

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise experimental do comportamento mecânico
de juntas híbridas metal-compósito**

Matheus Gutman Busch

Prof. Orientadora: Juliana Primo Basílio de Souza

**Rio de Janeiro
Junho de 2016**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise experimental do comportamento mecânico
de juntas híbridas metal-compósito**

Matheus Gutman Busch

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Prof. Orientadora: Juliana Primo Basílio de Souza

**Rio de Janeiro
Junho de 2016**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

B977 Busch, Matheus Gutman
Análise experimental do comportamento mecânico de juntas híbridas metal-compósito / Matheus Gutman Busch.—2016. xi, 44f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2016.
Bibliografia : f. 42-44
Orientadora : Juliana Primo Basílio de Souza

1. Engenharia mecânica. 2. Juntas (Engenharia) – Propriedades mecânicas. 3. Materiais compostos. I. Souza, Juliana Primo Basílio de (Orient.). II. Título.

CDD 621

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, João Pedro e Silvia, que sempre me deram o suporte necessário para que tivesse toda a tranquilidade para chegar a este importante momento da minha vida e também, aos meus queridos avós João, Suely e Sephora por sempre estarem presentes e me apoiarem ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por poder realizar esta etapa importante em minha vida. Agradeço a todos os meus familiares que sempre me apoiaram. Aos meus amigos de longa data, sempre presentes e contribuindo de alguma forma. Agradecimento especial também aos amigos que o CEFET-RJ me proporcionou ao longo dessa caminhada.

Gostaria de agradecer também à todos os professores que tive ao longo da vida, especialmente aos dessa instituição, que exercem um trabalho duro, porém admirável. E, por fim, em especial a professora Juliana Basílio que me ajudou nesse ano de elaboração de projeto final.

RESUMO

Com o desenvolvimento cada vez mais acelerado das indústrias, existe uma necessidade de investimentos em novas tecnologias de materiais. Nesse quesito, entra o compósito, material leve, que pode ser adaptável às necessidades do cliente, possui boas propriedades mecânicas e custo de fabricação baixo. O compósito vem sendo usado gradativamente em áreas como a da aviação, de transportes e de energia. O presente trabalho tem como foco realizar um estudo sobre o uso de compósitos na fabricação de juntas e reparos para tubulações e estruturas comumente utilizados no setor de energia. Esse estudo foi feito primeiramente analisando os materiais utilizados, posteriormente, a realização de testes no compósito e nas juntas formadas por um compósito e um componente metálico, aderidos por um adesivo epóxi e finalizando com uma análise dos resultados encontrados. Foi verificada uma excelente adesão e, conseqüentemente, uma excelente performance desse tipo de junta, pois a mesma apresentou ótimos resultados quando comparados a outros tipos de juntas.

Palavras-chave: Compósito, juntas, teste.

ABSTRACT

There is a need for investments in new material Technologies since the inscreasingly development of industries. In this aspect, there is the composite, lightweight material which can be adapted to customer needs, good mechanical properties and low cost of manufacturing. The composite has been used gradually in areas such as aviation, transport ann energy. This work focuses is on conducting a study on the use of composites in the manufacture of joits and repairs to pipes and structures commonly used in the energy sector. This study was done by analysing the materials used and testing the composite and the joints formed by a composite and a metal, bonded by an epoxy adhesive, ending with an analysis of the results. This joints presented an excellent adhesion and performance, because it showed excellent results by comparing to other types of joints.

Key-words: Composite, joints, test.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Justificativa.....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.4 Metodologia e Trabalho realizado.....	2
1.5 Organização do Trabalho.....	4
2. Fundamentação Teórica.....	5
2.1 Polímeros.....	5
2.1.1 Contexto histórico.....	6
2.2 Compósitos.....	7
2.2.1 Compósitos Reforçados com Fibras.....	9
2.2.2 Compósitos Com Matriz Polimérica.....	12
2.2.2.1 Resina epóxi.....	12
2.2.3 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Vidro.....	13
2.2.4 Compósitos Laminados.....	15
2.3 Juntas Coladas.....	17
2.4 Adesivos estruturais.....	18
2.4.1 Adesivos Epóxi.....	19
2.5 Teoria da Adesão.....	20
2.5.1 Teoria Mecânica.....	20
2.5.2 Teoria de adsorção.....	21
2.5.3 Teoria da difusão.....	22
2.5.4 Teoria eletrostática.....	23
3. Materiais e métodos.....	24
3.1 Materiais.....	24
3.1.1 Substrato 1: Aço 1020.....	24
3.1.2 Substrato 2: Syntho-Glass® XT.....	26
3.1.3 Adesivo: Syntho-Subsea™ LV.....	27
3.2 Fabricação das juntas.....	28
3.2.1 Preparação da superfície.....	28
3.2.2 União dos substratos.....	29
3.3 Ensaio mecânico.....	31
4. Resultados e Discussão.....	33
4.1 Compósito.....	33
4.2 Juntas.....	36
4.2.1 Fratura das juntas.....	39

5. Conclusão	41
5.1 Trabalhos futuros	41
Referências Bibliográficas.....	42

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Esquema da Metodologia Científica.....	3
FIGURA 2: Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos [8].....	8
FIGURA 3: Representação esquemáticas de compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas e (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente [3]....	10
FIGURA 4: Uso de polímeros reforçados com fibras no Airbus A380 (Partes em cinza) [10]	11
FIGURA 5: Estrutura química de uma resina epóxi DGEBA [8]	12
FIGURA 6: Carro da fabricante Audi com chassis de fibra de vidro [13].....	15
FIGURA 7: Empilhamento de camadas sucessivas reforçadas com fibras para formar um compósito laminado [3]	15
FIGURA 8: Laminado <i>angle-ply</i> [10]	16
FIGURA 9: Laminado <i>cross-ply</i> [10].....	16
FIGURA 10: <i>Single-lap joint</i> [18].....	17
FIGURA 11: Explicação esquemática da teoria da adesão mecânica	21
FIGURA 12: Explicação esquemática da teoria da adesão; a) por adsorção física; b) química	22
FIGURA 13: Explicação esquemática da teoria da difusão	23
FIGURA 14: Explicação esquemática da teoria eletrostática	23
FIGURA 15: Ilustração da junta híbrida colada.....	24
FIGURA 16: Geometria do aço 1020.....	25
FIGURA 17: Placa do compósito Syntho-Glass® XT.....	26
FIGURA 18: Geometria do corpo de prova do compósito.....	26
FIGURA 19: Máquina de jateamento.....	29
FIGURA 20: Gabarito para preparação das juntas (medidas em milímetros).....	30
FIGURA 21: Dimensão da área colada das juntas	30
FIGURA 22: Modelo de fabricação das juntas	31

FIGURA 23: Máquina de ensaio de tração Shimadzu	32
FIGURA 24: Curva força x deslocamento dos corpos de prova 1 – 4	33
FIGURA 25: Comparação das curvas força x deslocamento dos CPs 1 – 4.....	34
FIGURA 26: Curva força x deslocamento das juntas 1 – 5	36
FIGURA 27: Comparação das curvas força x deslocamento das juntas 1 – 5	37
FIGURA 28: Curvas força x deslocamento das juntas de aço IF.....	38
FIGURA 29: Representação esquemática dos modos de fratura em juntas coladas de sobreposição simples [22]	39
FIGURA 30: Perfil da fratura adesiva nas juntas	40

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Composição química da fibra de vidro [3]	14
TABELA 2: Principais características dos epóxidos bicomponentes	19
TABELA 3: Composição química do aço SAE 1020	25
TABELA 4: Propriedades mecânicas do aço SAE 1020.....	25
TABELA 5: Propriedades do <i>Syntho-Glass® XT</i>	27
TABELA 6: Propriedades mecânicas do <i>Syntho-Subsea™ LV</i>	28
TABELA 7: Propriedades mecânicas encontradas nos ensaios dos compósitos.....	35
TABELA 8: Propriedades mecânicas encontradas nos ensaios dos compósitos.....	37

Capítulo 1

Introdução

Atualmente, seria difícil imaginar o mundo em que vivemos sem os plásticos. Eles estão presente na vida de cada pessoa com aplicações que variam de artigos domésticos comuns como a garrafa PET, embalagens de alimentos e isopor, até sofisticados equipamentos científicos e instrumentos utilizados no setor da medicina. Hoje em dia, os engenheiros e designers optam cada vez mais pela utilização de plásticos por causa da sua combinação de propriedades obtidas que não são encontradas em outros tipos de materiais. Os plásticos oferecem vantagens como leveza, resiliência, resistência à corrosão, transparência, facilidade de processamento, etc. [1].

O termo “plástico” refere-se à uma gama de materiais que inclui o nylon, o polietileno (principal composto das sacolas plásticas) e o teflon. O plástico é um material formado por polímeros, mas na maioria dos casos, contém outros componentes. O polímero é um composto orgânico que possui uma estrutura molecular muito grande e tem sido usado a muitos séculos, devido aos que são derivados naturais, no caso, plantas e animais, como a madeira, borracha e algodão. No entanto, apenas no século XIX que foram feitas tentativas para desenvolver um material polimérico sintético, e o primeiro sucesso foi com base em celulose. Este foi um material que futuramente se tornou um avanço importante, pois acabou se tornando um substituto para outros materiais naturais que estavam com pouca oferta, no caso, era o marfim, utilizado em bolas de bilhar [1 - 3].

1.1 Motivação

A união de dois substratos de naturezas diferentes por meio da colagem tem sido uma área com amplas possibilidades de crescimento. O desenvolvimento de novos compósitos estruturais aumentou o uso desse tipo de união no setor industrial, sendo muito utilizado, atualmente, no setor de energia para reparo em campo de tubulações e estruturas. Esse progresso torna atrativo o estudo e pesquisa nessa área, para um melhor entendimento e compreensão da sua aplicação no campo da engenharia.

1.2 Justificativa

Este Projeto faz parte de uma pesquisa de iniciação científica que tem como objetivo o estudo termomecânico de materiais compósitos e adesivos. O estudo nessa área é importante pois estes componentes vem sendo usado cada vez mais no campo da engenharia, incluindo setores como o aeroespacial, de energia, de transportes, no ramo da construção civil, na indústria naval e inclusive na área de materiais para a prática de esportes.

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é o estudo de compósitos laminados pré-impregnados na fabricação de juntas e reparos. Para isso, será feito uma análise experimental do compósito e de juntas coladas formadas por um compósito e um metal e, espera-se observar o seu comportamento mecânico.

1.4 Metodologia e Trabalho realizado

Os procedimentos experimentais serão compostos por testes com: juntas de substrato metal-compósito e com o compósito propriamente dito. Dessa forma, serão avaliadas a resistência mecânica do compósito, da junta híbrida e a adesão do compósito no substrato metálico.

A metodologia deste projeto consiste basicamente na análise experimental através de ensaios realizados com o compósito e as juntas híbridas de acordo com a ASTM 1002 que regulamenta como devem ser realizados os testes de tensão de cisalhamento em juntas coladas do tipo single-lap.

Para facilitar o entendimento da metodologia científica aplicada, a Figura 1 ilustra a sequência de ações que serão tomadas para a realização deste projeto.

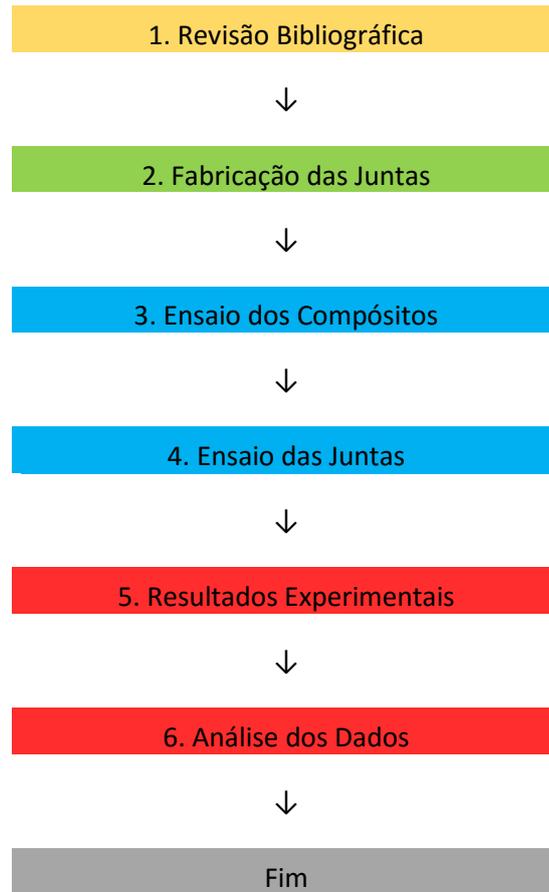


Figura 1: Esquema da Metodologia Científica

1. Revisão bibliográfica: Etapa responsável por fundamentar teoricamente o trabalho. Além disso, trabalhos relacionados ao tema foram citados de forma a contextualizar o presente trabalho com as pesquisas atuais;
2. Fabricação das Juntas: De acordo com o que foi proposto para este projeto, produzir as juntas híbridas para a realização dos ensaios, seguindo as normas indicadas.
3. Ensaio dos compósitos: Avaliar suas propriedades mecânicas, tais como sua resistência mecânica, com o intuito de comparação com os resultados dos testes realizados nas juntas.
4. Ensaio das Juntas híbridas: Submeter as juntas produzidas em ensaios experimentais, à fim de observar o seu comportamento mecânico.
5. Resultados experimentais: Etapa em que consiste basicamente na coleta dos dados encontrados nos testes realizados.
6. Análise dos dados: Etapa final que é responsável por analisar de forma criteriosa os resultados obtidos com os ensaios e poder realizar uma estimativa da vida útil do reparo.

