

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

**Análise de comportamento mecânico de juntas
coladas multimateriais**

Guilherme Cunha Calazans Fiuza

**Rio de Janeiro
Novembro de 2016**

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

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - DEMEC

Análise de comportamento mecânico de juntas coladas multimateriais

Guilherme Cunha Calazans Fiuza

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

Professora Orientadora: Doina Mariana Banea

**Rio de Janeiro
Novembro de 2016**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

F565 Fiuza, Guilherme Cunha Calazans
Análise de comportamento mecânico de juntas coladas
multimateriais / Guilherme Cunha Calazans Fiuza.—2016.
xiii, 69f. + anexo : il. (algumas color.) , graf. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2016.
Bibliografia : f. 67-69
Orientadora : Doina Mariana Banea

1. Engenharia mecânica. 2. Juntas (Engenharia). 3. Resistência
de materiais. 4. Adesivos. 5. Deformações e tensões. I. Banea,
Doina, Mariana (Orient.). II. Título.

CDD 621

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram para a realização deste projeto: em especial a meus pais, Ary Calazans Fiuza Da Silva e Cristina Cunha Calazans Fiuza Silva, e família, a minha professora orientadora Doina Mariana Banea, aos amigos Daniel Kawasaki, Rosemere Lima e Alexandre Soares, à equipe de Aerodesign Venturi e finalmente ao CEFET/RJ pelos ensinamentos transferidos.

RESUMO

A utilização de juntas coladas nas indústrias, principalmente nas aeronáutica e automobilística, aumentou de forma considerável nos últimos anos. A razão para tal deve-se principalmente pela diminuição do peso, consumo de combustível e redução de poluentes. Os principais benefícios da utilização de juntas coladas são a flexibilidade do design, junção de materiais não similares, entre outros. Ultimamente, o uso de materiais pesados como HSS, ligas de alumínio em combinação com compósitos com a finalidade de alcançar uma redução no peso de veículos aumentou. Além disso, combinações de juntas com diferentes materiais pode ser a chave para a fabricação de veículos mais leves. Componentes de fibra de carbono são frequentemente selecionados em combinação com metais, por exemplo, HSS e alumínio, para reduzir peso sem comprometer a segurança do veículo. Para evitar concentração de tensões térmicas, utilizam-se adesivos de cura à temperatura ambiente em juntas coladas multimateriais. Contudo, juntas de diferentes geometrias e materiais causará distribuição não uniforme de tensões na camada adesiva, e a junta irá depender de tais parâmetros. Neste trabalho, juntas coladas multimateriais foram analisadas numericamente e analiticamente. O comprimento de sobreposição e a geometria foram mantidas constantes para todas as amostras. A distribuição de tensões e de deformações ao longo do comprimento de sobreposição foram analisadas em comparação com a rigidez de cada substrato da junta. A análise numérica mostra que a rigidez dos substratos influencia diretamente a distribuição de tensões e a resistência mecânica da junta. Valores numéricos de carga máxima são muito próximos das cargas obtidas analiticamente, validando a metodologia numérica de predição de resistência mecânica da junta e os resultados obtidos pela mesma.

Palavras-chave: Juntas, juntas coladas, adesivos, adesão, coesão

ABSTRACT

The use of bonded joints in industries, particularly in the aeronautics and automobile industries, has increased considerably in recent years. The reason for this is mainly for weight reduction, fuel consumption and pollutant reduction. The main benefits of using bonded joints are design flexibility, joining dissimilar materials among others. Lately, the use of heavy materials such as high strength steel, aluminum in combination with composites in order to achieve a reduction in vehicle weight has also increased. Furthermore, combinations of different materials may be the key to making lighter cars. Carbon fiber components are often selected in combination with metallic alloys, for example high strength steel and aluminum, to reduce weight without compromising vehicle safety. In order to prevent concentration of thermal stress, room temperature cure adhesives are used for the manufacturing of multi-material joints. However, different joint geometries and materials will cause non-uniform stress distribution in the adhesive layer, and adhesive performance will depend upon such parameters. In this work, multi-material joints were analyzed numerically and analytically. The length of overlap and geometry remained constant for all samples. The distribution of stresses and deformations along the lap length was analyzed in comparison with the stiffness of each substrate. Maximum numerical load values are very close to the loads obtained analytically, thus validating the numerical methodology of prediction mechanical strength of the joint and the results obtained.

Keywords: Joints, bonded joints, adhesives, adhesion, cohesion

SUMÁRIO

Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 Motivação	1
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivo.....	2
1.5 Organização do Trabalho.....	2
Capítulo 2	4
Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 Introdução	4
2.2 Fenômenos de ligação.....	5
2.3 Vantagens e desvantagens das juntas coladas.....	6
2.3.1 Vantagens	6
2.3.2 Desvantagens:.....	7
2.4 Tipos de adesivos	7
2.4.1 Adesivos termoendurecíveis	8
2.4.2 Adesivos termoplásticos.....	9
2.4.3 Adesivos elastoméricos	9
2.4.4 Adesivos híbridos	10
2.5 Modos de carregamento.....	10
2.5.1 Tração e compressão	11
2.5.2 Cisalhamento.....	12
2.5.3 Clivagem e arrancamento.....	13
2.6 Tensões térmicas residuais.....	15
2.7 Tipos de juntas	17
2.8 Modos de falha.....	18
2.8.1 Falha Adesiva.....	18
2.8.2 Falha Coesiva	19
2.8.3 Falha Mista.....	19

2.9 Defeitos em juntas.....	20
2.9.1 Existência de uma camada fraca	20
2.9.2 Distribuição de tensão em juntas não perfeitamente uniforme	20
2.9.3 Existência de irregularidades na superfície	21
2.10 Preparação da superfície	22
2.10.1 Preparação de aços	23
2.10.2 Preparação de alumínio	23
2.10.3 Preparação de compósitos	25
2.11 Ensaaios	25
2.11.1 Ensaio de cisalhamento em uma junta de sobreposição simples	26
2.12 Predição de tensões em juntas coladas.....	27
2.12.1 Mecânica do Contínuo	28
2.12.2 Mecânica da Fratura	31
2.12.3 Modelos de Zona Coesiva	32
Capítulo 3	37
Materiais e Métodos.....	37
3.1 Materiais	37
3.1.1 Substratos	37
3.1.2 Adesivo.....	42
3.2 Geometria da Junta	43
3.2.1 CFRP / HSS (HSS).....	44
3.2.1 CFRP / CFRP	44
3.2.3 CFRP / Alumínio.....	45
Capítulo 4	46
Análise Analítica	46
Capítulo 5	48
Análise Numérica	48
5.1 Modelo Numérico	48

5.1.1 Geometria e propriedades de material.....	48
5.1.2 Condições de Contorno	49
5.1.3 Malha.....	49
5.2 Modelo de Zona Coesiva	50
5.3 Análise de Tensões	51
5.3.1 Tensões de Cisalhamento	51
5.3.2 Tensões de Arrancamento	55
5.4 Análises da Resistência da Junta.....	59
5.5 Conclusões da Análise Numérica	63
Capítulo 6	65
Conclusão.....	65
Trabalhos Futuros	66
Referências Bibliográficas.....	67
ANEXOS	70

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Nomenclatura de uma junta adesiva [3,4]	4
FIGURA 2: Demonstração dos fenômenos atuantes em uma junta [4].	6
FIGURA 3: Comparação dos esforços suportados pelas juntas rebitada e colada [2].	6
FIGURA 4: Tensões mais importantes em uma junta adesiva: tração, cisalhamento, clivagem e arrancamento [2].	11
FIGURA 5: Comparação de carregamentos em uma junta com carregamento axial e não axial [2].	12
FIGURA 6: Distribuição da tensão ao longo do comprimento de sobreposição [2].	12
FIGURA 7: Diferença ilustrativa de adesivo solicitado em arrancamento tenaz ou frágil [2].	13
FIGURA 8: Representação da deformação dos substratos [2].	14
FIGURA 9: Aparecimento de tensões de arrancamento em juntas de sobreposição simples [2].	14
FIGURA 10: Juntas coladas dissimilares: a) Juntas rigidamente balanceadas, b) juntas geometricamente balanceadas. [6]	15
FIGURA 11: Tensões térmicas residuais causadas pelo processo de cura a alta temperatura. a) Junta livre de tensão. b) Junta com tensões térmicas. c) Carga de tensão assimétrica no adesivo.	17
FIGURA 12: Principais tipos de juntas [2].	18
FIGURA 13: Modos de falha em uma junta: a) Adesiva; b) Coesiva; c) Mista [5].	18
FIGURA 14: Principais impurezas em substratos poliméricos e metálicos [2].	20
FIGURA 15: Distribuição dos esforços numa junta de sobreposição simples [2].	21
FIGURA 16: Resistência de uma junta de sobreposição simples em função do comprimento de sobreposição [2].	21
FIGURA 17: Pontos de iniciação de fissuras em superfícies muito irregulares [2].	21
FIGURA 18: Aspecto da alumina simplesmente oxidada [2].	23
FIGURA 19: Aspecto da alumina colmatada [2].	24

