3.1.b - Condições de ensaio:

Corpos de prova preparados pelo cliente.

Velocidade: 2 mm/min

Direção: 0° (longitudinal à direção da fibra)

Acondicionamento: de 13/11/2019 às 12:00 h a 20/11/2019 às 10:00 h

Condições ambientais: 24,5 °C e 55,0 % U.R.

Avaliação: resistência à tração, módulo de tração, deformação na ruptura, tensão na ruptura.

3.1.c - Resultados:



Figura 2: Corpos de prova utilizados no ensaio de tração – NT197189.

Tabela 2: Resultados do ensaio de tração – NT197189

CP	Largura (mm)	Espessura (mm)	Carga máxima (kN)	Resistência à tração (MPa)	Módulo elástico* (GPa)	Deformação na ruptura (%)
1	15,56	3,43	27,13	508,37	35,27	1,40
2	15,17	3,37	25,77	504,14	36,24	1,35
3	16,04	3,33	29,70	556,10	36,01	1,50
4	15,01	3,39	31,83	625,57	36,59	1,76
5	15,31	3,38	33,29	643,32	39,03	1,64
Média	15,42	3,38	29,55	567,50	36,63	1,53
Desvio	0,40	0,04	3,14	64,73	1,43	0,17
CV (%)	2,59	1,18	10,63	11,41	3,90	11,11

*Calculado na faixa de 0,05 a 0,25 % de deformação.

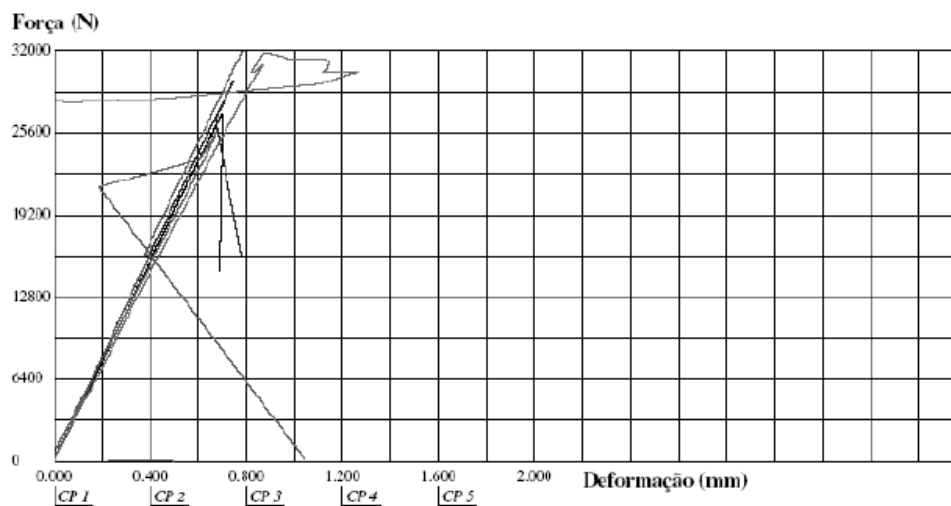


Figura 3: Curvas de força vs. deformação do ensaio de tração – NT197189.



Figura 4: Corpos de prova utilizados no ensaio de tração – NT197190.

Tabela 3: Resultados do ensaio de tração

CP	Largura (mm)	Espessura (mm)	Carga máxima (kN)	Resistência à tração (MPa)	Módulo elástico* (GPa)	Deformação na ruptura (%)
1	13,30	1,90	41,68	1649,50	142,38	1,94
2	15,65	1,89	24,44	826,38	102,96	0,71**
3	15,22	2,01	36,82	1203,44	104,46	0,85**
4	15,88	1,98	44,79	1424,38	105,13	1,28
Média	15,01	1,95	37,58	1296,66	113,73	1,21
Desvio	1,17	0,06	9,39	355,47	19,12	0,56
CV (%)	7,79	3,08	24,99	27,41	16,81	46,28

*Calculado na faixa de 0,05 a 0,25 % de deformação.