1.5 Organização do Trabalho

Este Projeto foi organizado em 4 etapas. Primeiramente, no capítulo 2, é feita uma introdução e explicação referente ao tema do projeto à fim de proporcionar ao leitor um maior entendimento do experimento realizado. O capítulo 3 apresenta os materiais utilizados e os métodos aplicados para realização dos testes.

O capítulo 4 apresenta uma análise dos resultados encontrados nos testes realizados nas juntas coladas e no compósito. Finalizando o projeto, no capítulo 5, uma conclusão do trabalho será apresentada junto com perspectivas para trabalhos futuros relacionados ao tema.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Polímeros

Polímeros são macromoléculas formadas por pequenas unidades estruturais chamadas de monômeros e são um tipo de material que possui um alto peso molecular, variando de 10.000 a mais de 1.000.000 g/mol. Em contrapartida, substâncias como água (18g/mol) e açúcar (342 g/mol) possuem um baixo valor. Polímeros estão presentes de uma forma numerosa na natureza, em tecidos animais e vegetais (na maior parte como celulose e proteína) [4].

Os polímeros consistem de várias unidades estruturais ligadas por covalência. Por exemplo, o polietileno é um polímero de cadeia longa e é representado por



onde a unidade estrutural é $-CH_2-CH_2-$ e n representa o comprimento da cadeia do polímero. Como exemplo, o monômero etileno forma o polietileno da Eq. (1) e o processo de junção desses pequenos compostos moleculares acontece através de um processo de reação química chamado de polimerização [2].

Um dos tipos de classificação dos polímeros se dá baseado pela sua resposta à elevação de temperatura. Nesse formato, pode-se dizer que existem dois tipos de polímeros: os termoplásticos e os termofixos. Como principal característica, os termoplásticos derretem em altas temperaturas e se solidificam com sua diminuição. Esse processo de aquecimento e arrefecimento pode ser feito diversas vezes sem afetar as propriedades do polímero. Já os termofixos, por outro lado, derretem apenas na primeira vez que são aquecidos. Um processo de cura acontece, ou seja, ocorre o endurecimento do material e depois disso caso haja um novo reaquecimento, o material se degrada [2].

2.1.1 Contexto histórico

A evolução da humanidade sempre esteve ligada com a capacidade do ser humano em criar alternativas para garantir sua sobrevivência e se desenvolver. Com isso, é notável os constantes avanços na área científica, no setor alimentício, de saúde, de transporte e comunicação. Boa parte desse progresso, se dá ao desenvolvimento de materiais adequados que permitem transformar o sonho em realidade [5].

No século XX, uma grande parte das mudanças tecnológicas realizadas pelo Homem se deve ao advento dos polímeros como material primordial para a civilização. Com isso, borrachas sintéticas, plásticos e fibras sintéticas revolucionam até os dias atuais o desenvolvimento de setores industriais, como o automobilístico, têxtil, de embalagens e da medicina. Porém, apesar dos polímeros terem revolucionados o desenvolvimento tecnológico deste último século, do ponto de vista científico, seu surgimento ocorreu na segunda metade do século XIX. O alemão J. Berzelius em 1832 criou o termo polímero para diferenciar moléculas orgânicas que possuíam os mesmos elementos químicos mas não necessariamente as mesmas propriedades químicas. Anos mais tarde, em 1866, em um artigo publicado no boletim da sociedade de química da França por Berthelot, o mesmo observou que o composto químico estireno, quando aquecido a 200 °C durante algumas horas, transforma-se em um polímero. Foi o primeiro polímero sintético reconhecido. Mas foi apenas em 1920, que Hermann Staudinger propôs o conceito de polímeros no sentido que é usado atualmente e o levou ao prêmio Nobel em 1953 por todo o seu trabalho na ciência das macromoléculas. A maioria dos polímeros sintéticos usados atualmente resultam do trabalho realizado por Staudinger [5, 6].

Em 1933, uma empresa do Reino Unido conseguiu pela primeira vez realizar a polimerização no etileno, gerando o polietileno. O resultado foi um material completamente novo para a época e trata-se de um polímero de extrema importância até os dias atuais, pois está presente na composição de sacolas, frascos, embalagens, etc. Na mesma década, em 1938, W. Carothers e sua equipe de pesquisa descobriram o nylon. A partir da década de 40, os polímeros começaram a serem utilizados como substitutos de materiais tradicionais e as pesquisas realizadas constantemente resultaram em redução e eliminação dos principais defeitos encontrados nos polímeros naquela época [6].

O desenvolvimento e crescimento da indústria de polímeros durante os últimos 70 anos tem sido bastante impressionante. O sucesso comercial dos produtos à base de polímeros tem gerado uma procura de tal modo que a produção total de plásticos (por volume) excedeu a produção combinada de todos os metais por mais de 20 anos. A necessidade de desenvolver

borrachas sintéticas devido a interrupção das rotas comerciais durante a Segunda Guerra Mundial serviu como um catalisador para o financiamento dos governos em pesquisas sobre polímeros. Essa condição resultou em um melhor entendimento da natureza dos polímeros, assim como, melhorou as abordagens analíticas e experimentais para o seu comportamento. Nos dias de hoje, modernos adesivos poliméricos e compósitos com matriz polimérica ou fibras de vidro vem sendo usado em diversos setores da indústria como o aeroespacial, automotivo, de energia, etc. [7].

Atualmente, nos Estados Unidos, indústrias como as aeroespaciais e automotivas utilizam mais de 100.000 toneladas de plásticos reforçados de um total de 1 milhão de toneladas, ou seja, aproximadamente 10% [1].

2.2 Compósitos

A rigidez e força dos plásticos pode ser aumentada significativamente com a adição de um reforço. Tem-se, então, o compósito, geralmente composto por dois componentes principais: uma matriz e o reforço na forma de partículas ou na forma de fibras. Em geral, a matriz tem uma resistência baixa em comparação com o reforço que é mais rígido. A função da matriz é para apoiar as fibras e transmitir a carga externa às fibras que devem aguentar o máximo possível da tensão aplicada [1].

O uso dos compósitos como sendo uma classe de materiais distinta aconteceu por volta da metade do século XX através do desenvolvimento de materiais mais complexos como os polímeros reforçados com fibra de vidro. Materiais que possuem características e propriedades específicas são usados em diversas aplicações de alta tecnologia, como a bioengenharia, aeroespacial, submarina e de transporte. Como exemplo, os engenheiros aeronáuticos estão sempre buscando materiais estruturais que apresentem baixas massas específicas e ao mesmo tempo sejam resistentes, rígidos e tenham resistência à abrasão e ao impacto sem serem corroídos com facilidade [3].

Materiais compósitos são considerados como combinações de materiais diferentes na composição ou em forma em macro escala. Os constituintes mantêm duas respectivas identidades no compósito, ou seja, eles não se fundem ou se misturam completamente entre si, porém, agem em acordo. Normalmente, os componentes podem ser fisicamente identificados pois a combinação é realizada em nível macroscópico e exibem, pelo menos, duas fases distintas denominadas de matriz e reforço [8].

Os compósitos agem de acordo com o princípio da ação combinada, que diz que as propriedades de um material são dadas pela combinação das propriedades de ambas as fases constituintes. Com isso, cientistas e engenheiros combinam de modo inteligente vários metais, cerâmicas e polímeros para produzir materiais com as melhores combinações de propriedades mecânicas, tais como rigidez, tenacidade e resistências às condições do ambiente e de temperaturas elevadas [3].

Um esquema simples para a classificação dos materiais compósitos está mostrado na Figura 2 a seguir, que destaca duas divisões principais para os compósitos: reforçados com partículas e reforçados com fibras.

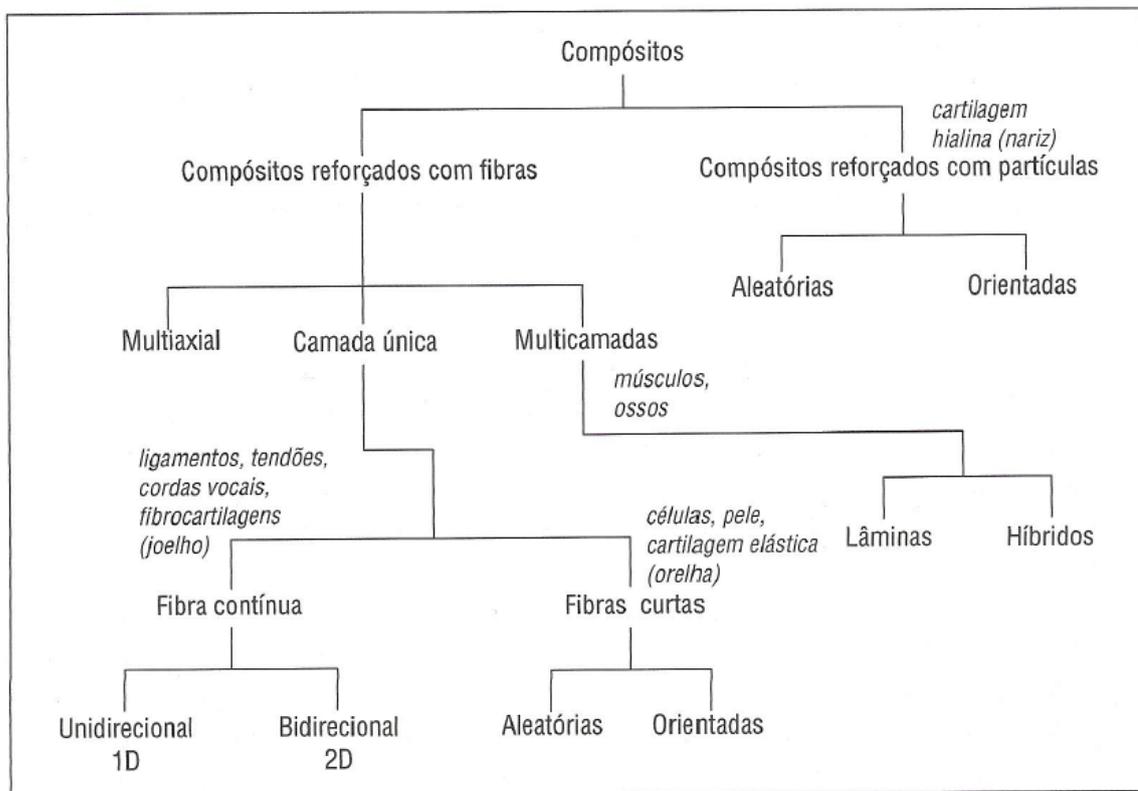


Figura 2: Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos [8]

Em termos de aplicação, os compósitos mais significativos são aqueles em que o reforço está na forma de fibra. O principal objetivo dos compósitos reforçados com fibra é ser um material com alta resistência e/ou rigidez em relação ao peso. Essas características aparecem na forma de propriedades conhecidas como resistência específica e módulo específico. A resistência específica corresponde à razão entre o limite de resistência à tração e o peso específico. Já o módulo específico é calculado pela razão entre o módulo de elasticidade e o peso específico [3].

Essas características tornam os compósitos materiais importantes em diversos setores, inclusive na aviação, onde as fibras de carbono têm se tornado bastante atraente para serem usadas na construção de aeronaves. Uma das principais vantagens das fibras de carbono é seu alto valor de resistência específica que chega a ser mais de cinco vezes maior que a das ligas de aço. Exemplificando, se um feixe de fibra de carbono cujo peso é de 0,1 kgf pode suportar um peso de 100 kgf, então seria necessário um cabo de aço de aproximadamente 0,5 kgf para suportar o mesmo peso. Portanto, a resistência específica se torna um parâmetro de extrema importância, já que permite uma redução de até 25% no peso máximo de decolagem de uma aeronave comercial que utiliza bastante os compósitos de fibra de carbono [9].

2.2.1 Compósitos Reforçados com Fibras

Os compósitos reforçados com fibras consistem em um material que possuem fibras de alta resistência incorporados à uma matriz. Dessa forma, ambas as fases mantêm suas identidades física e química e ao mesmo tempo proporcionam uma combinação de propriedades que não é possível ser alcançada com nenhum dos componentes agindo isoladamente. Em geral, as fibras são o componente que age contendo a carregamento, enquanto que a matriz mantém a carga na localização e direção desejada e os protege de danos ambientais, como por exemplo, altas temperaturas e umidade [10].