FIGURA 20: Foto de um corpo de prova sendo ensaiado no Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES), CEFET-RJ.....	27
FIGURA 21: a) Deformação do adesivo em substratos sem filetes. b) substrato sem filete, c) substrato com filete de raio 0,25 mm, d) substrato com filete de raio 1,6 mm, e) substrato com filete de raio 1,6 mm [16]......	29
FIGURA 22: Gráfico de tensão principal x deformação [16].	30
FIGURA 23: Ilustração dos 3 modos de fratura [23].	31
FIGURA 24: Ilustração do modelo de zona coesiva e suas três regiões: Região intacta, região de zona do processo; e trinca de livre tração [5].	33
FIGURA 25: Modelo bilinear de distribuição de tensões [5]......	34
FIGURA 26: Ilustração das leis coesivas: a) Lei coesiva triangular; b) Lei coesiva exponencial; c) Lei coesiva trapezoidal [22]......	36
FIGURA 27: Preparação da superfície para laminação.....	39
FIGURA 28: Ilustração do corte da manta de fibra de carbono.	39
FIGURA 29: Ilustração da medição de adesivo bi-componente epóxi.	40
FIGURA 30: Colagem das camadas de manta de fibra de carbono.	40
FIGURA 31: Ilustração da máquina de corte manual.	41
FIGURA 32: Amostras de CFRP fabricadas.	41
FIGURA 33: Gráfico Tensão de Tração vs Deformação para as 3 amostras de Adesivo BETAMATE 2096	43
FIGURA 34: Ilustração da geometria da junta de sobreposição simples de CFRP/HSS.	44
FIGURA 35: Ilustração da geometria da junta de sobreposição simples de CFRP/CFRP.....	44
FIGURA 36: Ilustração da geometria da junta de sobreposição simples de CFRP/Alumínio.	45
FIGURA 37: Ilustração da geometria da junta de sobreposição simples utilizada na análise numérica.	48
FIGURA 38: Ilustração das condições de contorno utilizadas na análise numérica para todas as juntas analisadas.....	49
FIGURA 39: Ilustração da malha utilizada para todas as juntas analisadas.	49

FIGURA 40: Gráfico de análise de convergência: Tensão de Cisalhamento Máxima vs Tamanho de Malha.....	50
FIGURA 41: Modelo de zona coesiva bilinear.	51
FIGURA 42: Gráfico tensão de cisalhamento x deformação para juntas CFRP-AL, CFRP-CFRP e AL-AL.	52
FIGURA 43: Distribuição de tensões de cisalhamento ao longo da extremidade do comprimento de sobreposição: a) extremidade do substrato de CFRP; b) extremidade do substrato de Al.....	53
FIGURA 44: Gráfico tensão de cisalhamento x deformação para juntas CFRP-CFRP, CFRP-HSS e HSS-HSS.....	54
FIGURA 45: Distribuição de tensões de cisalhamento ao longo da extremidade do comprimento de sobreposição: a) extremidade do substrato de CFRP; b) extremidade do substrato de HSS.	55
FIGURA 46: Gráfico tensão de arrancamento x deformação para juntas CFRP-CFRP, CFRP-AL e AL-AL.....	56
FIGURA 47: Distribuição de tensões de arrancamento ao longo da extremidade do comprimento de sobreposição: a) extremidade do substrato de CFRP; b) extremidade do substrato de Alumínio.	57
FIGURA 48: Gráfico tensão de arrancamento x deformação para juntas CFRP-CFRP, CFRP-HSS e HSS-HSS.....	58
FIGURA 49: Distribuição de tensões de arrancamento ao longo da extremidade do comprimento de sobreposição: a) extremidade do substrato de CFRP; b) extremidade do substrato de HSS.	59
FIGURA 50: Resultado da análise numérica para a junta CFRP-AL: a) visualização da degradação da camada adesiva; b) distribuição da tensão de cisalhamento ao longo do comprimento de sobreposição; c) ilustração da deformação plástica do substrato de alumínio;.....	60
FIGURA 51: Gráfico de Força x deformação para a junta de CFRP-AL.	61
FIGURA 52: Resultado da análise numérica para junta de CFRP-HSS: a) degradação da camada adesiva ; b) distribuição de tensões de cisalhamento;.....	62
FIGURA 53: Gráfico de Força x deformação para a junta de CFRP-HSS.	63
FIGURA 54: Gráfico Comparativo da Resistência Mecânica entre as Juntas Coladas	64

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Coeficientes de expansão térmica linear [7].	16
TABELA 2: Vantagens e desvantagens do ensaio de cisalhamento em junta de sobreposição simples [11].	26
TABELA 3: Propriedades do substrato de HSS [24].	38
TABELA 4: Propriedades do substrato de Alumínio [24].	38
TABELA 5: Propriedades ortotrópicas do substrato de Fibra de Carbono [11].	42
TABELA 6: Propriedades do adesivo BETAMATE 2096.	43
TABELA 7: Comparação de valores obtidos por análise analítica e numérica.	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer
- HSS – High Strength Steel
- MEK – Methyl Ethyl Ketone (Butanona)
- ΔT – Diferencial de Temperatura
- T_O – Temperatura de Cura
- T_{SF} – Temperatura Livre de Tensões
- K – Fator de Intensidade de Tensão
- Y – Função de Geometria do Material
- σ_r – Tensão de Carregamento
- a – Comprimento de Trinca
- K_I – Fator de Intensidade de Tensão do Modo I
- K_{Ic} – Tenacidade a fratura de Modo I
- CZM – Cohesive Zone Model
- τ_a – Tensão de Ruptura do Adesivo
- P – Força de Ruptura do Adesivo
- L – Comprimento de Sobreposição da Amostra
- b – Largura da Amostra
- e – Espessura da Amostra
- $\tau_{substrato}$ – Tensão Atuante no Substrato
- σ_y – Tensão de Cisalhamento
- τ_{xy} – Tensão de Arrancamento

Capítulo 1

Introdução

Há uma tendência crescente em otimizar resistência, peso e durabilidade de estruturas automotivas pela combinação de ligas metálicas tradicionais com compósitos de matriz polimérica. Os compósitos são estruturalmente mais eficientes do que metais e não são suscetíveis a corrosão galvânica, por exemplo. Metais, no entanto, têm uma melhor tolerância a danos e previsibilidade de falhas em comparação aos compósitos, além de não serem afetados por solventes e temperaturas muito elevadas que, no geral, tendem a degradar polímeros.

Estruturas coladas multimateriais são utilizadas na indústria aeronáutica e automobilística de modo a diminuir peso, consumo de combustível, custo e ainda proporcionar uma melhoria de desempenho. Com a utilização destes materiais, a técnica de soldagem se torna inviável devido as suas características mecânicas. Logo, o uso de ligações coladas em tais situações é de extrema importância.

A fim de otimizar os benefícios proporcionados por ambos os tipos de materiais, juntas coladas multimateriais entre metais e materiais compósitos são cada vez mais estudadas. Embora, estas estruturas proporcionem uma excelente combinação das propriedades mecânicas dos materiais, o seu sucesso depende da integridade das juntas. Ao analisar uma junta colada multimaterial, há uma série de considerações que devem ser detalhadas, que serão abordadas ao longo deste trabalho.

Neste projeto serão estudadas juntas coladas multimateriais utilizando juntas de sobreposição simples. Essas são, entre as juntas coladas, uma das mais simples utilizadas em pesquisa. Sua escolha se deve a sua facilidade de fabricação e estudo.

1.1 Motivação

Um dos principais motivos para o estudo de juntas coladas é a necessidade de aperfeiçoamento das tecnologias para facilitar a união de diferentes tipos de materiais, sem comprometer o rendimento dos comportamentos mecânicos de juntas coladas como alternativa às uniões metálicas por solda, rebite ou parafuso, por exemplo.

1.2 Justificativa

A utilização de juntas coladas está cada vez mais difundida nas indústrias, principalmente as aeronáutica e automobilística. Cada vez mais, novos tipos de juntas coladas são utilizadas, dentre essas, as juntas coladas multimateriais se encontram em uma posição de grande importância. A ligação de diferentes tipos de materiais, tarefa difícil em uma junta mecânica tradicional, será descrita neste trabalho. Juntas coladas multimateriais possuem diversas vantagens em comparação a métodos tradicionais como: distribuição uniforme de tensões, amortecimento de vibrações, união de chapas e de outras estruturas com contornos regulares sem necessidade de usinagem, redução do peso estrutural e maior facilidade para união de materiais heterogêneos.

1.3 Objetivo

Este projeto tem como objetivo a análise do comportamento de juntas coladas multimateriais. O efeito de diferentes substratos para o mesmo comprimento de sobreposição e espessura foi avaliado.

1.4 Metodologia

Inicialmente, foi realizada a revisão bibliográfica de forma a embasar o conteúdo teórico, ou seja, principais características e propriedades de uma junta colada e seu comportamento ao utilizar substratos de diferentes materiais. Posteriormente, foi feita parte da preparação dos substratos para a realização da análise experimental.

Com a impossibilidade da análise experimental devido à falta de adesivo, foi dada continuidade ao trabalho com a realização de análise numérica com a finalidade de simular o comportamento mecânico apresentado na análise experimental.

1.5 Organização do Trabalho

O trabalho foi dividido em 6 capítulos, entre eles:

No capítulo 1 foi apresentada uma introdução dos objetivos desse trabalho, foram informadas as variações nos ensaios e quais parâmetros seriam analisados nesse estudo.

No capítulo 2 foi realizada uma pesquisa sobre juntas coladas multimateriais, suas principais propriedades incluindo suas implicações e seus ensaios, com base em diversos livros, outros trabalhos acadêmicos e normas internacionais.

No capítulo 3 foram abordados os componentes da junta colada, como os tipos de substratos utilizados, geometria das amostras, preparação dos substratos visando a preparação dos materiais para análise experimental.

No capítulo 4 foi apresentado o estudo analítico das juntas coladas, fórmulas e resultados obtidos.

No capítulo 5 foram discutidos a análise numérica das amostras de juntas, métodos utilizados para a análise, o software utilizado e a avaliação dos resultados encontrados.

No capítulo 6 encontra-se a conclusão do trabalho além de sugestões para trabalhos futuros e as referências bibliográficas.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

Ao analisarmos uma junta, é de fundamental importância o estudo de seus componentes. Desenvolvidas principalmente pela indústria aeronáutica, devido ao baixo custo e diminuição do tempo de aplicação, e conseqüentemente, de produção, juntas coladas tem atualmente diversas áreas de aplicação, como nas indústrias: automobilística, de construção civil, naval, fabricação de materiais esportivos entre outras.

De modo específico, juntas coladas multimateriais combinam diferentes tipos de materiais e por conseqüência uma combinação de propriedades em uma nova junta adesiva. Tal combinação tem como conseqüência menor peso e custo, além de juntas com propriedades superiores, fatores importantes nas indústrias, principalmente a automobilística e aeronáutica [1].