**A deformação na ruptura não pôde ser obtida corretamente devido à perda de sinal do extensômetro.

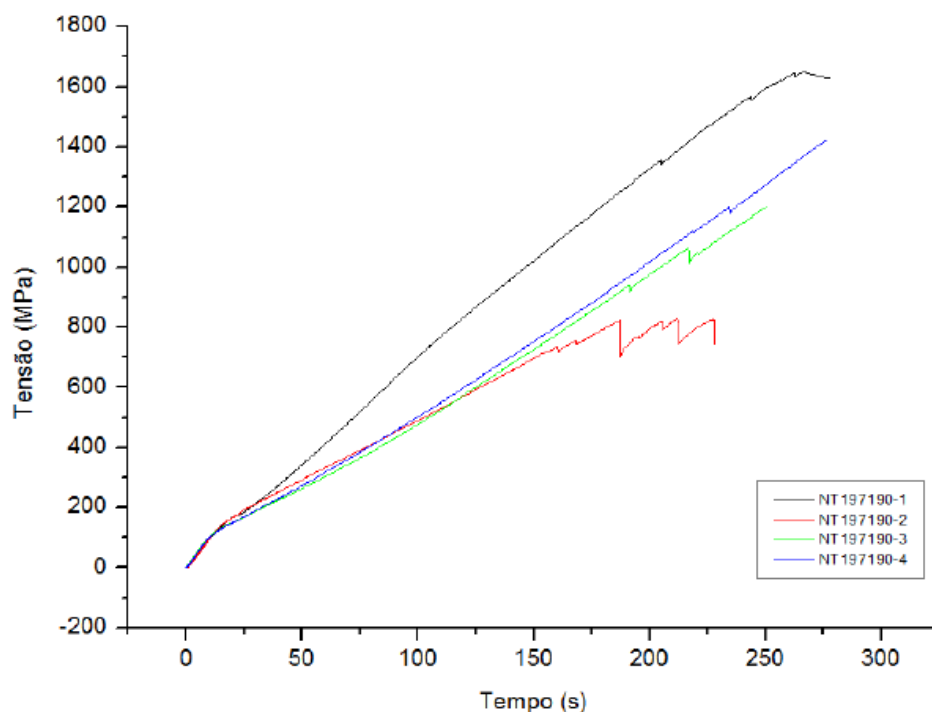


Figura 5: Curvas de tensão vs. tempo do ensaio de tração.

São Carlos, 22 de novembro de 2019.

**MIGUEL LUIS DE
SOUZA:06478419835**

Eng. Dr. Miguel Luis de Souza
Responsável técnico
CREA: 0605056757
miguel@labnewtech.com.br

Digitally signed by MIGUEL LUIS DE SOUZA:06478419835
DN: CN = MIGUEL LUIS DE SOUZA:06478419835, C = BR, O =
ICP-Brasil, OU = Secretaria da Receita Federal do Brasil - RFB
Reason: I am approving this document
Date: 2019.11.22 11:45:05 -03'00'

Nota: Os resultados obtidos somente se referem ao(s) material(is) ensaiado(s), nas condições especificadas. Este relatório somente poderá ser reproduzido na íntegra. A reprodução parcial requer aprovação formal deste laboratório. A Newtech não é responsável pelo uso ou interpretações indevidas que se possam fazer deste documento.

-----FIM DO RELATÓRIO-----

ANEXO A – DATASHEET ALUMÍNIO 5083 – H111 HYDRO

Typical mechanical properties

Typical mechanical properties of Hydro's alloys

Grade	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other elements ¹⁾	
									Each	Total
5083	0,40	0,40	0,10	0.40-1.0	4.0-4.9	0.05-0.25	0,25	0,15	0,05	0,15
6005A	0.50-0.9	0,35	0,30	0.5 ²⁾	0.40-0.7	0.3 ²⁾	0,20	0,10	0,05	0,15
6082	0.7-1.3	0,50	0,10	0.40-1.0	0.6-1.2	0,25	0,20	0,10	0,05	0,15

¹⁾ Includes Ni, Ga, V and listed elements for which no specific limit is shown. Regular analysis need not be made.