A resistência e outras propriedades dos compósitos reforçados com fibras sofre uma influência significativa de 3 fatores. São eles:

- O arranjo ou a orientação das fibras uma em relação às outras;
- A concentração das fibras;
- A distribuição das fibras;

São possíveis duas formações em relação à orientação das fibras: um alinhamento das fibras paralelo ao eixo longitudinal em uma única direção ou um alinhamento totalmente aleatório. Geralmente, as fibras contínuas são alinhadas, enquanto as fibras descontínuas podem ser alinhadas, orientadas aleatoriamente ou parcialmente orientadas. As melhores propriedades são alcançadas em um compósito quando suas fibras estão orientadas de forma contínua [3]. Essas diferentes orientações e concentrações das fibras está mostrado na Figura 3.

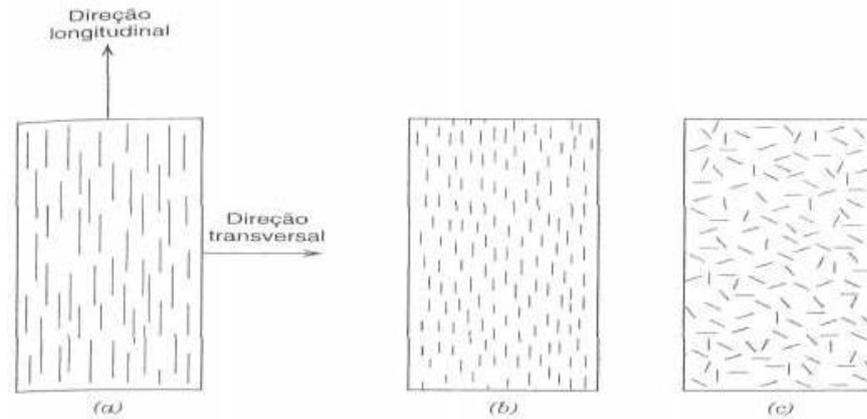


Figura 3: Representação esquemática de compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas e (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente [3].

As fibras podem ser divididas em três classificações diferentes: whiskers, fibras e arames. Os whiskers são monocristais muito finos que possuem um comprimento extremamente elevado em relação a seu diâmetro e, apesar da sua elevada resistência, não é extensivamente utilizado devido ao seu alto valor no mercado. Já os arames possuem grandes diâmetros e normalmente são de aço, molibdênio ou tungstênio. São usados como reforços radial de aço nos pneus de automóveis, nas carcaças de foguetes e em mangueiras de alta pressão. Os classificados como fibras, possuem pequenos diâmetros e podem ser tanto policristalinos quanto amorfos (sem forma definida). São geralmente polímeros ou cerâmicas (vidro, carbono, óxido de alumínio, carbetto de silício, grafite, etc.) [3].

A fase matriz dos compósitos reforçados com fibra pode ser de metal, polímero ou cerâmica. Geralmente, utiliza-se os metais e polímeros, pois estes materiais conferem ductilidade ao compósito. A matriz tem várias funções; Entre elas, ligar as fibras umas às outras e atuar como o meio pelo qual a tensão que é aplicada externamente seja transmitida e distribuída para as fibras. Apenas uma pequena porcentagem da carga aplicada é suportada pela matriz. Outra função, é proteger as fibras contra danos superficiais decorrentes de abrasão mecânica ou de reações químicas com o ambiente. Por fim, a matriz faz com que as fibras fiquem separadas umas das outras e, por causa da sua baixa dureza e plasticidade, ajuda a prevenir a propagação de trincas de uma fibra para outra. Logo, funciona como uma barreira à propagação de trincas [3].

A aplicação comercial e industrial de compósitos poliméricos reforçados com fibras é bem variada. As principais áreas são a de aviões, aeroespacial, automotivo, artigos esportivos, marinha e de infraestrutura. Porém, esses compósitos também são usados em menor escala em eletrônicos, construção civil, móveis, indústria de petróleo e medicina. Sendo que, no campo de aeronaves militares e comerciais, é onde esse material, atualmente, é essencial, já que, a redução de peso é fundamental para velocidades mais altas e maiores cargas suportadas [10].

O Airbus A320, de 1988, foi o primeiro avião comercial a usar todo o material da sua parte traseira, de compósito. A Figura 4 mostra o uso de compósitos reforçados com fibra no Airbus A380 que foi introduzido em 2006. 25% de todo o seu peso é constituído de material compósito [10].

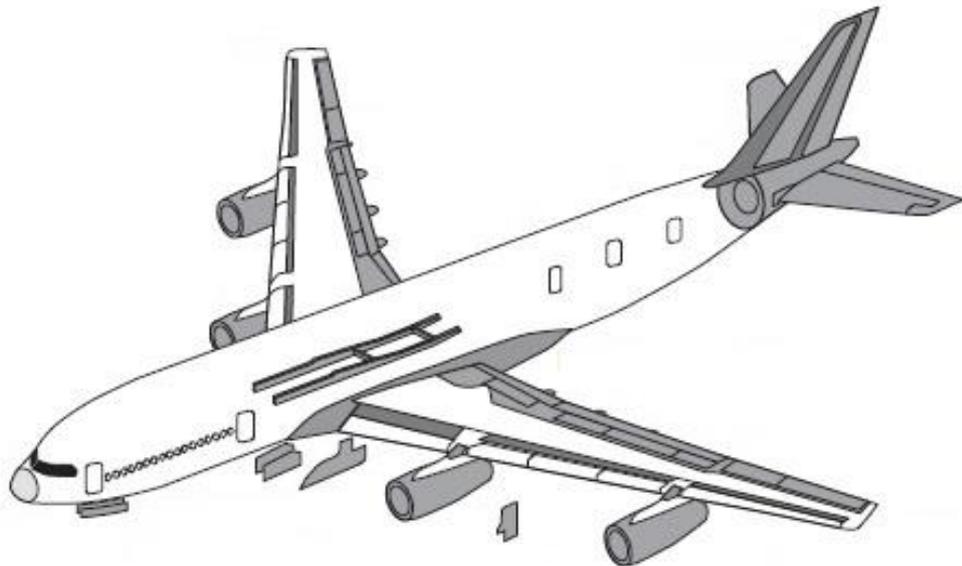


Figura 4: Uso de polímeros reforçados com fibras no Airbus A380 (Partes em cinza) [10]

2.2.2 Compósitos Com Matriz Polimérica

Os compósitos com matriz polimérica (PMC – Polymer-matrix composites) são materiais que possuem uma resina¹ polimérica como a sua fase matriz e com fibras comumente de vidro, carbono ou aramida como meio de reforço. Esses materiais são usados em grande quantidade devido as suas propriedades, como resistência e rigidez, à temperatura ambiente, da facilidade de fabricação e do seu custo [3].

Esses compósitos podem ser divididos em: plásticos reforçados e compósito avançado. A distinção desses dois grupos se dá pelo nível das propriedades mecânicas (geralmente resistência e rigidez). Porém, não há um limite concreto que separem os dois. Os plásticos reforçados são relativamente baratos e consistem tipicamente de uma resina poliéster reforçada com uma fibra de vidro de baixa rigidez. Já os compósitos avançados, seu uso apenas nos últimos 15 anos, tem como principal aplicação o setor aeroespacial. Possui resistência e rigidez superiores e são relativamente caros [11].

2.2.2.1 Resina epóxi

As resinas epóxi são termorrígidos (plásticos de estrutura rígida) de alto desempenho que são usadas em vários setores da indústria, como a de eletrônica, de embalagem, construção civil e transporte. É aplicada em maior quantidade em adesivos, equipamentos para a indústria química, compósitos estruturais e laminados elétricos. As resinas epóxi mais utilizadas têm como base o diglicidil éter do bisfenol A, conhecido como, DGEBA, cuja estrutura básica é esquematizada na Figura 5 [8].

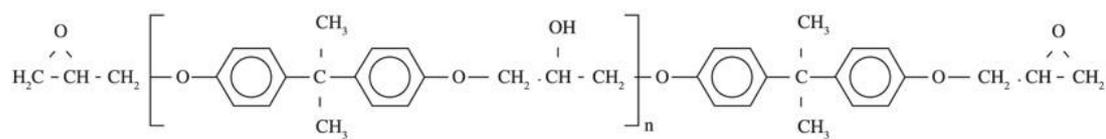


Figura 5: Estrutura química de uma resina epóxi DGEBA [8]

Vários agentes de cura são utilizados no processamento de resinas epóxi e estes afetam as propriedades do material curado. A cura de polímeros termorrígidos é um processo de polimerização que transforma a resina líquida em estado sólido e é iniciada pela adição de

¹ Resina: Nesse contexto refere-se a um plástico reforçado, com alto peso molecular.

pequenas quantidades de um agente de endurecimento antes de incorporar fibras na mistura líquida e gera um aumento no peso molecular do polímero. Pode-se definir também que a cura é um processo que através de reações químicas, provoca a mudança de propriedades de uma resina. Em geral, a resistência à tração e estabilidade térmica possuem uma melhora enquanto que a tensão de ruptura é reduzida [8, 10].

O tempo e temperatura de cura para completar a polimerização dependem do tipo e quantidade de agente de cura. Com alguns agentes, a reação procede à temperatura ambiente, mas com outros é necessário um aquecimento. Por vezes, aceleradores são adicionados à mistura líquida para acelerar uma reação que está lenta e encurtar o tempo de cura [10].

A estequiometria da mistura entre o epóxi e o endurecedor é fundamental na definição das propriedades a serem obtidas. O ideal, é que não haja nenhuma parte de epóxi ou agente de cura que não tenha reagido após ser realizado todo o processo de cura, pois dessa forma, as propriedades obtidas estarão otimizadas [8].

2.2.3 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Vidro

A fibra de vidro é o tipo de fibra mais utilizado em compósitos com matriz polimérica. Isso se dá principalmente ao seu baixo custo, elevada resistência química, excelentes propriedades de isolamento e uma boa resistência à tração. Suas desvantagens estão associadas ao seu baixo módulo de elasticidade, alta densidade, alta dureza, sensibilidade à abrasão durante manuseio e a baixa resistência à fadiga [8, 10].

A resistência à tração nas fibras de vidro está no intervalo entre 1,72 e 2,07 GPa. Sua diminuição acelera conforme a superfície entra em contato com cargas cíclicas, já que esse material não possui uma boa resistência à fadiga. A resistência a tração também é reduzida em ambiente higrotérmico desfavorável (umidade e temperatura) [10]. Xu Jiang [12] realizou um experimento para verificar como um compósito reforçado com fibra de vidro se comporta em um ambiente com essas características e confirmou que um ambiente quente e molhado pode acelerar significativamente o processo de enfraquecimento do compósito por umidade.

As fibras de vidro, ou *Fiberglass*, em inglês, podem estar orientadas de forma contínua ou descontínua em uma matriz polimérica. Os diâmetros das fibras variam entre 3 μm e 20 μm . A composição do vidro mais comumente utilizado para a formação dessas fibras está apresentado na Tabela 1 [3].

Tabela 1: Composição química da fibra de vidro [3]

Composição (%p)					
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	MgO
Fibra de vidro	55	16	15	10	4

A fibra de vidro é bastante utilizada também por outras razões. É estirado com facilidade na forma de fibras a partir do seu estado fundido. É um material que possui baixo custo de fabricação comparado a outros e possui uma vasta variedade de técnicas de fabricação. É relativamente resistente e ao se juntar à uma matriz de plástico, gera um compósito de alta resistência específica. Possui uma composição química que, quando associado a diversos plásticos, torna o compósito bom para ser utilizado em ambientes corrosivos [3].

Existem algumas limitações para as fibras de vidro. A maioria dos materiais que as possuem está limitada a temperaturas de serviço abaixo de 200 °C e apesar de apresentarem resistências elevadas, não possuem a rigidez necessária para algumas aplicações, como elementos estruturais de pontes [3].

Materiais em fibra de vidro tem sido utilizados em diversas aplicações, entre elas, para carrocerias de automóveis e cascos de barcos, tubulações e pisos industriais. Todo o setor de transporte está utilizando, cada vez mais, quantidades de plásticos reforçados com fibras de vidro com o intuito de reduzir o peso dos veículos e aumentar a eficiência dos combustíveis. Como exemplo, tem-se o chassi do Audi TT concept, mostrado na Figura 6, que é todo de fibra de vidro, o que junto com outras mudanças, provoca uma diminuição de 300 Kg no peso total do carro [13].



Figura 6: Carro da fabricante Audi com chassis de fibra de vidro [13]

2.2.4 Compósitos Laminados

Um compósito laminado é o compósito estrutural mais comum. É composto por lâminas que são empilhadas (laminado) e subsequentemente unidas umas às outras, de tal modo, que a orientação da direção de alta resistência varie com cada camada sucessiva como pode ser visto na Figura 7. Um compósito laminado apresenta resistência relativamente alta em várias direções no plano bidimensional, porém é muito difícil prever seu complexo processo de falha, já que cada camada possui diferentes orientações de fibra [3, 14].