A fim de estudar juntas coladas multimateriais, é necessário caracterizar tais juntas. Portanto, a norma ASTM D907-89, que caracteriza a nomenclatura de juntas coladas, foi utilizada e seus elementos podem ser melhor evidenciados na Figura 1:

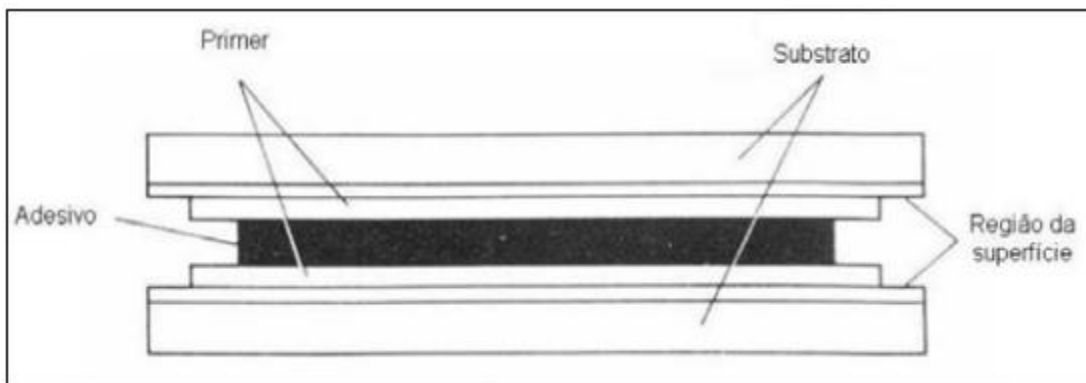


Figura 1: Nomenclatura de uma junta adesiva [3,4]

ADESIVO – material polimérico capaz de manter unidos elementos pelo contato das superfícies. Um adesivo pode ser definido como um material polimérico que, quando aplicado em superfícies pode ligá-las e resistir à sua separação. Da mesma maneira, um adesivo estrutural é um adesivo, caracterizado pela definição anterior, que resiste a forças substanciais e que é responsável pela resistência e rigidez da estrutura (resistência de pelo menos 7 MPa ao cisalhamento).

SUBSTRATO – O substrato ou aderente é o material a ser ligado. Este pode ser composto de diversos tipos de materiais. Juntas coladas multimateriais podem não ser iguais, possibilitando a junção de diversos tipos de materiais, mesmo aqueles quimicamente ativos.

PRIMER – substância que por vezes se utiliza por aplicação direta na superfície dos substratos com o objetivo de melhorar a adesão ou proteger as respectivas superfícies até aplicação do adesivo.

JUNTA ADESIVA – conjunto dos elementos citados unidos pelo adesivo [2].

2.2 Fenômenos de ligação

A fim de estudar juntas coladas, é necessário o conhecimento básico dos dois mais importantes fenômenos atuantes responsáveis pela junção dos elementos presentes na junta.

O primeiro fenômeno a ser descrito, a adesão, é a afinidade de um adesivo a um ou mais substratos. A força de adesão está baseada nas forças de atração entre as moléculas do adesivo e das superfícies a serem coladas. Esta força é caracterizada por atuar entre o adesivo e o substrato.

O segundo fenômeno a ser descrito, a coesão, é a própria resistência interna a esforços do adesivo. Quanto mais forte forem as forças intermoleculares do adesivo, maior a coesão e conseqüentemente maior a resistência ao descolamento [2].

Tais fenômenos são melhor evidenciados na Figura 2:

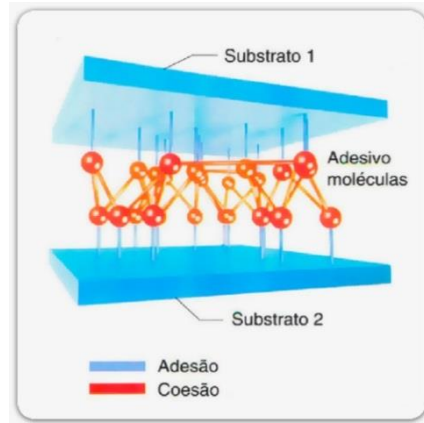


Figura 2: Demonstração dos fenômenos atuantes em uma junta [4].

2.3 Vantagens e desvantagens das juntas coladas

Juntas coladas possuem diversas vantagens em comparação a métodos tradicionais de união, porém também apresentam algumas desvantagens. Ambas serão explicitadas nas subseções a seguir.

2.3.1 Vantagens

Como principais vantagens, destacam-se:

- A distribuição mais uniforme das tensões ao longo da área ligada, ao contrário de ligações mecânicas, melhor explicitado na Figura 3. Tal distribuição permite maior rigidez e transmissão de carga, possibilitando redução de peso, ou seja, um menor custo.

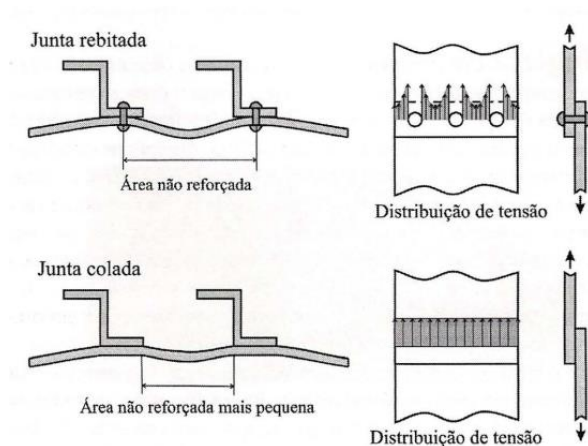


Figura 3: Comparação dos esforços suportados pelas juntas rebitada e colada [2].

- O amortecimento de vibrações, o que permite que as tensões sejam parcialmente absorvidas, aumentando a resistência à fadiga dos próprios componentes ligados.
- Ligação de materiais de diferentes composições e com distintos coeficientes de expansão [3].

2.3.2 Desvantagens:

Dentre as desvantagens destacam-se:

- Em juntas coladas é necessário um projeto da ligação que elimine ao máximo as forças de arrancamento, clivagem e impacto.
- Apresentam limitada resistência a condições extremas, tais como a temperatura e a umidade, devido à natureza polimérica do adesivo.
- A ligação normalmente não é realizada instantaneamente, o que leva à utilização de ferramentas de fixação para manter as peças.
- Os adesivos são frequentemente curados a elevadas temperaturas (forno, prensa, e autoclave entre outros). Para obter bons resultados é necessária uma preparação das peças que será melhor descrita nos tópicos posteriores.
- O controle de qualidade e segurança é mais difícil, embora tenham sido desenvolvidas recentemente técnicas não destrutivas adequadas [3].

2.4 Tipos de adesivos

É necessário para a análise de juntas coladas, o estudo de adesivos, com o objetivo de selecionar o melhor adesivo indicado para ser utilizado. Os adesivos podem ser classificados de acordo com sua função, composição química, modo de aplicação, forma física, custo e aplicação. A mais ampla classificação é a distinção entre um adesivo fabricado a partir de produtos que são sintéticos ou naturais. Os adesivos sintéticos são fabricados a partir de materiais feitos industrialmente e os adesivos naturais são fabricados a partir de materiais naturais, como subprodutos animais ou de agricultura.

A classificação funcional define os adesivos como sendo estruturais ou não estruturais. Os adesivos estruturais são materiais de elevada resistência e desempenho. Geralmente, os adesivos estruturais são definidos como aqueles que possuem uma resistência ao cisalhamento superior a faixa de 5 a 10 MPa e uma resistência considerável em meios ambientes mais comuns. A sua função principal é a de manter ligadas as estruturas e de serem capazes de resistir a cargas elevadas sem grande deformação.

Os adesivos podem apresentar-se sob diversas formas físicas. As mais comuns são: várias partes sem solvente (líquido ou pasta), uma parte sem solvente (líquido ou pasta), uma parte em solução (líquido), sólido (pó, fita, filme, etc.).

Há também a classificação sobre ao modo como os adesivos reagem ou solidificam (curam). Os adesivos podem solidificar segundo vários métodos: por reação química (incluindo reação com um endurecedor ou reação com energia exterior tal como calor, radiação, catalisador de superfície, etc.), por perda de solvente, por perda de água, por arrefecimento a partir do estado fundido. O modo como um adesivo cura pode ser um fator muito importante no processo de seleção. O método de cura pode limitar significativamente as características do adesivo para uma aplicação particular.

A classificação dos adesivos segundo a sua composição química descreve adesivos como sendo termoplásticos, termoendurecíveis, elastómeros ou híbridos. Geralmente a composição química está subdividida em tipos ou famílias dentro de cada grupo, tais como os epóxidos, os uretanos, o neopreno e os cianoacrilatos [2].

2.4.1 Adesivos termoendurecíveis

Os adesivos termoendurecíveis são materiais que não podem ser aquecidos e amolecidos repetidamente após a sua cura inicial. Uma vez curado e reticulado, o adesivo pode ser amolecido até certo ponto com calor, mas não pode ser reaquecidos ou restaurado até atingir o estado que existia antes da cura. Os materiais termoendurecíveis não são fundíveis e insolúveis. Esses adesivos degradam-se e elevando a temperatura suficiente, tornam-se frágeis devido à oxidação ou quebras nas cadeias moleculares. Os sistemas adesivos curam por uma reação química irreversível a temperatura ambiente ou a temperaturas elevadas, dependendo do tipo de adesivo. A reticulação que ocorre na reação de cura é devida à ligação de dois polímeros lineares, resultando numa estrutura tridimensional rígida algumas reações requerem calor para iniciar e completar a cura, outras podem ser completadas a temperatura ambiente.

Alguns tipos de adesivos termoendurecíveis são: fenólicas, epóxicas, poliésteres e entre outros [2].