²⁾ Mn + Cr: 0.12-0.50

Typical mechanical properties of Hydro's marine alloys

	6005A		6082		5083		
	T4	T6	T4	T6	O	H112	H111
Tensile strength UTS (Mpa)		250 ⁴⁾	205 ⁵⁾	310 ⁶⁾	270 ³⁾	270 ³⁾	275 ³⁾
Proof strength 0.2% (Mpa)		200 ⁴⁾	110 ⁵⁾	260 ⁶⁾	110 ³⁾	125 ³⁾	165 ³⁾
Elongation A min. (%)		8 ⁴⁾	14 ⁵⁾	10 ⁶⁾	12 ³⁾	12 ³⁾	12 ³⁾
Corrosion resistance		5	5	5	6	6	6
Weldability (MIG)		5	5	5	6	6	6
MIG Weld strength UTS (Mpa)		165	170	170	270	270	270

³⁾ t < 25 ⁴⁾ t < 15 ⁵⁾ t < 25 ⁶⁾ 5 < t < 25

Density, kg/dm³ 2.71

Coefficient of linear exp.: $23.8 \times 10^{-6} / K$

Modulus of elasticity: 70,000 Mpa

Modulus of rigidity: 27,000 Mpa

Poisson's ratio: 0,33

Standard alloys for most profiles in this catalogue are 6005A or 6082, some are made in 5083.
For requirements of profiles in 5083, other than in planks

section 8, please get in touch with us and we'll find the ideal solution for your application.

ANEXO B – DATASHEET SISTEMA DE RESINA AR260 E AH260


Sistema de Resina AR260 e AH260
 Datasheet

Descrição

O sistema de resina epoxy AR260 com endurecedor epoxy AH260 é um sistema de cura rápida, de baixa viscosidade, para uso em laminação manual, laminação a vácuo e infusão.

Propriedades Mecânicas

Propriedade	Teste	Unidade	Valor
Cor	Visual	-	Âmbar claro
Dureza Shore D	ASTM D-2240	-	87
Resistência à tração	ASTM D-638	MPa	73,77
Módulo de tração	ASTM D-638	MPa	3157,80
Resistência ao alongamento	ASTM D-638	%	8,8
Resistência à compressão	ASTM D-695	MPa	88,94
Resistência à flexão	ASTM D-790	MPa	199,28
Módulo de flexão	ASTM D-790	MPa	2737,22
HDT - Cura a temperatura ambiente	ASTM D-648	°C	58
HDT - Temperatura de pós-cura	ASTM D-648	°C	98
Impacto Izod, com entalhe	ASTM D-256	kJ/m ²	2,67
Contração	ASTM D-2566	mm/mm	<0,002

Propriedades de Manuseio

Propriedade	Teste	Unidade	Valor
Densidade da Resina	ASTM E-201	Kg/m ³	1150,33
Densidade do endurecedor	ASTM E-201	Kg/m ³	946,63
Viscosidade da Resina a 25°C	ASTM D-2393	cps	1.200
Viscosidade do Endurecedor a 25°C	ASTM D-2393	cps	30
Viscosidade Mista a 25°C	ASTM D-2393	cps	300
Viscosidade Mista a 49°C	ASTM D-2393	cps	140
Taxa de mistura por peso (100 A)	Calculado	-	100A : 26B
Gel time a 25°C (150g massa)	ASTM D-2471	minutos	290
Pot life a 25°C (150g massa)	ASTM D-2471	minutos	120

Armazenagem e Manuseio

O sistema de resina deve ser armazenado em local seco, entre 15,5 e 37,7°C, e deve sempre ser tampado após o uso. Em caso de cristalização do produto, aquecer à temperatura de 40°C até os cristais se dissolverem e mexer bem depois que o produto estiver liquefeito. Sempre utilize ferramentas limpas e secas para misturar e aplicar os produtos. A mistura deve ser feita cuidadosamente e imediatamente antes do uso, seguindo a taxa de mistura descrita neste datasheet. A temperatura do ambiente não deve ser menor que 16°C durante a mistura.