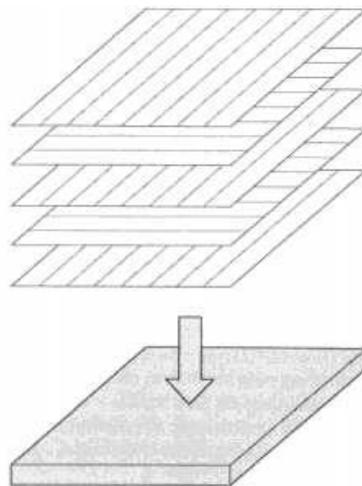


Figura 7: Empilhamento de camadas sucessivas reforçadas com fibras para formar um compósito laminado [3]

Compósitos laminados têm sido estudados por muitos devido a sua elevada resistência e rigidez comparado ao seu peso e o fato de que as direções das suas propriedades mecânicas podem ser adaptadas conforme a aplicação do material. Existem diversos tipos de orientação das lâminas, os dois mais aplicados estão citados abaixo [10, 15].

- *Angle-ply* (Figura 8), onde as fibras estão orientadas em ângulos alternados da forma $/\theta/-\theta/\theta/-\theta/$.

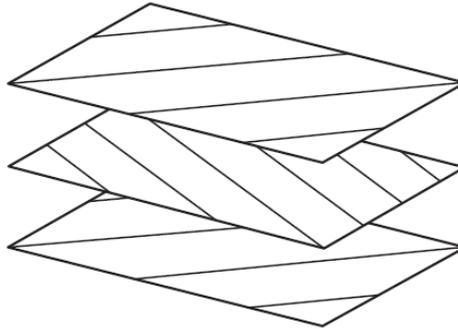


Figura 8: Laminado *angle-ply* [10]

- *Cross-ply* (Figura 9), onde as fibras estão com as camadas na forma $/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/$.

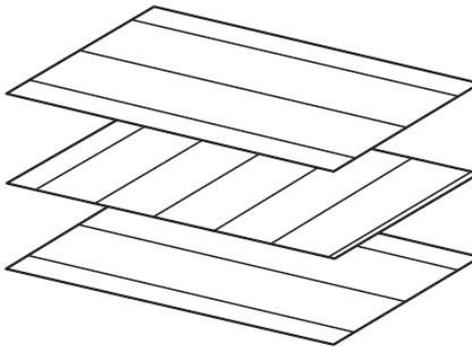


Figura 9: Laminado *cross-ply* [10]

Um estudo [15] foi realizado para verificar as mudanças das propriedades devido à múltiplas rupturas em um laminado *cross-ply* envelhecido em ambiente higrotérmico. Constatou-se que houve uma redução do coeficiente de Poisson (responsável pela deformação transversal de um material) e uma pequena mudança no módulo de elasticidade. Portanto, as propriedades do material foram consideradas dependentes da temperatura e umidade.

2.3 Juntas Coladas

Juntar compósitos em outro componente, pode ser feito de através de parafusos, rebites ou adesivos. Como essas juntas se comportam é basicamente influenciada pelo compósito, porém, as juntas com adesivos (juntas coladas) fornecem uma transferência de carga bem mais eficiente que as juntas com parafuso ou rebites (juntas mecânicas) [16].

Nas juntas coladas, a carga é transmitida de um substrato (componente) para o outro, de forma suave, através de uma camada adesiva justaposta que serve como um meio para transmissão de carga. A maior diferença entre a ligação através de um adesivo e as juntas mecânicas é a área de conexão. A área de juntas coladas é bem maior, o que faz com que a concentração de tensão seja minimizada e a distribuição da tensão seja mais uniforme ao longo da região de sobreposição. Porém, outras características tornam as juntas coladas mais atrativas às juntas mecânicas, entre elas, resistência superior à fadiga, excelente relação peso-resistência, custo de processo de fabricação e melhor aparência visual [17, 18].

A Figura 10 mostra o modelo geométrico para uma junta colada do tipo cisalhamento-simples (*single-lap joints – SLJ*), que tem como característica ser eficiente e simples e é bastante utilizada em aplicações industriais, além de ser modelo padrão para testes de adesivos [18].

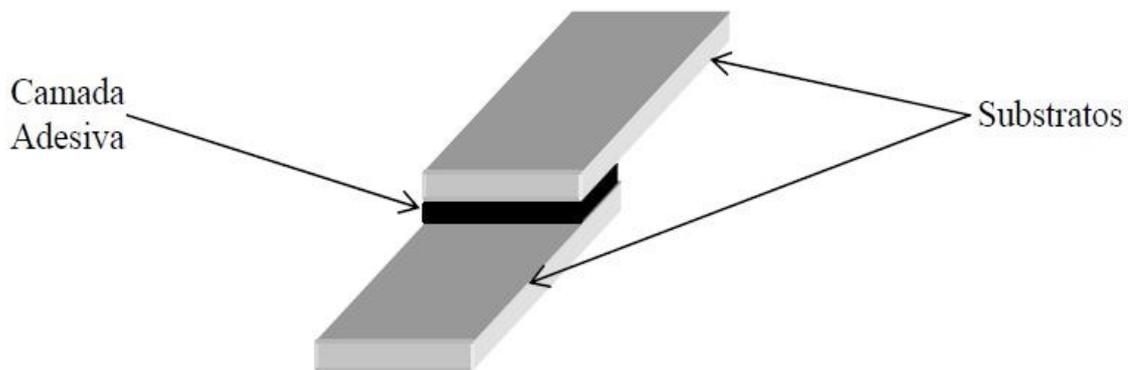


Figura 10: *Single-lap joint* [18]

Shiuh-Chuan [17] realizou um estudo interessante fazendo uma análise da tensão em uma junta do tipo *single-lap* com dois compósitos como substrato e desenvolveu um modelo analítico que, quando comparado com o modelo em elementos finitos, apresentam resultados semelhantes. Obteve-se algumas conclusões interessantes, como:

- O ponto de maior concentração de tensão ocorre nas extremidades livres da região com adesivo. A tensão de cisalhamento e normal na camada adesiva são responsáveis para o começo do processo de falha da junta
- O aumento da espessura do adesivo conduz para que a região com menor tensão de cisalhamento seja na região colada. Assim, uma camada mais espessa de adesivo torna a junta mais resistente, porém existe um limite ótimo, que é em torno de 0.5mm.
- No caso de dois substratos distintos entre si, a região com maior tensão de cisalhamento é a da extremidade livre da região com adesivo perto do componente com maior rigidez.
- À medida que as espessuras dos substratos sejam diferentes, o maior valor de tensão é encontrado na extremidade livre da região colada mais perto do componente mais fino.

Como foi citado anteriormente, o setor aeroespacial vem usando cada vez mais materiais desse escalão. Um estudo [19] foi feito para desenvolver um modelo numérico através de uma análise em elementos finitos para simular juntas coladas atuando em temperaturas de aplicações aeroespaciais. Uma outra pesquisa nessa área [20], verificou como se comporta uma junta colada em um ambiente severo, com variações cíclicas de umidade e temperatura.

2.4 Adesivos estruturais

Os adesivos utilizados em aplicações estruturais são feitos de material polimérico sintético, devido a sua elevada resistência e desempenho. Segundo Da Silva [22], a principal função do adesivo é “a de manter ligadas as estruturas e de serem capazes de resistir a cargas elevadas sem grande deformação”.

Os adesivos em geral são classificados de acordo com a sua composição química, com isso, tem-se os termoendurecíveis, termoplásticos e elastômeros. Os termoendurecíveis são geralmente os adesivos aplicados em projetos estruturais, sua característica principal é de que

não podem ser aquecidos e amolecidos repetidamente após sua cura inicial. Estes são utilizados por causa da necessidade de elevada resistência.

2.4.1 Adesivos Epóxi

É a família de adesivos mais versátil pela sua boa aderência a diversos substratos. Possui uma excelente resistência à tração, além de resistir bem à umidade, ao óleo e muitos outros solventes. Os adesivos epóxi podem ser comercializados sob a forma de um componente ou vários (dois ou mais) componentes. No presente trabalho, foi utilizado o composto por duas partes: um componente é o epóxido e, o outro, o endurecedor. A Tabela 2 a seguir ilustra as suas principais características.

Tabela 2: Principais características dos epóxidos bicomponentes

Forma	2 partes em pasta	
Método de aplicação	Mistura manual, mistura e aplicação automática	
Cura	Temperatura ambiente (pode ser acelerada com a temperatura)	
Temperatura de serviço	-40 a 100°C	
Vantagens	Resistência e durabilidade	
Desvantagens	Cura lenta. Mistura (bolhas)	
Resistência ao meio ambiente	Água	Boa
	Solvente	Boa
	Óleo	Boa
Saúde e segurança	Dermatose, problemas respiratórios	
Aplicações	Aviões, helicópteros, carros, comboios, artigos desportivos,...	

2.5 Teoria da Adesão

Ao trabalhar com juntas coladas, e conseqüentemente, adesivos, é necessário realizar uma introdução sobre o processo de adesão. Diversas teorias foram desenvolvidas para explicar o fenômeno da adesão, porém nenhuma engloba de forma completa e satisfatória. A seguinte definição foi realizada por Souheng Wu: “Adesão se refere a um estado em que dois corpos distintos estão em contato e uma força ou trabalho mecânico pode ser transferido através da superfície de contato” [21].

A principal função do adesivo é unir partes, e essa ligação se dá através da soma de forças mecânicas, físicas e químicas que se sobrepõem e se influenciam. Ao longo dos anos, quatro teorias gerais de adesão foram mais estudadas e desenvolvidas, são elas: mecânica, adsorção, difusão e eletrostática. Porém, mais recentemente, outras teorias vêm sendo propostas para descrever o mecanismo de ligação, como a da molhabilidade e da ligação química. Na maioria das vezes, é complicado atribuir um único mecanismo de adesão à uma ligação adesiva, sendo o mais provável, uma combinação de diferentes teorias. A seguir, será apresentado um breve resumo sobre cada teoria para um melhor entendimento sobre o processo de adesão [21, 22].

2.5.1 Teoria Mecânica

Segundo Sina Ebnesajjad [21] “a adesão ocorre pela penetração do adesivo nos poros, cavidades, e outras irregularidades encontradas na superfície do substrato”. Da silva [22] complementa dizendo que “o adesivo deve molhar convenientemente o substrato e também ter as propriedades adequadas para penetrar nos poros e aberturas em um tempo razoável”. Porém, essa teoria não é aplicável a todos os casos, já que uma boa adesão também pode ocorrer em superfícies lisas. A Figura 11 a seguir, demonstra como funciona esse processo de adesão mecânica.

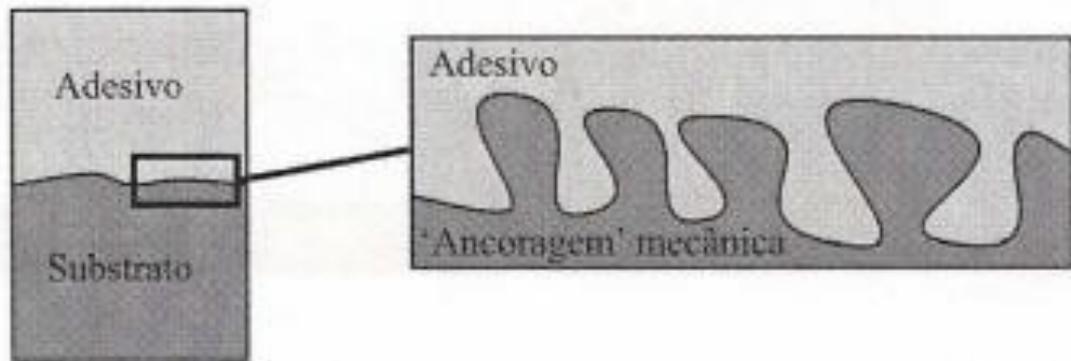


Figura 11: Explicação esquemática da teoria da adesão mecânica

Vale ressaltar que a adesão melhora conforme são realizados tratamentos superficiais específicos que resultam em uma microrugosidade do substrato, o que provoca uma melhora da resistência e durabilidade devido ao processo de encravamento mecânico que é registrado na teoria mecânica de adesão [22].

2.5.2 Teoria de adsorção

Tradicionalmente conhecida como teoria da adsorção, mais recentemente a mesma foi analisada e dividida em duas escalas de ação, no nível molecular através da molhabilidade e da camada limite e no nível atômico com a ligação química. Essas análises também podem ser colocadas em duas frentes: adsorção química e física. Segundo Da Silva [22], “esta teoria depende essencialmente da utilização das forças de superfície. Desde que as moléculas do adesivo e do substrato possam ficar suficientemente próximas umas das outras, as forças de van der waals promovem a adsorção física”. Já a adsorção química se dá pelas interações ácido-base e ligações de hidrogênio. Os dois tipos de adsorção estão representados pela Figura 12 a seguir.