2.4.2 Adesivos termoplásticos

Os termoplásticos são originalmente polímeros sólidos que amolecem ou fundem quando aquecidos. Diferem dos termoendurecíveis na medida em que não curam ou endurecem com calor. Como as moléculas não curam numa estrutura reticulada, eles podem ser reaquecidos com a aplicação de calor e aplicados a um substrato. A exposição repetida a elevadas temperaturas pode causar degradação do material por oxidação, e isto limita o número de ciclos térmicos. Uma vez aplicado no substrato, as partes são encostadas e o adesivo endurece por arrefecimento. Os adesivos termofusíveis, muito usados nas embalagens, são exemplos de um material sólido termoplástico que é aplicado em um estado fundido. A adesão desenvolve-se na solidificação gerada pelo arrefecimento. Os adesivos plásticos têm uma temperatura de serviço mais limitada do que os termoendurecíveis. Apesar de alguns termoplásticos originarem uma excelente resistência ao cisalhamento a temperaturas moderadas, esses materiais não são reticulados e tendem a fluir sob carga a baixas temperaturas. Tal deformação em longo prazo sob carga, pode ocorrer em temperatura ambiente ou até a mais baixas temperaturas dependendo do adesivo. A fluência em longo prazo é muitas vezes a característica que impede esses adesivos de serem usados em aplicações estruturais. Os adesivos termoplásticos também não têm uma tão boa resistência a solventes ou agentes químicos como os termoendurecíveis. Alguns tipos de adesivos termoplásticos são: acrílicas, celulósicas, vinílicas e poliamidas. [2]

2.4.3 Adesivos elastoméricos

Os adesivos elastoméricos têm uma classificação própria devido às suas características únicas. São baseados em polímeros elastoméricos que têm uma grande tenacidade e capacidade de deformação, retomam o seu comprimento inicial após a remoção da carga e dão uma boa resistência a juntas submetidas a um carregamento não uniforme. Os adesivos elastoméricos podem ser termoendurecíveis ou termoplásticos.

Devido ao fato dos adesivos elastoméricos serem materiais muito viscoelásticos, são caracterizados por terem um alto grau de deformação, baixo módulo de elasticidade e elevada

tenacidade. Conseqüentemente, estes adesivos apresentam uma boa resistência a forças de arrancamento e uma boa flexibilidade que permite ligar substratos com coeficientes de expansão térmica diferentes. Também são usados para vedantes, amortecimento de vibrações e isolamento sonoro. Alguns tipos de adesivos elastoméricos são: poliuretanos, nitrilos, policloroprenos e silicones [2].

2.4.4 Adesivos híbridos

Os adesivos híbridos são feitos combinando adesivos termoendurecíveis, termoplásticos e elastoméricos em um único adesivo. Tais adesivos foram desenvolvidos para aproveitar as propriedades mais úteis de cada componente. Geralmente, adesivos rígidos e frágeis para altas temperaturas são combinadas com um adesivo elastomérico ou termoplástico flexível e tenaz para melhorar a resistência ao arrancamento e a capacidade de absorver energia.

Recentemente as propriedades de tenacidade de adesivos termoendurecíveis foram melhoradas sem reduzir substancialmente a sua resistência a altas temperaturas. Esses sistemas consistem em híbridos reativos, onde dois componentes líquidos reagem, e híbridos de fase dispersa, onde um agente flexibilizante é incorporado na matriz com partículas discretas. Nos sistemas híbridos reativos, o adesivo flexibilizante reage com o adesivo base originando flexibilidade e tenacidade sem redução significativa de outras propriedades. Um exemplo típico deste tipo de sistema é o adesivo epóxido - uretano.

Outro método de melhorar a tenacidade é introduzir uma microestrutura específica no adesivo. Adesivos híbridos têm resistências elevadas ao arrancamento, impacto e cisalhamento sem sacrificar a resistência química e a resistência a altas temperaturas. Têm também a capacidade para ligar substratos oleosos [2].

2.5 Modos de carregamento

O conhecimento do efeito das principais solicitações em que as juntas coladas estão sujeitas é de extrema importância. Tais solicitações, representadas na Figura 4, são: tração e compressão em que a força é perpendicular ao plano da junta, cisalhamento onde a força é paralela ao plano da junta, e clivagem e arrancamento que ocorrem quando a força não está perfeitamente alinhada com o plano da junta [2].

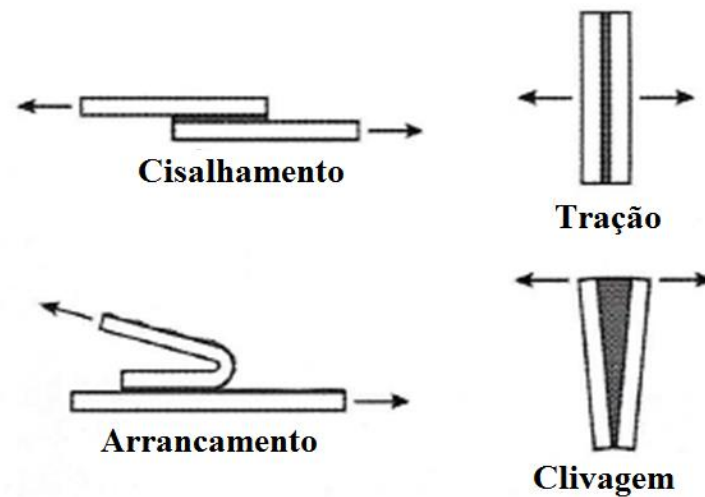


Figura 4: Tensões mais importantes em uma junta adesiva: tração, cisalhamento, clivagem e arrancamento [2].

2.5.1 Tração e compressão

Idealmente, uma junta adesiva é projetada de maneira a ter as superfícies dos substratos paralelos. Infelizmente, na prática, a espessura da cola é difícil de controlar e as forças raramente são rigorosamente axiais, o que origina aumento e surgimento de tensões indesejáveis de clivagem ou de arrancamento de acordo com a Figura 5. Os substratos também devem ser suficientemente rígidos para garantir que a tensão fique uniformemente distribuída. Igualmente, as forças de compressão devem manter-se alinhadas de modo a que o adesivo permaneça em compressão pura. Uma junta adesiva em compressão só rompe se a distribuição de tensões não for uniforme. Na realidade, uma junta em ‘pura’ compressão quase não precisa de adesivo. De modo geral, forças não axiais necessitarão de uma junta muito mais robusta. Na Figura 5, é perceptível o aumento das tensões nesses casos.

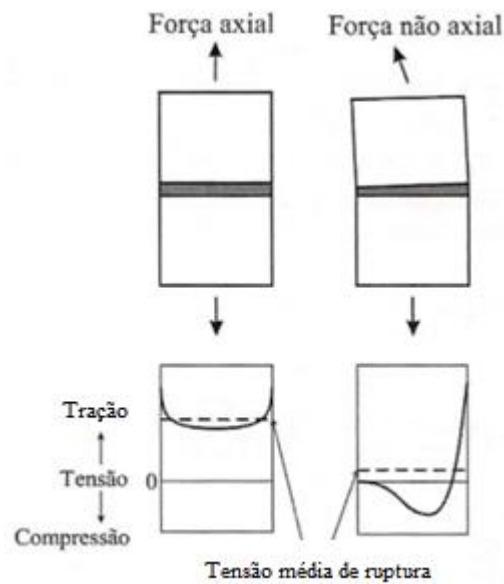


Figura 5: Comparação de carregamentos em uma junta com carregamento axial e não axial [2].

2.5.2 Cisalhamento

As tensões de cisalhamento aparecem quando forças atuando no plano do adesivo tendem a separar os substratos. As juntas são geralmente mais resistentes quando solicitadas ao cisalhamento, devido à contribuição de toda a área colada para manter os substratos alinhados. É perceptível que a maior parte da tensão está localizada nos extremos da sobreposição e que a região central da sobreposição pouco contribui para a sustentação da carga, conforme Figura 6 [2].

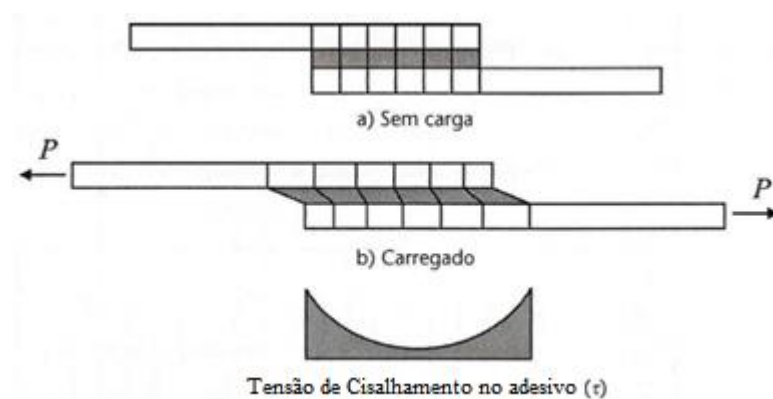


Figura 6: Distribuição da tensão ao longo do comprimento de sobreposição [2].

2.5.3 Clivagem e arrancamento

A clivagem é definida como a tensão que ocorre quando forças na extremidade de uma junta rígida atuam de modo a separar os substratos. As tensões de arrancamento são semelhantes às de clivagem, porém ocorrem onde um ou ambos os substratos são flexíveis. Conseqüentemente, o ângulo de separação pode ser muito maior para o arrancamento do que para a clivagem. As juntas sob clivagem ou arrancamento são menos resistentes do que aquelas sujeitas somente ao cisalhamento porque a tensão está concentrada numa área muito pequena. Toda a tensão fica localizada na extremidade da junta, o adesivo que está na outra extremidade contribui pouco para a resistência da junta. Os adesivos frágeis e rígidos são particularmente sensíveis às forças de arrancamento. Por outro lado, os adesivos mais dúcteis e flexíveis permitem uma distribuição de tensões menos concentrada e permitem uma maior resistência, conforme mostrado ilustrativamente na Figura 7. Os adesivos epóxis rígidos têm uma resistência ao arrancamento de apenas 0,35 N/mm de largura, enquanto que os adesivos mais tenazes podem chegar aos 4-8 N/mm [2].

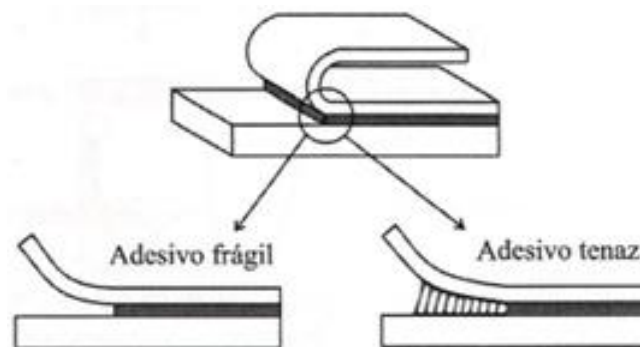


Figura 7: Diferença ilustrativa de adesivo solicitado em arrancamento tenaz ou frágil [2].

Conforme a evolução dos modelos analíticos notou-se a existência de deformação do substrato pela existência de um momento fletor que é originário da não linearidade dos substratos e suas forças, inclusive os substratos rígidos, como ilustrado na Figura 8. Tal deformação introduz solicitações indesejadas até em juntas com solicitações simples, conforme mostrado na Figura 9.

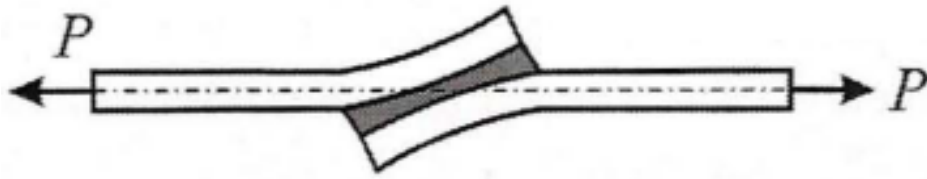


Figura 8: Representação da deformação dos substratos [2].

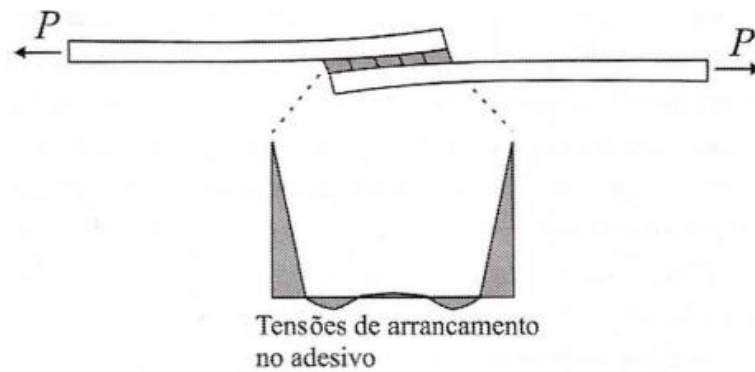


Figura 9: Aparecimento de tensões de arrancamento em juntas de sobreposição simples [2].

Em juntas coladas multimateriais, a utilização de substratos não similares diminui a resistência da junta devido a uma distribuição de tensão não uniforme. De modo a resolver este problema, a junta deve ser projetada de modo que a rigidez longitudinal dos substratos seja igual. Juntas com rigidez balanceada, como mostra a Figura 10a, em que $E_1 t_1 = E_2 t_2$ ou a espessura dos dois substratos seja igual apesar da rigidez longitudinal dos substratos, em que $t_1 = t_2$ como mostrado na Figura 10b.

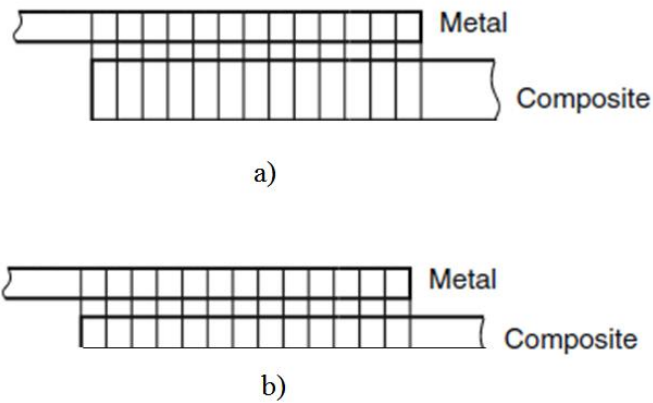


Figura 10: Juntas coladas dissimilares: a) Juntas rigidamente balanceadas, b) juntas geometricamente balanceadas. [6]

2.6 Tensões térmicas residuais

Substratos não similares podem ter diferentes coeficientes de expansão térmica, conforme é evidente na Tabela 1. Desse modo, as mudanças de temperatura podem introduzir tensões térmicas adicionais além das cargas aplicadas externamente. A cura adesiva e a contração térmica resultante podem também introduzir tensões internas, ocasionando deformações ou trincas. É importante ter em conta os efeitos térmicos pois estes geralmente levam a uma redução de resistência da junta [5].

Vários autores descobriram que as tensões causadas pela contração do adesivo tem muito menos efeitos sobre a força de adesão que os gerados pela incompatibilidade térmica do substrato. Cargas térmicas são especialmente importantes ao ligar diferentes substratos com diferentes coeficientes de expansão térmica [6].

Tabela 1: Coeficientes de expansão térmica linear [7].

Material	Coeficientes de expansão térmica Linear [$m^{-6}K^{-1}$] a 20°C
Aço de alta resistência	13
Alumínio	23
Magnésio	26
Carbono reforçado com fibra de polímero	0
Adesivo flexível de Poliuretano	100-150

No caso de juntas de liga metálica / Carbono reforçado com fibra de polímero, ilustrada na Figura 11a, o substrato de liga metálica tende a comprimir à medida que a temperatura diminui a partir da temperatura de cura (geralmente uma temperatura alta), enquanto o carbono reforçado com fibras de polímero permanece inalterado através de todo o processo de cura, desse modo tensões residuais adesivas irão ocorrer especialmente na extremidade da junta. Neste caso, uma extremidade da sobreposição terá uma tensão de cisalhamento residual positiva e o outro terá uma tensão de cisalhamento residual negativa conforme mostrado na Figura 11b.

As tensões térmicas são benéficas para uma extremidade, mas desvantajoso para a outra extremidade da junta, e podem ser calculadas utilizando a fórmula:

$$\Delta T = T_O - T_{SF}$$

Em que T_O é a temperatura de cura e T_{SF} é a temperatura livre de tensões, também conhecida como temperatura de sala [7].

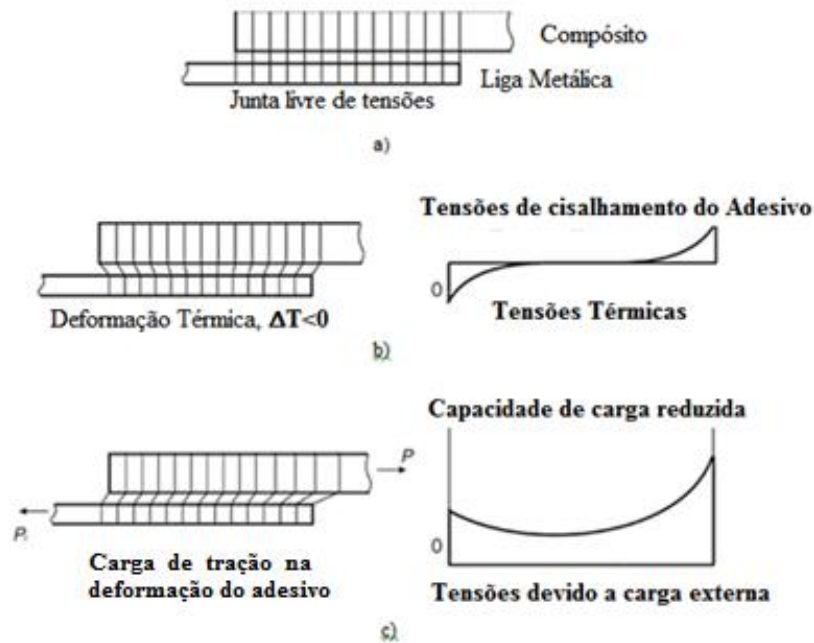


Figura 11: Tensões térmicas residuais causadas pelo processo de cura a alta temperatura. a) Junta livre de tensão. b) Junta com tensões térmicas. c) Carga de tensão assimétrica no adesivo.

A resistência da junção será afetada pela distribuição de tensões não uniforme ao longo da superfície da junta de acordo com a Figura 11c.

2.7 Tipos de juntas

As juntas coladas podem possuir diversas formas em função de fatores como: tensões envolvidas, intensidade da tensão e facilidade de fabricação.

Os diversos formatos de juntas (Figura 12) foram evoluindo para diminuir as tensões envolvidas nela com base nos avanços teóricos dos modelos de tensões, porém devido ao custo, as juntas mais simples continuam sendo as mais utilizadas. As juntas mais comuns encontradas são de sobreposição simples, dupla e chanfro [4].

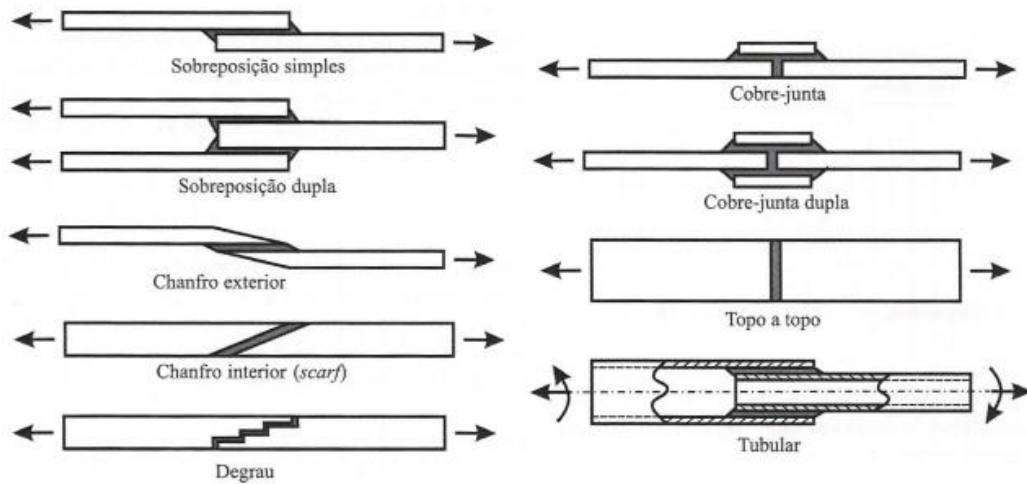


Figura 12: Principais tipos de juntas [2].