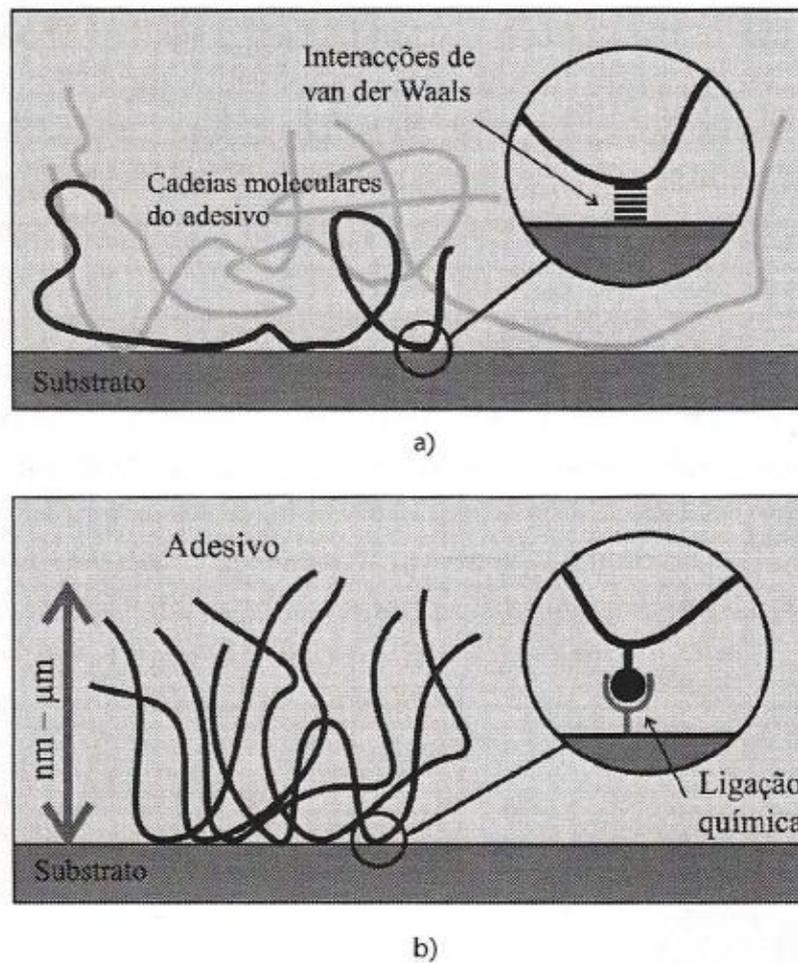


Figura 12: Explicação esquemática da teoria da adesão; a) por adsorção física; b) química

2.5.3 Teoria da difusão

Em uma escola Russa dirigida por Voyutskii (1962) e Vasenin (1965) foi iniciada essa teoria que é importante para a adesão de materiais poliméricos, porém não aplicável para ligações de adesivo com metais. Esta teoria sugere que a adesão é feita através da interdifusão de moléculas entre o adesivo e o substrato. Ou seja, conforme Da Silva [22] descreve, “A extremidade de uma cadeia de uma molécula de polímero de uma superfície difunde na estrutura de uma segunda superfície formando uma ponte ou ligação através da interface”. A Figura 13 representa esquematicamente esse processo.

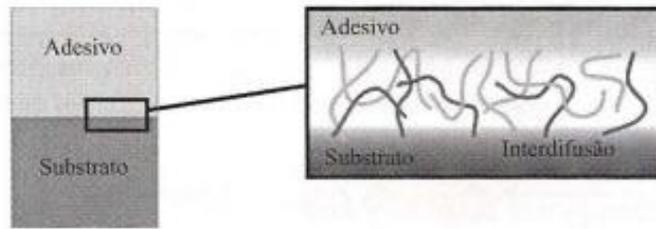


Figura 13: Explicação esquemática da teoria da difusão

2.5.4 Teoria eletrostática

Também desenvolvida por um Russo, esta teoria é utilizada exclusivamente para adesivos em fita sensíveis à pressão. Deryagin (1955) propõe que a adesão se dá pelos efeitos eletrostáticos entre o adesivo e o substrato. Uma força eletrostática, na forma de uma dupla camada elétrica formada pelas cargas negativas e positivas que se atraem, é formada, provocando forças que são responsáveis pela resistência à separação, conforme ilustrado pela Figura 14. Esta teoria é comprovada pelo fato de serem notadas descargas elétricas ao realizar a separação do adesivo ao substrato. [21, 22]

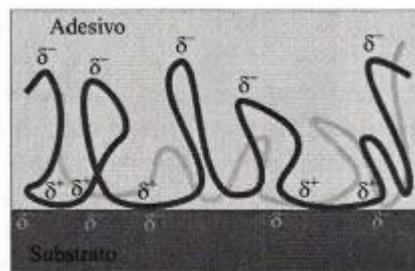


Figura 14: Explicação esquemática da teoria eletrostática

Capítulo 3

Materiais e métodos

Neste capítulo serão abordados os materiais que serão utilizados na formação da junta híbrida, suas respectivas fabricações e a metodologia aplicada para realização da análise.

3.1 Materiais

A junta híbrida, principal parte do estudo deste projeto, possui esse nome pois constitui-se da união de dois materiais distintos, no caso, entre um compósito laminado de matriz polimérica e um componente metálico, aderidos por um adesivo epóxi.

Para um melhor entendimento do projeto, o componente metálico será chamado de substrato 1 e o compósito de substrato 2, conforme ilustrado pela Figura 15 abaixo.

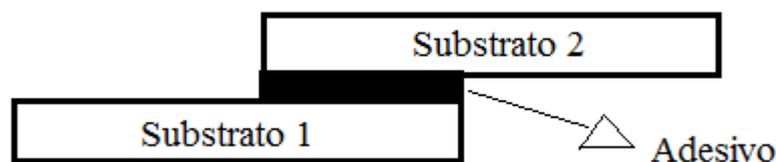


Figura 15: Ilustração da junta híbrida colada

3.1.1 Substrato 1: Aço 1020

O aço SAE 1020 é um dos aços mais comuns existentes no mercado e possui uma excelente relação custo benefício quando comparado com aços utilizados para o mesmo propósito. É bastante utilizado em componentes mecânicos de uso como engrenagens, eixos, virabrequins, eixos-comando, pinos guia, etc. É um aço de boa soldabilidade e forjabilidade, porém apresenta uma baixa resistência mecânica e usinabilidade.

As chapas utilizadas para confecção dos corpos de prova possuíam o dimensionamento de acordo com a Figura 16 abaixo.

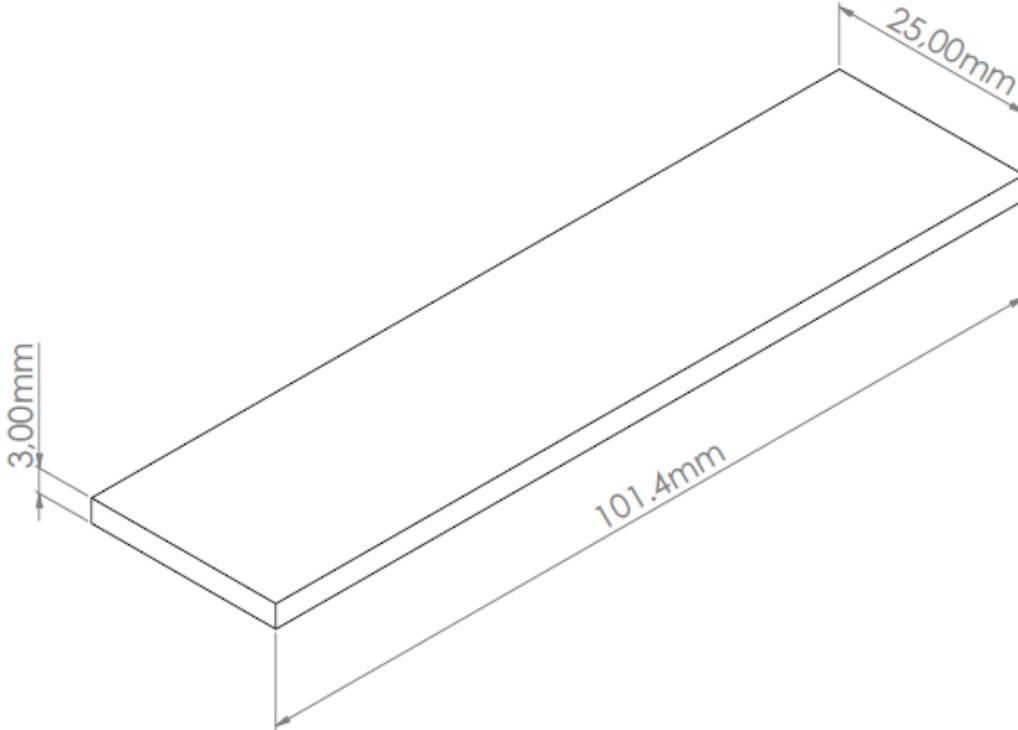


Figura 16: Geometria do aço 1020

Os valores de composição química e propriedades mecânicas do Aço SAE 1020 estão representados a seguir pelas Tabelas 3 e 4, ambas adaptadas do CALLISTER [3].

Tabela 3: Composição química do aço SAE 1020

Aço	Composição Química (%)			
	C	Mn	P (máx.)	S (máx.)
SAE 1020	0,18 - 0,23	0,30 - 0,60	0,03	0,05

Tabela 4: Propriedades mecânicas do aço SAE 1020

	Aço
Propriedades	SAE 1020
Limite de Resistência à tração (Mpa)	380
Limite de escoamento (Mpa)	210
Ductilidade (% AL)	25

3.1.2 Substrato 2: Syntho-Glass® XT

O Syntho-Glass® XT é um compósito comercial com fibras de vidro bidirecionais pré-impregnadas usado para reparar e reforçar tubulações e estruturas ou controlar corrosões, tanto internas, quanto externas.

Segundo a própria empresa que o fabrica (Neptune Research Inc.), esse compósito tem diversas aplicações, entre elas: para a integridade, transmissão e distribuição de tensões em tubulações, risers utilizados na indústria de óleo e gás, reparo de partes soldadas de embarcações, flanges, etc. Sua composição é constituída com cerca de 70% de tecido de fibra de vidro e os outros 30% distribuídos entre hidrocarbonetos e lubrificantes.

Com o propósito da realização de ensaios, a empresa cede este compósito em forma de placa com 4,3 mm de espessura, após o tecido de fibra de vidro sofrer o processo de laminação na forma cross-ply ($0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ$), conforme apresentado na Figura 17.



Figura 17: Placa do compósito Syntho-Glass® XT

Suas dimensões são ilustradas pela Figura 18 a seguir.

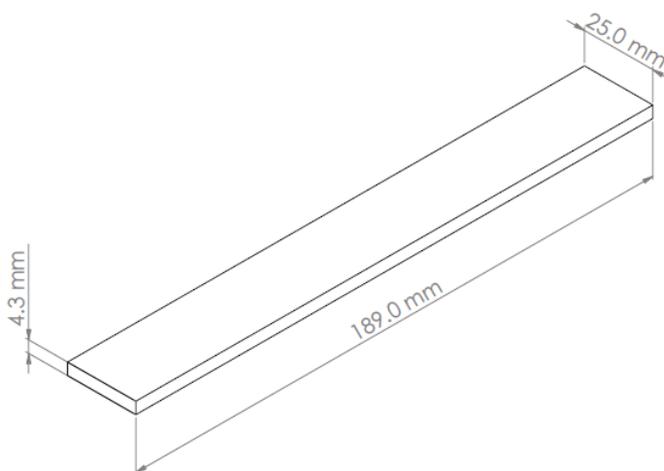


Figura 18: Geometria do corpo de prova do compósito

A Tabela 5 a seguir mostra algumas das propriedades deste compósito.

Tabela 5: Propriedades do *Syntho-Glass® XT*

Propriedade	Valores	
	Direção radial	Direção axial
Módulo de elasticidade	30,5 GPa	15,8 GPa
Coefficiente de dilatação térmica	10,3 ppm/°C	15,14 ppm/°C
Dureza (<i>Shore D</i>)	83	
Espessura do laminado	0,013 mm	
Coefficiente de Poisson	0,133	

3.1.3 Adesivo: *Syntho-Subsea™ LV*

Esse adesivo, também fabricado pela Neptune Research Inc., consiste de uma mistura de epóxi líquida, polímero e agentes de cura que permite repelir água de superfícies molhadas e assim garantir uma ligação permanente.

Sua formulação é isenta de solventes que garantem segurança e máximo desempenho técnico. Também é encontrada fibras de Kevlar (fibra sintética bastante resistente e leve ao mesmo tempo, amplamente utilizada em coletes à prova de bala), o que possibilita a sua em diversas aplicações, incluindo a submarina. Esse adesivo possui características de alta performance, tais como excelente adesão, resistência a altas pressões, resistência a baixas e altas temperaturas, assim como excepcional resistência a produtos petrolíferos.