2.8 Modos de falha

Para a análise de juntas coladas, é importante que seja feita a caracterização da falha para um entendimento completo das propriedades da junta. Em juntas coladas, existem 3 modos básicos de falha. Esses são falha adesiva, falha coesiva, e falha mista. Há também a falha no substrato, que depende do material do qual este é composto. As falhas do substrato não estão aqui descritas. As falhas no adesivo são evidentes na Figura 13.

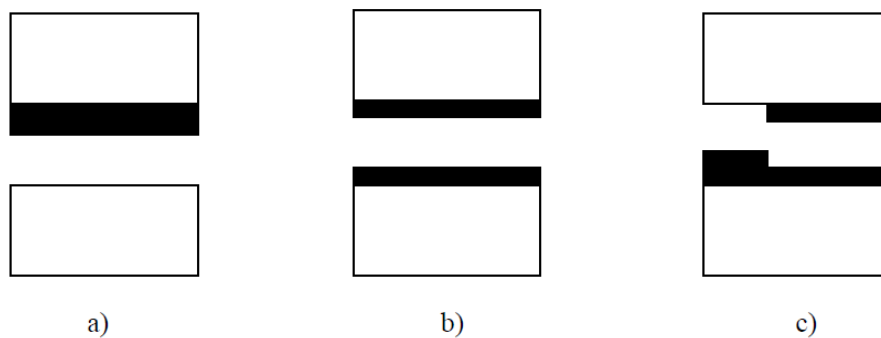


Figura 13: Modos de falha em uma junta: a) Adesiva; b) Coesiva; c) Mista [5].

2.8.1 Falha Adesiva

Uma falha adesiva ocorre quando existe um defeito da colagem devido:

- Ao mal estado da superfície;
- Ao adesivo erroneamente utilizado;
- A algum problema durante a execução do processo.

Geralmente a ruptura adesiva encontra-se relacionada à má execução do tratamento superficial do substrato.

Em muitas situações, a adesão entre dois materiais pode falhar em consequência do ambiente a que os materiais foram expostos durante uma aplicação. Entre os fatores que podem levar à falha estão: temperatura, pH, produtos químicos agressivos e irradiação [4].

2.8.2 Falha Coesiva

Na falha coesiva, a falha ocorre no adesivo. Esta ruptura normalmente acontece com tensão elevada, pois excede a resistência do adesivo. Por isso não há nenhuma preocupação em relação à execução do processo, como o tratamento superficial [4].

Por outro lado, se as tensões mecânicas que levam à ruptura são baixas, então não há como contestar a coesão do adesivo. Em outras palavras, o adesivo foi uma má escolha.

A coesão depende da temperatura e determina o estado de agregação dos materiais. Uma forte coesão conduz ao estado sólido e favorece a resistência interna. Um baixo ou fraco valor da coesão favorece a deformação da estrutura, até o estado líquido ou mesmo o gasoso. Nos casos particulares, ela pode conduzir a uma degradação química.

A coesão é assim determinante pela tenacidade do adesivo durante o processamento e pela sua resistência após a cura.

2.8.3 Falha Mista

A ruptura mista é parcialmente adesiva e parcialmente coesiva. Este tipo de ruptura é muitas vezes causado pelo tratamento superficial mal executado, ocasionando primeiramente uma ruptura adesiva, levando a seguir a uma ruptura coesiva nas partes da superfície que foram bem tratadas (concentração de tensões) [4].

2.9 Defeitos em juntas

Juntas coladas, na realidade, não são tão resistentes quanto a teoria o sugere. Existem três principais fatores que justificam tal perda da resistência, conforme explicitado nos itens a seguir.

2.9.1 Existência de uma camada fraca

O conceito da camada fraca sugere que a ideia de duas fases em contato serem completamente isotrópicas e de composição uniforme é equivocada. A superfície dos materiais é diferente do interior e por isso formam uma camada fraca por diversos motivos, como: a inclusão de gases, formação de filme de óxidos e concentração de constituintes em pequenas proporções. Dessa forma é de suma importância antes de aplicar o adesivo preparar a superfície e isso inclui limpá-la e diminuir sua rugosidade. Tal fato é evidente na Figura 14.

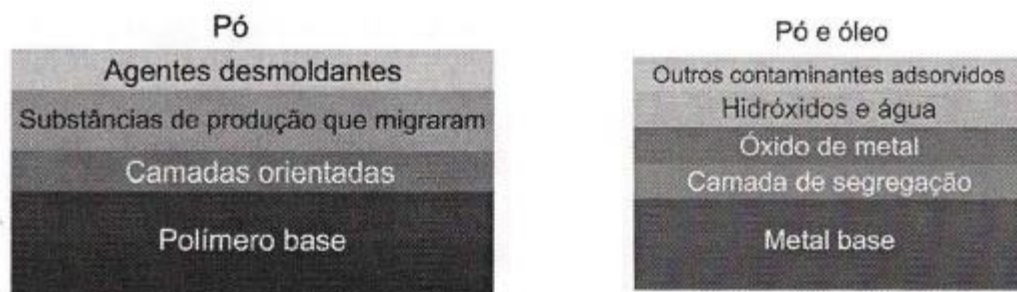


Figura 14: Principais impurezas em substratos poliméricos e metálicos [2].

2.9.2 Distribuição de tensão em juntas não perfeitamente uniforme

A concentração de tensões também é problemática porque as tensões de uma junta se concentram perto das extremidades, como exemplificado na Figura 15, e por isso a partir de um momento o aumento do comprimento de sobreposição não irá resultar em um aumento de resistência, conforme Figura 16.

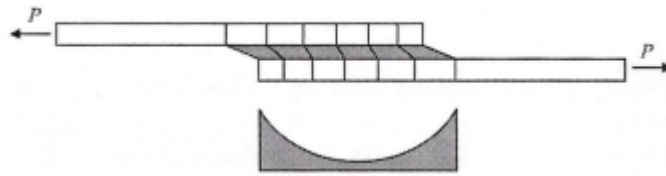


Figura 15: Distribuição dos esforços numa junta de sobreposição simples [2].

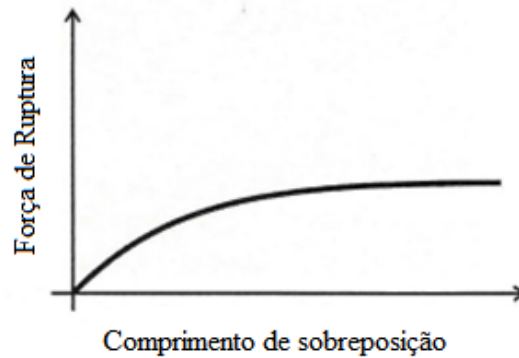


Figura 16: Resistência de uma junta de sobreposição simples em função do comprimento de sobreposição [2].

2.9.3 Existência de irregularidades na superfície

As irregularidades de superfície causam bolsões de ar que não contribuem para a resistência da junta e assim se comportam como pontos iniciadores de trinca. Conforme as teorias clássicas de Griffith e Irwin, uma trinca pode ter resultados catastróficos pela sua natureza de propagação rápida depois de um comprimento crítico. Tais irregularidades podem ser evidenciadas na Figura 17.

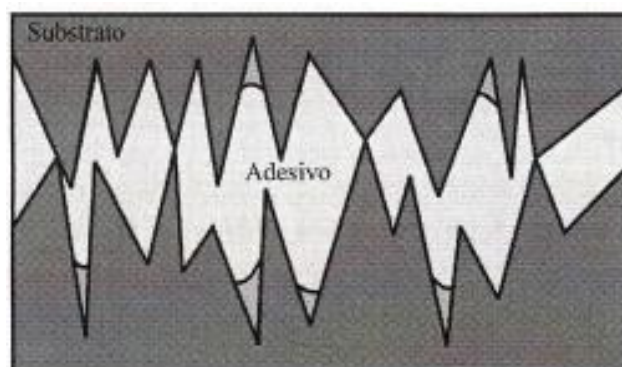


Figura 17: Pontos de iniciação de fissuras em superfícies muito irregulares [2].

Grande parte dos defeitos na colagem são causados principalmente por uma má molhabilidade ou presença de impurezas na superfície.

A molhabilidade é definida como a tendência de um fluido aderir ou espalhar-se preferencialmente sobre uma superfície sólida em presença de outra fase imiscível e é baseado na natureza das substâncias e sua limpeza. Empiricamente estabeleceu-se que a tensão crítica da superfície do sólido deve ser no mínimo igual a tensão do líquido, caso contrário o adesivo não irá molhar a superfície por completo e vazios intersticiais aumentarão. Portanto, é importante diminuir a concentração de impurezas e preparar a superfície antes da colagem para assim garantir uma boa molhabilidade [2].

De maneira geral, defeitos em juntas adesivas incluem deficiências na preparação da superfície, vazios e porosidade, e variações de espessura na camada substrato. Dos vários defeitos que são de interesse, as deficiências na preparação da superfície são provavelmente as maiores preocupações. Estas são particularmente perigosas, pois não há atualmente qualquer técnica de avaliação não destrutiva capaz de detectar baixa força interfacial entre adesivo e substrato. Variações na espessura do adesivo normalmente ocorrem na forma de afinamento devido ao excesso de adesivo nas bordas das juntas. Isto leva à sobrecarga do adesivo na proximidade das bordas [8].

2.10 Preparação da superfície

Ao analisar e fabricar juntas coladas multimateriais é imprescindível à preparação das superfícies dos diferentes tipos de substratos utilizados a fim de diminuir defeitos e irregularidades em juntas. Neste tópico, a preparação das superfícies de aços, alumínio e compósitos serão estudados.

O principal objetivo da preparação da superfície é garantir que a adesão seja tal que o ponto mais fraco da junta seja ou o adesivo ou o substrato. Com uma boa preparação da superfície, a ruptura não deve ocorrer na interface devido a uma camada fraca ou molhagem insuficiente. De um modo geral, todos os substratos devem ser imprescindivelmente tratados antes da colagem. Isso pode passar por um ou uma combinação dos seguintes efeitos: remoção de material, como óleos e gorduras por exemplo; modificação química da superfície, com a substituição do óxido presente por outro mais firmemente ligado ao liga metálica base e mais resistente ou alteração da topografia da superfície, com a criação de uma superfície mais rugosa e capilar [2].

2.10.1 Preparação de aços

A superfície de aços, quando em meio úmido, é penetrada por moléculas de água nos poros ocorrendo o processo de formação de ferrugem. Os óxidos ou hidróxidos formados neste processo, prejudicando a adesão do substrato ao adesivo, devem ser eliminados por tratamento mecânico ou químico.

No caso do tratamento mecânico, utilizam-se a lixagem ou jateamento abrasivo. No que diz respeito ao jateamento abrasivo, a pressão deve ser adaptada à dureza do aço. É preciso ter cuidado com as deformações geradas pelas tensões de compressão, especialmente no caso de chapas finas. No caso disto acontecer, deve-se jatear a outra face.

No caso dos tratamentos químicos, utilizam-se geralmente os ácidos clorídricos (HCl) e sulfúricos (H₂SO₄).

2.10.2 Preparação de alumínio

Quando a superfície do alumínio se encontra em contato com um meio contendo oxigénio, ocorre oxidação imediata dessa superfície traduzindo-se na formação de um óxido muito conhecido: a alumina de estrutura amorfa (não cristalina). Esses óxidos são sensíveis ao meio ambiente, isto é, após exposição à umidade (e temperatura), uma parte transforma-se em hidróxidos. A alumina, em presença de água, hidrata-se formando alumina monohidratada e alumina trihidratada.

A superfície de um substrato de alumínio simplesmente oxidada é constituída por alumina, que pode ser mais bem observada como mostrado na Figura 18.



Figura 18: Aspecto da alumina simplesmente oxidada [2].

Quando essa camada de alumina sofre um tratamento em meio úmido a uma temperatura superior a 70 °C, a alumina transforma-se em alumina mono hidratada que, por

expansão, preenche os poros, de acordo com a Figura 19. Tal processo é chamado de colmatagem.

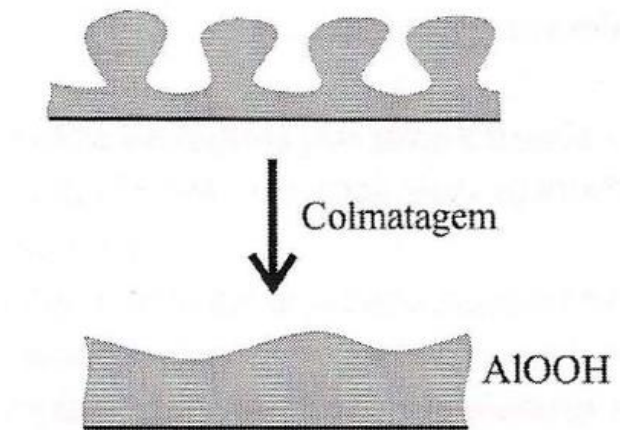


Figura 19: Aspecto da alumina colmatada [2].

O tratamento levando à colmatagem da superfície do alumínio melhora nitidamente a resistência à hidratação, porém diminui a energia de superfície diminuindo a aderência com polímeros.

O tratamento do alumínio escolhido depende da qualidade de adesão exigida e das condições econômicas. Descreve-se a seguir o tratamento quando a camada de óxidos pode ser conservada, quando é desejada uma nova camada de óxidos melhor adaptada à química do polímero e quando é necessária uma conversão química.

Quando a camada de óxido pode ser conservada, é recomendado:

- desgorduramento com solventes (clorados e cetonas) durante 10 a 20 minutos;
- jateamento abrasivo fino ou lixagem (abrasivos 120 - 240). O jateamento deve ser realizado de preferência com corindon;
- limpeza com escova;
- desgorduramento em fase vapor durante 10 minutos;

Quando é desejado uma nova camada de óxidos melhor adaptada ao polímero, é recomendado:

- desgorduramento em banho de vapor com solvente ou detergente apropriado;
- ataque com ácido crômico;
- anodização com ácido fosfórico;

Quando deseja-se converter quimicamente uma camada de óxidos, recomenda-se:

- limpeza com um produto à base de ácido fosfórico (passagem à escova);
- lavagem com água limpa;
- passagem à escova do sal de cromatação em solução em água (desionizada). De preferência, a peça deverá ser colocada na posição vertical a fim de deixar um filme fino;
- deixar agir durante 1 minuto aproximadamente;
- lavar com um jacto de água (não esfregar porque a camada é pouco substrato);
- secagem necessária do filme para adquirir uma boa coerência.

2.10.3 Preparação de compósitos

Para a preparação de superfície de compósitos, mais especificadamente de compósitos de fibra de carbono, é recomendado abrasão com lixa fina seguida de desengorduramento com acetona ou MEK (Butanona).

2.11 Ensaios

As estruturas coladas são geralmente projetadas para que o adesivo seja essencialmente sujeito a esforços de cisalhamento, pois para este tipo de solicitação o adesivo apresenta melhores características e propriedades.

Os ensaios, em geral consistem em avaliar e verificar tais características, podendo elas ser físicas, químicas, mecânicas, térmicas, dentre outras. As propriedades físicas e térmicas são propriedades diretamente ligadas aos adesivos, que influenciam na sua preparação, utilização e como irá se comportar nas mais diversas condições ambientais e mecânicas. Os ensaios mais usuais requerem uma amostra real (corpo de prova), sendo assim destrutivos, demonstrando como será a ligação que será formada entre o adesivo e o substrato correto. Os ensaios reais devem levar diversos fatores em consideração, dentre eles, à geometria da junta, a interface, a camada primária, a preparação da superfície, o tempo de cura e o adesivo.

Os principais ensaios realizados são:

- Ensaios de dureza (método Shore, método Barcol e Nanoindentação) avaliando a dureza a fim de assegurar a cura correta do adesivo;
- Ensaio de temperatura de transição vítrea para obter a caracterização da variação do módulo de elasticidade e volume específico;

- Ensaio de juntas que tem como objetivo a análise comportamental do material em diversos formatos de juntas sobre tensão. Por exemplo, ensaio de junta de sobreposição simples, Notched plate shear method (Arcan), topo em torção e outros.

2.11.1 Ensaio de cisalhamento em uma junta de sobreposição simples

O ensaio de cisalhamento por tração é o mais utilizado na determinação da resistência de juntas coladas de sobreposição simples. Os resultados obtidos são de extrema utilidade para determinação das condições geométricas da junção e do tipo de adesivo em aplicação na indústria. Através deste é possível determinar características importantes dos adesivos e das junções, como a tensão média de ruptura τ , dada pela relação entre a força máxima aplicada (F) e a área de sobreposição dos substratos ($\tau \text{ media} = F/b \cdot l$) [2].

Este ensaio é regulamentado pelas normas ASTM D1002, ISO 4587 ou outras similares. Na Tabela 2 são demonstradas algumas das vantagens e desvantagens do ensaio de juntas de sobreposição simples [10].

Tabela 2: Vantagens e desvantagens do ensaio de cisalhamento em junta de sobreposição simples [11].

Vantagens	Desvantagens
Importância aparente da tensão de cisalhamento é incompatível com metais, plásticos e compósitos;	Limitações Geométricas
Simples/Econômico: <ul style="list-style-type: none"> • Fabricação da Amostra; • Ensaios; • Geometria do corpo de prova; 	Limitado a Substratos rígidos;
	Não é adequado para o estudo da criação de projeto;
	Tensões de cisalhamento elevadas proporcionam tensão de arrancamento nas extremidades da junta;
	Ensaio moderado a momentos fletores elevados;
EM 1465/ BS 5350: Part C5/ ASTM D1002/ ASTM D3166	Falha atribuída a tensões de arrancamento;
Indicados para Ensaios de Fadiga/Ambientais	Necessários acessórios especiais de ligação;
	Grandes incertezas nas medições

O ensaio em junta de sobreposição simples pode ser usado como método comparativo para estudo de adesivos e juntas, desde que se garantam a padronização dos parâmetros restantes que podem afetar o resultado dos ensaios. Na Figura 20 temos uma máquina exemplificando a realização do teste em questão [9].



Figura 20: Foto de um corpo de prova sendo ensaiado no Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES), CEFET-RJ.

2.12 Predição de tensões em juntas coladas

As juntas de sobreposições simples são uma das juntas mais estudadas devido a simples e eficiente geometria para caracterizar uma junta adesiva. Entretanto, um dos problemas associados a este tipo de junta é o fato de que a distribuição de tensão (tensões de arrancamento e de cisalhamento) é concentrada nas extremidades da sobreposição da junta. O efeito é ainda agravado pela ligação de diferentes materiais. As tensões são concentradas na extremidade da sobreposição do substrato de menor rigidez. Consequentemente, tal efeito nas tensões pode ocasionar falhas prematuras nas extremidades da sobreposição. De forma a atenuar este problema, pode-se balancear a junta aumentando a espessura do substrato flexível ou utilizar substratos com adelgaçamento na extremidade da sobreposição. Contudo, com o aumento da espessura do substrato, aumenta-se também o peso da estrutura, enquanto que ao utilizar substratos com adelgaçamento ocorre também o encarecimento da junta.

Para a análise algumas considerações foram realizadas:

- Foram consideradas somente deformações realizadas por tensões no substratos;
- Tensões adesivas foram restritas a tensões de arrancamento e cisalhamento;
- Tensões presentes na junta foram consideradas constantes para todo o comprimento da camada adesiva.

Contudo, as tensões na camada adesiva não são constantes devido ao diferencial de deformação e excentricidade do percurso de carregamento [12].

2.12.1 Mecânica do Contínuo

Para a predição da resistência mecânica da junta, os valores máximos de tensão, de deformação e energia de deformação, que foram analisados pelo método de análise de elementos finitos, são utilizados no critério de falhas e os resultados são comparados com os valores máximos de cada material utilizado.