O *Syntho-Subsea™ LV* é comumente utilizado em:

- Revestimentos anticorrosivos
- Reparos de tubulações
- Reparos de concretos

A Tabela 6 apresenta as propriedades mecânicas deste adesivo.

Tabela 6: Propriedades mecânicas do Syntho-Subsea™ LV

Propriedades	Syntho-Subsea™ LV
Resistência à tração (MPa)	41,4
Resistência à compressão (MPa)	50,9
Resistência à flexão (MPa)	31,4
Módulo de flexão (Mpa)	980
Esforço cortante (Mpa)	12,3
Resistência à abrasão (mg/ciclo)	34/1000

3.2 Fabricação das juntas

Forma produzidas um total de cinco juntas metal – compósito do tipo sobreposição simples. Para a fabricação das juntas, certas medidas foram tomadas para uma melhor realização do processo, são elas: preparação das superfícies, verificação das condições de montagem (temperatura e umidade local), condições de cura (temperatura ambiente), utilização do dispositivo de posicionamento e aplicação do adesivo de forma contínua e homogênea.

3.2.1 Preparação da superfície

Segundo Da Silva [22], “A preparação superficial é uma das etapas mais importantes do processo de colagem. A resistência de uma junta adesiva aumenta significativamente quando depósitos soltos tais como produtos de corrosão, pintura pouco aderente e outros contaminantes são removidos da superfície”.

O método utilizado de preparação da superfície do aço foi o de jateamento. Também chamado de grenalhagem, o mesmo consiste em projetar partículas abrasivas sobre a superfície do material desejado. A Figura 19 apresenta uma máquina que realiza este processo e que

permite preparar as superfícies usando vidro, óxido de alumínio ou aço. Essas partículas são interessantes porque possuem arestas cortantes.



Figura 19: Máquina de jateamento

As chapas de aço foram jateadas na região da colagem com granalha de aço G40 (granalha angular capaz de fornecer níveis de rugosidade compatíveis com as exigências do adesivo utilizado) à uma pressão de 9 bar, em uma máquina de jateamento modelo PP-80. Após o processo de jateamento, acetona foi utilizada tanto nas chapas de aço como nos compósitos para retirar resíduos e gorduras.

3.2.2 União dos substratos

Para a fabricação das juntas é necessário um gabarito (Figura 20) que permite alinhar os substratos e esperar a cura do adesivo aplicado. Foi utilizado um gabarito de aço carbono, com furações para pinos de acordo com as medidas do corpo de prova.

O procedimento de colagem foi realizado em ambiente com temperatura controlada em 20 °C. Cera desmoldante foi aplicada ao gabarito para facilitar posteriormente a retirada de adesivo que venha a aderir ao dispositivo devido ao seu excesso durante a aplicação.



Figura 20: Gabarito para preparação das juntas (medidas em milímetros)

Batentes foram utilizados para permitir a espessura correta da camada de adesivo. Uma espátula foi utilizada para aplicar o adesivo no substrato. Por fim, travas foram utilizadas para fixar e garantir a espessura desejada de 2,0mm.

Após a colagem dos substratos, a cura do adesivo foi realizada a temperatura ambiente por 24 horas, para que assim atingisse suas propriedades máximas de acordo com o fabricante.

A Figura 21 ilustra como ficaram as juntas e apresenta a dimensão da área colada.

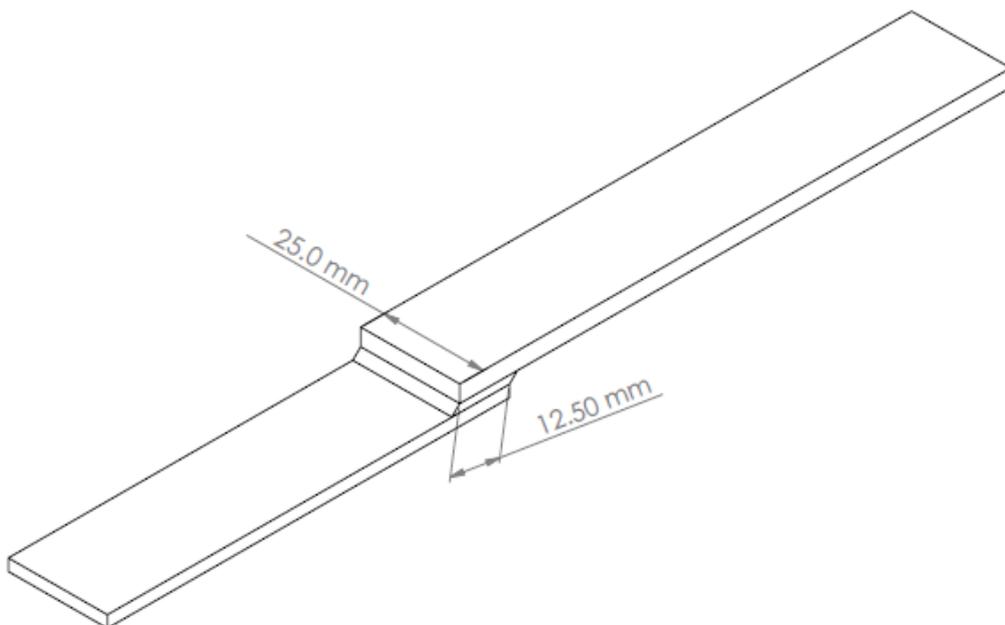


Figura 21: Dimensão da área colada das juntas

A Figura 22 mostra como ficou o sistema aplicado.

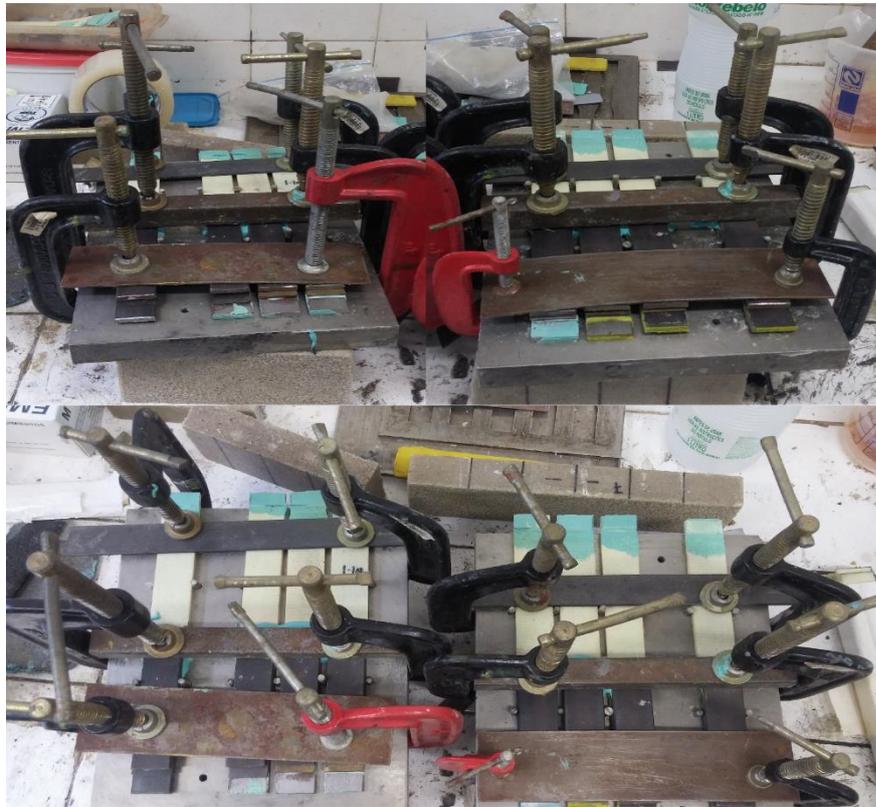


Figura 22: Modelo de fabricação das juntas

3.3 Ensaio mecânico

Para se ter conhecimento sobre o comportamento mecânico de um material em várias condições de uso como temperatura, tipo de cargas, desgastes, etc. é necessário realizar ensaios mecânicos. O ensaio mais importante e utilizado para essas situações é o teste de tração.

O ensaio de tração consiste em submeter um corpo de prova a um esforço crescente na sua direção axial, tendendo-o a alongar o material até levar a sua fratura.

Os ensaios das juntas e do compósito foram realizados em uma máquina de ensaios universal modelo Shimadzu AGX-100 (Figura 21) com uma velocidade de 2,0mm/min.



Figura 23: Máquina de ensaio de tração Shimadzu

Capítulo 4

Resultados e Discussão

Neste capítulo, serão expostos os resultados encontrados através dos ensaios de tração realizados, comparando os valores encontrados nos ensaios realizados apenas com o compósito, e nos ensaios das juntas híbridas formadas por uma chapa de aço e o mesmo modelo de compósito.

4.1 Compósito

Ao todo, quatro chapas de Syntho-Glass® XT (numeradas de 1 à 4) foram submetidas ao ensaio de tração à temperatura ambiente. A curva força x deslocamento de cada corpo de prova está ilustrada na Figura 22 abaixo.

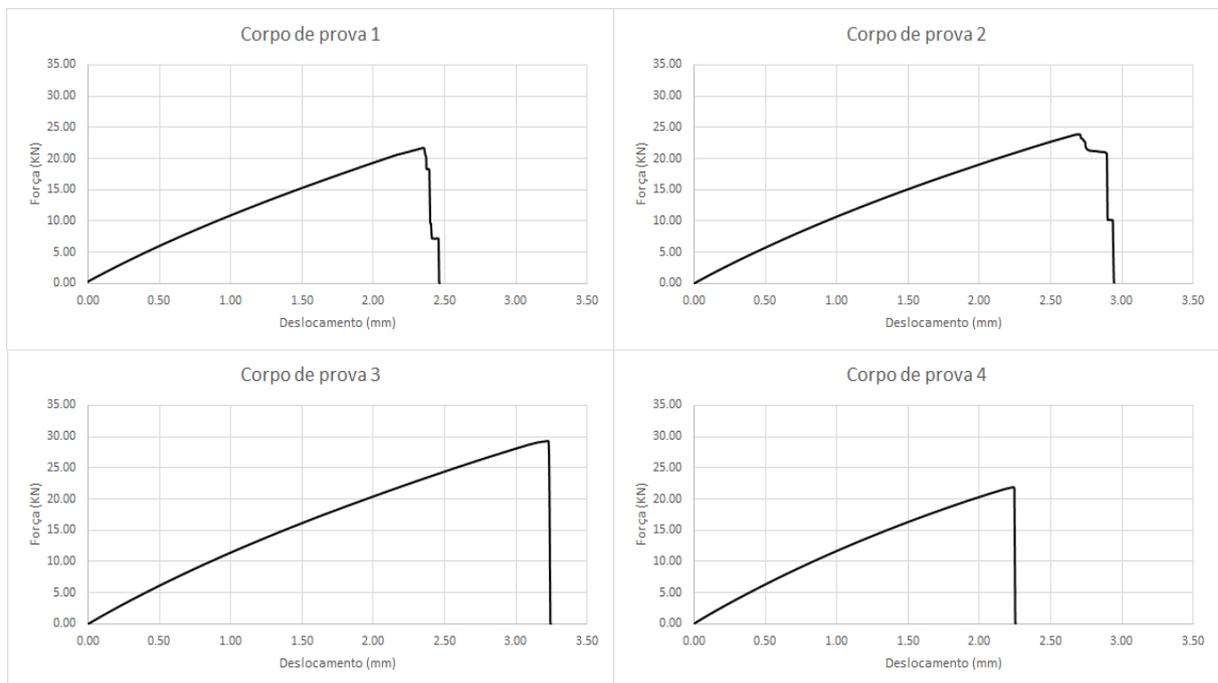


Figura 24: Curva força x deslocamento dos corpos de prova 1 – 4

Ao plotarmos as curvas obtidas em um mesmo gráfico (Figura 23), podemos notar que todas as curvas seguiram um padrão aceitável para análise.

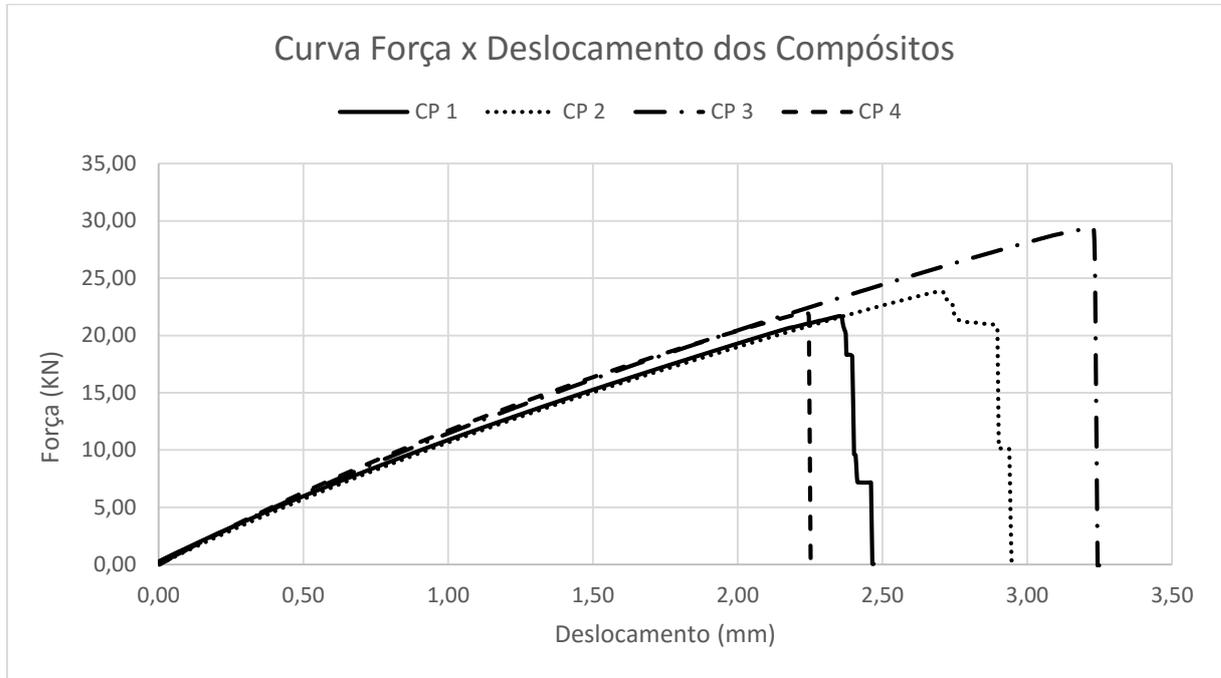


Figura 25: Comparação das curvas força x deslocamento dos CPs 1 – 4.

A Tabela 7 a seguir apresenta os resultados referentes à força e tensão na ruptura e o módulo de elasticidade para os 4 compósitos ensaiados separadamente.

Ao analisarmos os valores encontrados, podemos perceber que o compósito 3 foi o mais resistente, sendo necessária uma força de ruptura de 29,35 KN para o rompimento do material. A força de ruptura média encontrada para o Syntho-Glass® XT foi de 24,20 KN e apresentou um desvio padrão de 14,70%, abaixo dos 20% aceitos para uma análise mais detalhada. Por consequência, os maiores valores de tensão de ruptura e módulo de elasticidade são encontrados no mesmo compósito 3. A tensão média de ruptura foi de 223,9 N/mm² apresentando um desvio padrão de 15,42%, enquanto que o módulo de elasticidade foi de 14,0 GPa, bem próximo dos 15,9 GPa indicados pelo fabricante.

Tabela 7: Propriedades mecânicas encontradas nos ensaios dos compósitos

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4
Força de ruptura	21,69 KN	23,80 KN	29,35 KN	21,97 KN
Média	24,20 KN			
Desvio padrão	14,70%			
Tensão de ruptura	195,9 MPa	222,3 MPa	273,0 MPa	204,4 MPa
Média	223,9 MPa			
Desvio padrão	15,42%			
Módulo de elasticidade	13,9 GPa	13,1 GPa	14,0 GPa	14,9 GPa
Média	14,0 GPa			
Desvio padrão	5,27%			

4.2 Juntas

Ao todo, cinco juntas metal-compósito (numeradas de 1 à 5) foram submetidas ao ensaio de tração à temperatura ambiente. A curva força x deslocamento de cada junta está ilustrada na Figura 24 abaixo.

Nota-se que, a junta 4 apresenta uma força de ruptura consideravelmente abaixo das outras juntas, isso pode ter ocorrido devido à diversos fatores, mas principalmente a causa maior é a de má aplicação do adesivo, ou seja, uma falta de homogeneidade na região de colagem, o que caracteriza um erro de fabricação, que acaba por proporcionar uma baixa adesão na junta.

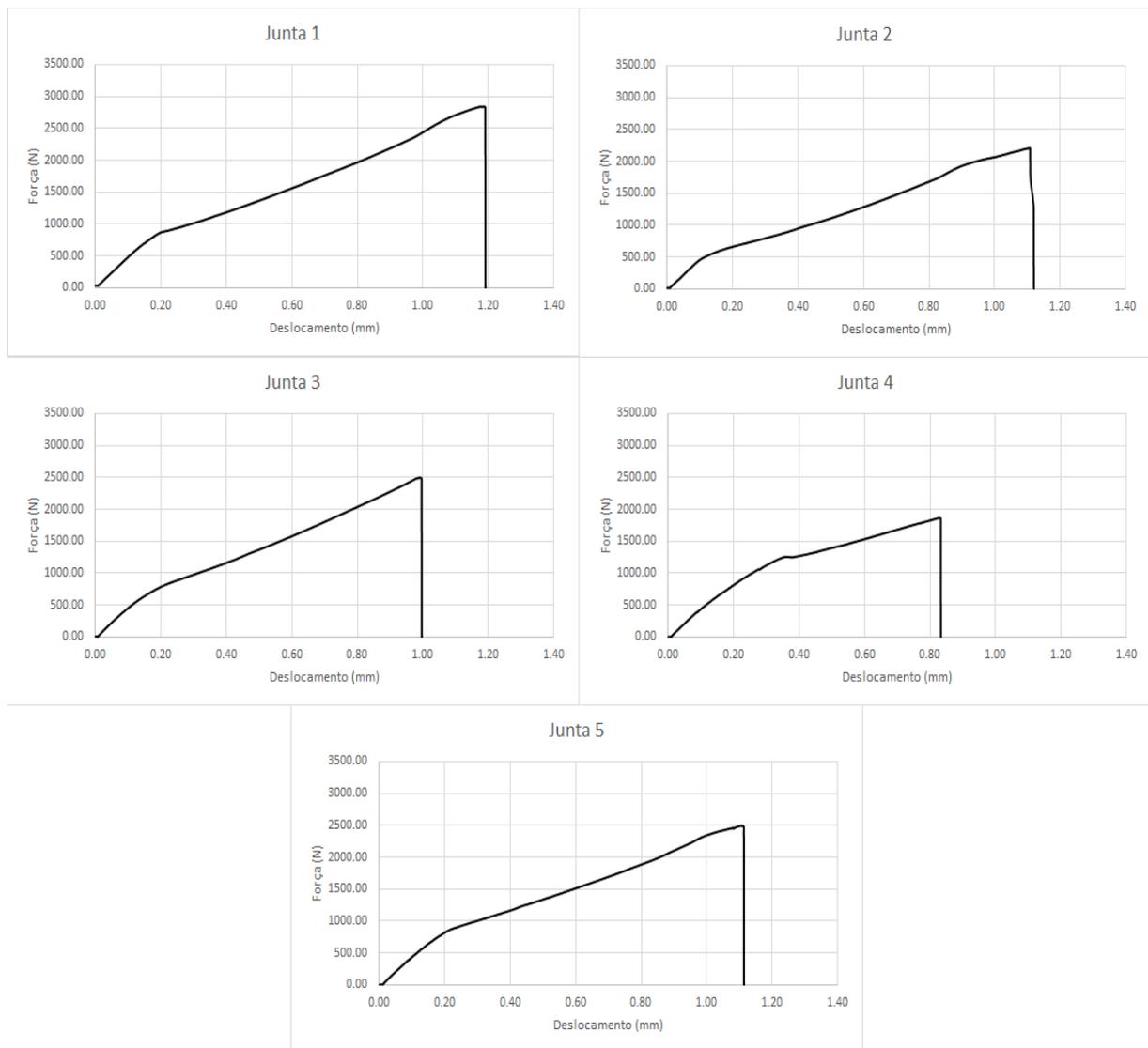


Figura 26: Curva força x deslocamento das juntas 1 – 5

Assim como ocorreu com os compósitos, as curvas força x deslocamento de cada junta apresentaram uma mesma disposição conforme ilustrado pela Figura 25. Vale ressaltar que devido ao problema citado referente à junta 4, a mesma foi descartada da análise.

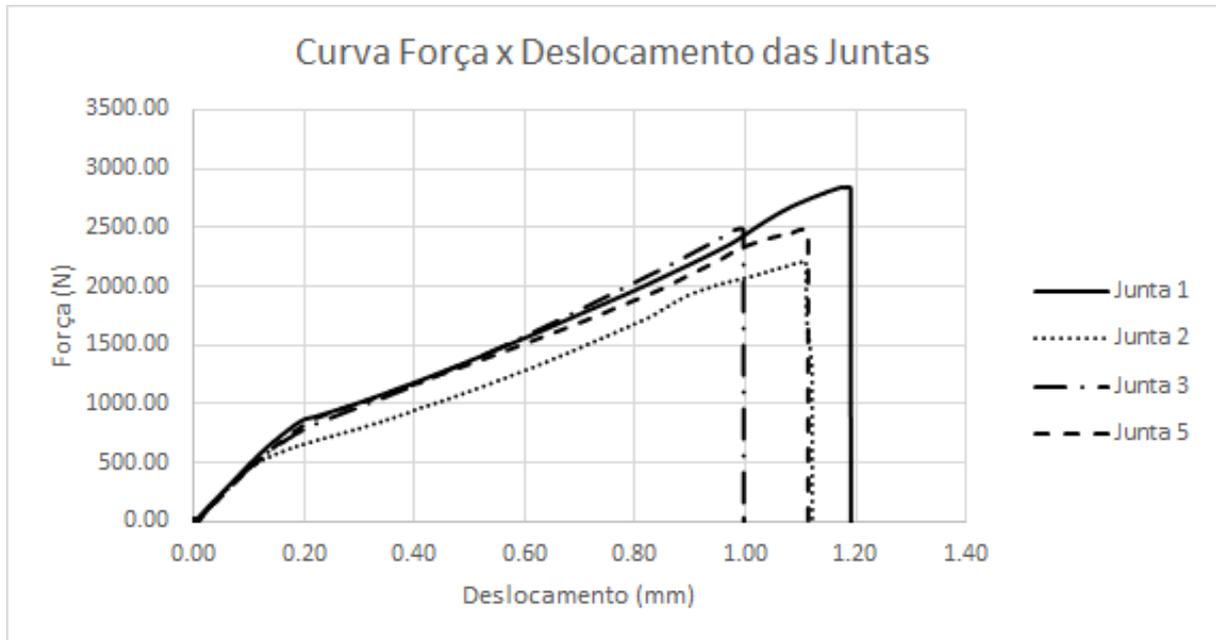


Figura 27: Comparação das curvas força x deslocamento das juntas 1 – 5

Ao analisarmos os resultados através da Tabela 8, nota-se que a força de ruptura média das juntas foi de 2,51 KN com um desvio padrão de 10,3%. Já a tensão de ruptura média apresentou um valor de 8,34 N/mm² ou 8,34 MPa, com um desvio padrão de 8,53%, valor bem aceitável para esse tipo de experimento.

Tabela 8: Propriedades mecânicas encontradas nos ensaios dos compósitos

	Junta 1	Junta 2	Junta 3	Junta 5
Força de ruptura	2,84 KN	2,21 KN	2,50 KN	2,49 KN
Média	2,51 KN			
Desvio padrão	10,31%			
Tensão de ruptura	9,10 MPa	7,38 MPa	8,42 MPa	8,44 MPa
Média	8,34 MPa			
Desvio padrão	8,53%			

Além disso, o valor da força de ruptura das juntas presente neste projeto, acompanha o que foi encontrado para juntas híbridas com adesivo e solda a ponto, juntas coladas com aço IF e juntas soldadas analisadas no artigo *Experimental investigation of the mechanical behaviour of spot welding–adhesives joints* [23]. Nesse estudo, as juntas de aço IF coladas com o mesmo adesivo utilizado neste projeto, apresentaram uma força de ruptura média no valor de 2500 N, mesmo valor encontrado nas juntas formadas por um outro aço e um compósito. A Figura 26 apresenta as curvas força-deslocamento das juntas desse respectivo estudo.

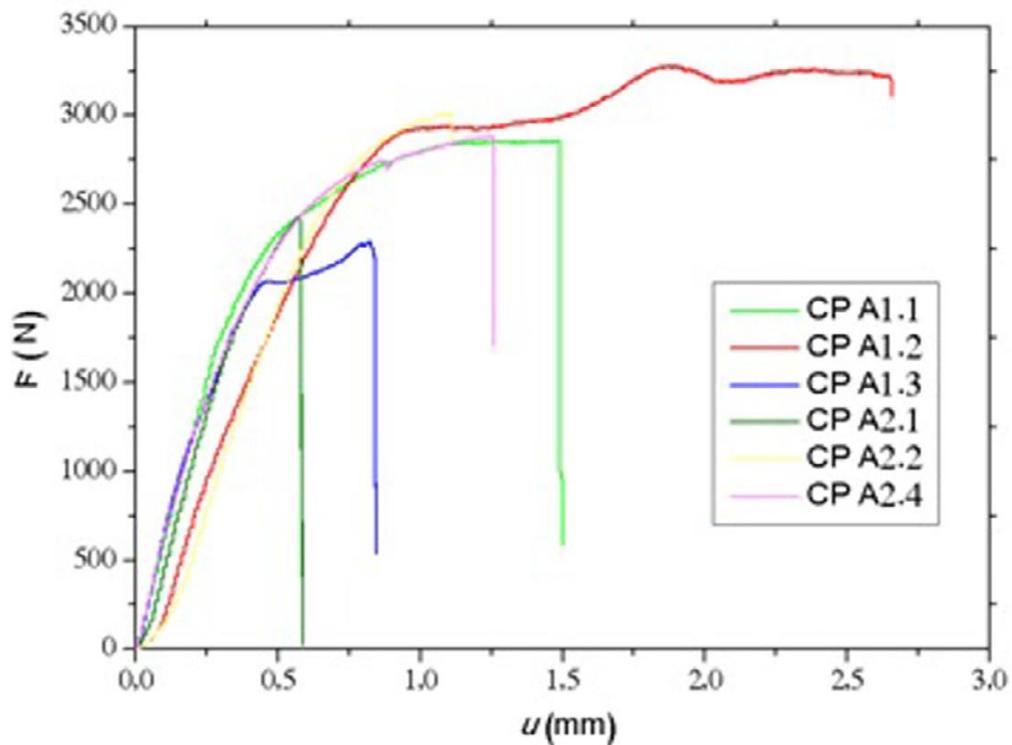


Figura 28: Curvas força x deslocamento das juntas de aço IF

Essa comparação demonstra uma excelente resistência mecânica que esse tipo de junta estudada neste trabalho apresenta uma boa adesão entre o adesivo e os substratos. Ressaltando que o adesivo apresenta uma adesão propriamente mecânica para o substrato metálico e uma adesão química para o compósito.

4.2.1 Fratura das juntas

O processo de fratura das juntas pode ocorrer de 3 formas:

- Fratura adesiva (acontece na interface entre o adesivo e substrato)
- Fratura coesiva (acontece no interior do adesivo)
- Fratura do substrato

Uma junta projetada corretamente, espera-se que o rompimento ocorra pelo substrato e não pelo adesivo. Porém, é algo bastante complicado de se observar nos testes e pesquisas realizados no mundo acadêmico. A Figura 29 ilustra os 3 tipos de fraturas.

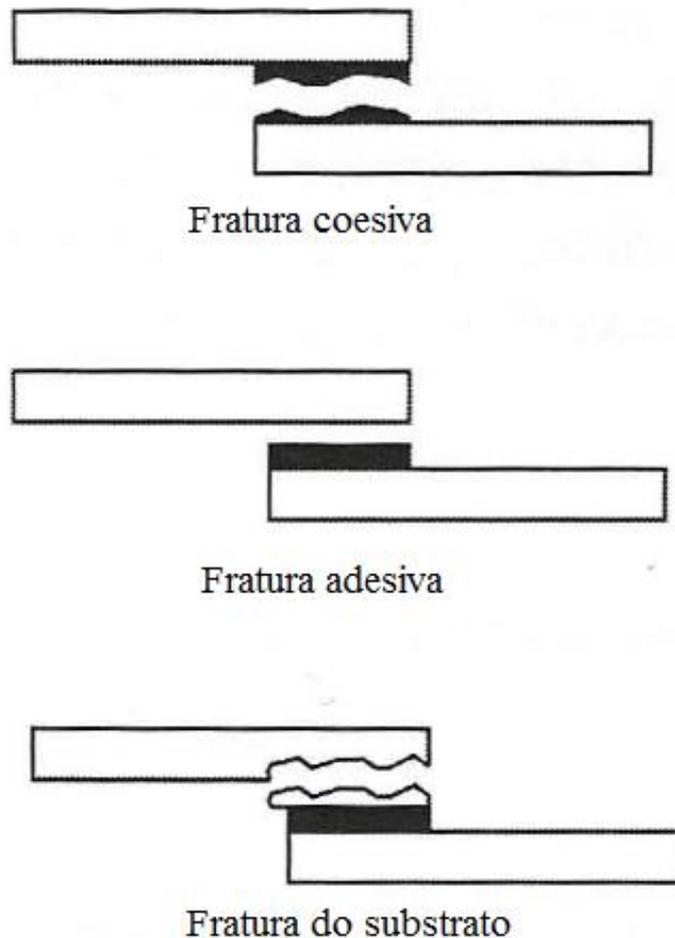


Figura 29: Representação esquemática dos modos de fratura em juntas coladas de sobreposição simples [22]

A fratura adesiva pode ser verificada ao notar-se que um substrato fica com a área colada sem nenhum resquício de adesivo, enquanto que o outro substrato fica com todo o adesivo correspondente da junta. Esse tipo de fratura foi o verificado nas juntas deste presente trabalho como pode ser notado na Figura 30.

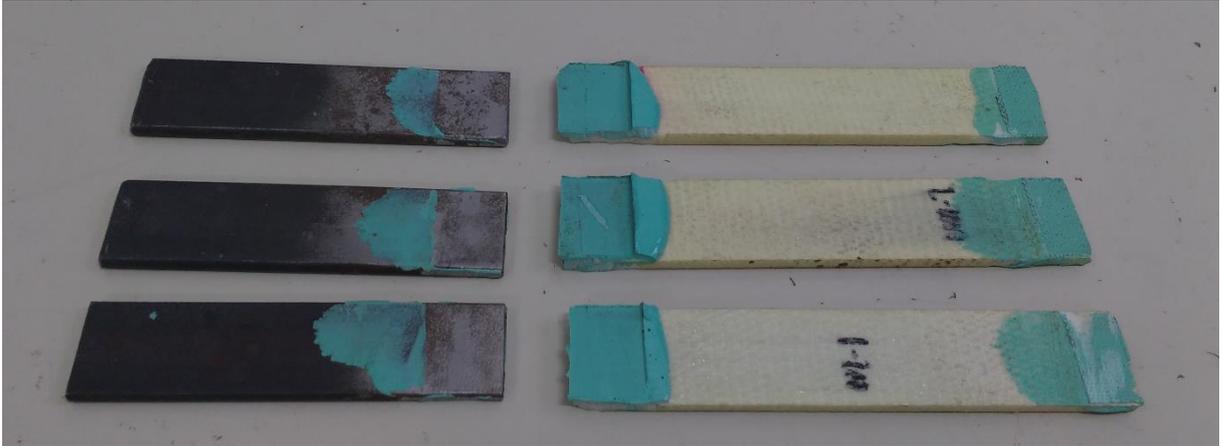


Figura 30: Perfil da fratura adesiva nas juntas

Como esperado, a fratura ocorreu na interface do componente metálico, onde tem-se uma adesão do tipo mecânica, enquanto que o compósito apresenta uma adesão química, garantindo assim uma melhor adesão quando em comparação.

Capítulo 5

Conclusão

Em função do estudo realizado, pode-se concluir que os ensaios experimentais do compósito possibilitaram caracterizar, mecanicamente, o material utilizado nas juntas coladas. Pode-se atestar o módulo de elasticidade do compósito indicado pelo fabricante, pois esta propriedade mecânica coincidiu com os valores encontrados nos ensaios do compósito.

A fim de comprovar a eficácia desse tipo de junta (metal-compósito), a mesma foi comparada com juntas formadas apenas por substratos metálicos e ambas obtiveram os mesmos resultados referentes a força de ruptura e deslocamento. Esse resultado demonstra a boa adesão e, conseqüentemente, boa resistência mecânica que esse tipo de junta possui.

Além disso, constatou-se também que os valores de resistência a ruptura apresentados pelos materiais compósitos foram bem superiores quando comparados com os valores das juntas. Esse resultado evidencia o que está presente na literatura, pois a existência de uma concentração de tensões na área colada e irregularidades nas superfícies que provocam pontos de iniciação para a propagação de trincas, causam uma falha precoce da junta.

5.1 Trabalhos futuros

Como proposta de trabalhos futuros, recomenda-se o estudo juntas híbridas considerando a influência da temperatura e da umidade. Com isso, uma melhora da reprodução das condições de campo é realizada, e resultados mais completos são obtidos para uma estimativa do tempo de vida útil de reparos com compósitos em tubulações e estruturas.

Referências Bibliográficas

- [1] CRAWFORD, R. J. *Plastics Engineering*, 3th ed. Oxford, Butterworth-Heinemann, 1998.
- [2] KUMAR, A.; GUPTA, R. K. *Fundamentals of Polymer Engineering*, 2th ed. New York, Marcel Dekker, Inc. 2003.
- [3] CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D.G. *Ciência e engenharia de matérias - uma introdução*, 8^a ed. Rio de Janeiro, LTC, 2012.
- [4] VAN DER VEGT, A.K. *From polymers to plastic*. Delft, DUP Blue Print, 2002.
- [5] HAGE JR., E. **Aspectos Históricos sobre o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia de Polímeros**. São Carlos, UFSCAR, 1998. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14281998000200003>. Acesso em: 24 nov. 2015.
- [6] **A History of Polymers**. Disponível em: <<http://www.polymerexpert.fr/en/presentation/histoire-des-polymeres/>>. Acesso em: 24 nov. 2015.]
- [7] BRINSON, H. F.; BRINSON, L.C. *Polymer engineering Science and viscoelasticity - an introduction*. New York, Springer, 2008.
- [8] NETO, F.L.; PARDINI, L.C. *Compósitos estruturais - ciência e tecnologia*. Edgard Bluncher, 2006.
- [9] ZANATTA, R. **Materias Compósitos na Aviação – Os materiais que prometem reduzir o peso e o consumo das aeronaves modernas**. 2012. Disponível em: <<http://www.aviacao.org/article/materiais-compositos/4/>>. Acesso em: 12 nov. 2015.
- [10] MALLICK, P. K. *Fiber-reinforced composites - materials, manufacturing and desing*, 3th ed. Florida, CRC Press, 2007.
- [11] **Chapter 3: Polymer Matrix Composites**. Disponível em: <<https://www.princeton.edu/~ota/disk2/1988/8801/880106.PDF>>. Acesso em: 25 nov. 2015.

- [12] JIANG, X.; KOLSTEIN, H.; BIJLAARD, F.; QIANG, X. “Effects of hygrothermal aging on glass-fibre reinforced polymer laminates and adhesive of FRP composite bridge: Moisture diffusion characteristics”. *Composites: Part A* 57, pp. 49–58, 2014.
- [13] Furlan, R. **Audi revela TT ultra quattro concept**, 2013. Disponível em: <<http://quatorrodas.abril.com.br/noticias/fabricantes/audi-revela-tt-ultra-quattro-concept-739649.shtml>>. Acesso em: 15 out. 2015.
- [14] VENTURINI NETO, S. *Estudo de junções aeronáuticas híbridas (metal-compósito) unidas mecanicamente*. Dissertação de M.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, São Paulo, RJ, Brasil, 2010.
- [15] AMARA, K. H.; TOUNSI, A.; BENZAI, A. “Transverse cracking and elastic properties reduction in hygrothermal aged cross-ply laminates”. *Materials Science and Engineering A* 396, pp. 369–375, 2005.
- [16] MORTENSEN, F.; THOMSEN, O.T. “Analysis of adhesive bonded joints: a unified approach”. *Composites Science and Technology* 62, pp. 1011–1031, 2002.
- [17] SHIUH-CHUAN. “Stress analysis of adhesively-bonded lap joints”. *Composite Structures* 47, pp. 673-678, 1999.
- [18] DA FONSECA, A. H. M.; DA SILVA, T. *Proposta de um critério de resistência para juntas metálicas coladas*. Dissertação de M.Sc., UFF, Niterói, RJ, Brasil, 2007.
- [19] MARQUES, E.A.S.; DA SILVA, L.F.M.; FLAVIANI, M. “Testing and simulation of mixed adhesive joints for aerospace applications”. *Composites Part B* 74, pp. 123-130, 2015.
- [20] KORTA, J.; MLYNIEC, A.; UHL, T. “Experimental and numerical study on the effect of humidity-temperature cycling on structural multi-material adhesive joints”. *Composites Part B* 79, pp. 621-630, 2015.
- [21] EBNEAJJAD, S. *Adhesives technology handbook*, 2^a ed. Nova York, Willian Andrew, 2008.
- [22] DA SILVA, L. F. M.; DE MAGALHÃES, A. G.; DE MOURA, M. F. S. F. *Juntas adesivas estruturais*. Porto, Publindústria, 2007.

[23] COSTA, H. R. M.; REIS, J. M. L.; SOUZA, J. P. B.; PACHECO, P. M. C. L.; AGUIAR, R. A. A.; DE BARROS, S. “Experimental investigation of the mechanical behavior of spot welding-adhesives joints”. *Composites Structures* 133, pp. 847-852, 2015.