Inicialmente, as tensões máximas principais foram utilizadas para materiais frágeis cujos modos de falha estão, em certos ângulos, na direção da tensão principal máxima. Este critério ignora todas as outras tensões principais, mesmo se estas não forem nulas. Estabelecendo modos de falha em juntas coladas com adesivos frágeis, [13] analisaram a resistência mecânica de juntas utilizando este critério. Neste caso, devido a singularidades na tensão na extremidade da junta, o valor da tensão na análise depende do tamanho da malha utilizada. Os valores de tensões foram calculados utilizando ponto de Gauss próximo à singularidade, ou extrapolação dos valores de pontos de Gauss na singularidade. Portanto, deve-se tomar cuidado ao utilizar este critério. Apesar de este ser sensível ao tamanho de malha utilizada, a descrição física do processo de falha é bastante clara, já que a tensão principal máxima é a maior responsável para a falha de juntas coladas com adesivos frágeis [14].

Em geral, devido ao processo de produção, a maior parte dos substratos da junta adesiva não são afiados nas extremidades, eles apresentam uma pequena curva. Esta curva irá afetar a distribuição da tensão na área da extremidade da sobreposição e, portanto, na resistência da junta em geral. O encurvamento da extremidade da junta irá eliminar o fator de concentração de tensão e facilitar a aplicação de uma tensão ou de um critério limite de deformação.

Pesquisas realizadas por Adam e Harris demonstraram que a resistência mecânica da ligação adesiva, ao utilizar substratos com extremidades arredondadas, aumentou em comparação com substratos com extremidades sem arredondamento. Ainda recentemente, o estudo de Zhao investigou o efeito do arredondamento do substrato, exemplificado na Figura 21 abaixo, demonstrando que a singularidade da extremidade desaparece com um pequeno arredondamento [15, 16].

Para analisar a resistência de uma junta de sobreposição, tensões de cisalhamento são normalmente utilizadas, levando em consideração a resistência ao cisalhamento do adesivo que foi considerado para ser o limite da tensão de cisalhamento para o adesivo na junta [17].

Contudo os critérios baseados em tensões não podem ser utilizados para adesivos dúcteis devido à grande quantidade de carregamento que estes adesivos suportam até ceder. Para o caso de adesivos dúcteis, Adam e Harris [15] utilizaram a tensão principal máxima como critério de falha. Este critério de análise da resistência mecânica possui também problemas em relação ao tamanho da malha.

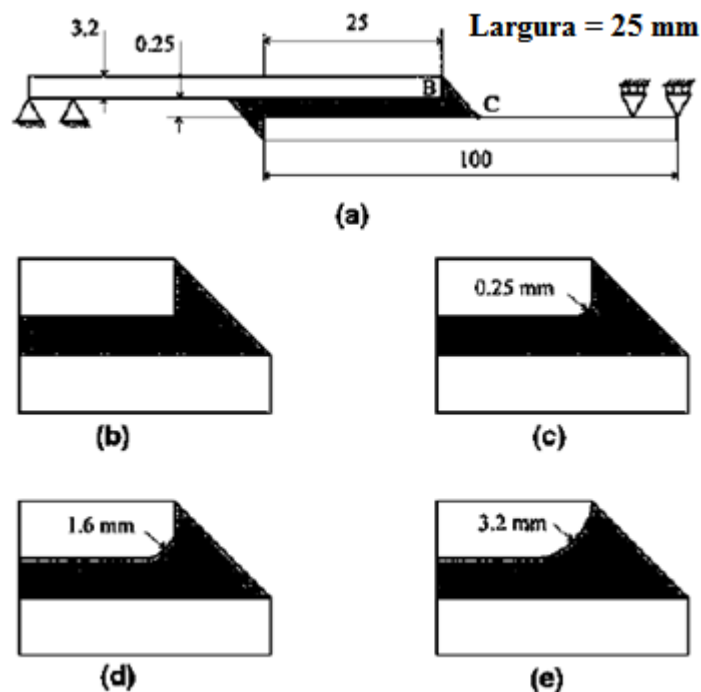


Figura 21: a) Deformação do adesivo em substratos sem filetes. b) substrato sem filete, c) substrato com filete de raio 0,25 mm, d) substrato com filete de raio 1,6 mm, e) substrato com filete de raio 1,6 mm [16].

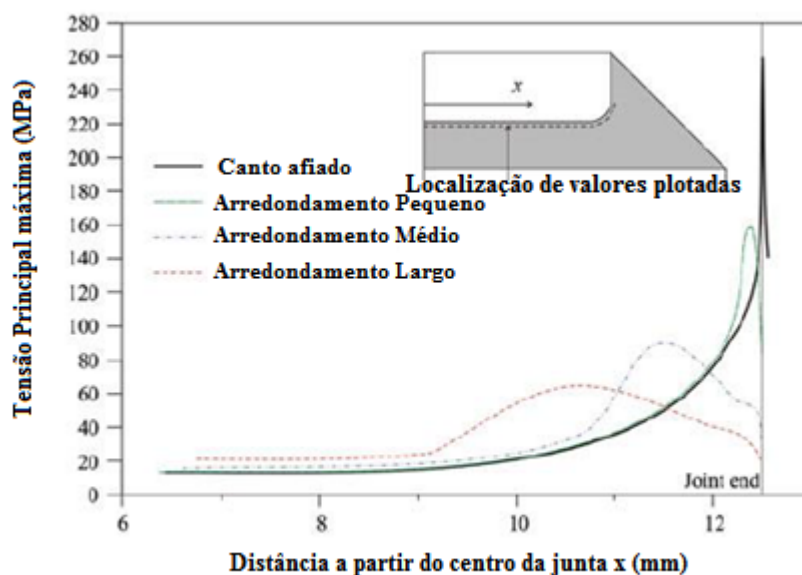


Figura 22: Gráfico de tensão principal x deformação [16].

A energia de deformação representa a área sobre a curva tensão vs deformação da Figura 22 acima, portanto, tanto a tensão quanto a deformação estão relacionadas à energia de deformação. Neste caso, pode-se observar que o critério de energia de deformação leva em consideração ambos os componentes de tensão e de deformação, deste modo, é mais adequado a utilização deste critério em vez de utilizar somente o critério de tensão ou de deformação.

Para adesivos muito dúcteis, Crocombe [18], em sua pesquisa de juntas de sobreposição, encontrou que todos os comprimentos da camada adesiva cederam antes de falhar. Portanto, um novo critério de falha foi estabelecido baseado na degradação de toda sobreposição do adesivo. Este critério é muito útil para adesivo muito dúctil, no qual o mesmo não pode suportar alto carregamento uma vez que todo ele cede. O adesivo necessita ser muito dúctil para alcançar uma degradação global, em toda a junta, antes de falhar.

Todos os critérios mencionados acima podem ser utilizados somente para estruturas contínuas, eles possuem algumas dificuldades uma vez que ocorrem defeitos ou em caso de estruturas multimateriais no qual a análise analítica é difícil de aplicar e soluções numéricas são utilizadas.

2.12.2 Mecânica da Fratura

CrITÉRIOS baseados na mecânica do contínuo estabelecem que o material não possui defeitos e portanto, a estrutura e o material se comportam como um corpo contínuo. Porém, a presença de defeitos ou dois materiais com protuberâncias infringem os princípios de mecânica do contínuo. Por outro lado, a mecânica da fratura assume que a estrutura não é contínua, permitindo defeitos de fabricação ou qualquer outro dano recebido durante seu ciclo de vida [17].

Delaminação, descolagem, trincas e outras imperfeições presentes em materiais são normalmente pontos de concentração de tensão e, portanto, pontos iniciadores e propagadores de trinca, ocasionando falha do material. Este método avalia se o tamanho de cada defeito não ultrapassa o tamanho crítico de fratura que, conseqüentemente, causa a falha estrutural. A mecânica da fratura se baseia em dois critérios básicos, ambos implementados para o estudo de materiais com trincas. Estes critérios são: Fator de intensidade de tensão e o outro é baseado em conceitos de energia [19].

O fator de intensidade de tensão K é um parâmetro escalar que define as mudanças que ocorrem na vizinhança de uma ponta de trinca. Para um melhor entendimento do fator de intensidade de tensão K , é necessário conhecer os modos de carregamento que levam a fratura do material.

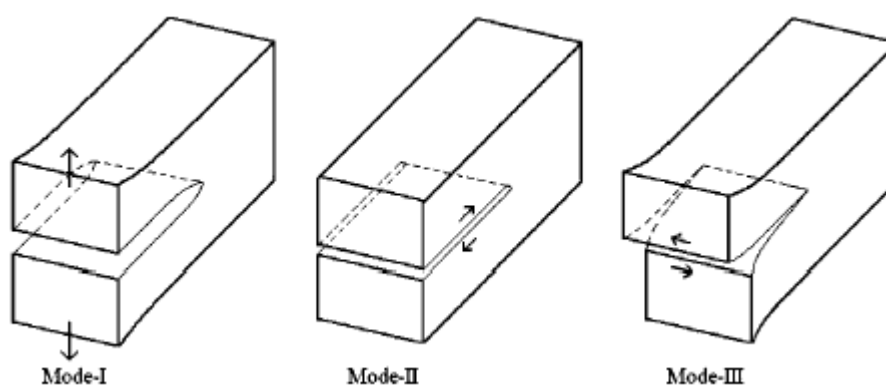


Figura 23: Ilustração dos 3 modos de fratura [23].

Na Figura 23 acima, é possível observar três diferentes modos de carregamento que levam a fratura. O modo I representa o modo de abertura de trinca, os modos II e III são ambos modos de cisalhamento. Para o modo I e modo III, a superfície da trinca se desloca

perpendicularmente à ponta da trinca e para o modo II, a superfície da trinca se desloca paralelamente a ponta da trinca.

Dentre estes três modos básicos, o modo I é o mais importante, ele é a condição de carregamento predominante na maioria das situações práticas e também é a mais simples de ser analisada. Este é o modo de propagação de fraturas que será levado em consideração na análise deste trabalho.

O fator de intensidade de tensão caracteriza a tensão na ponta de trinca e mede a capacidade de propagação. Para o modo I, o fator de intensidade de tensão pode ser calculado com a seguinte equação:

$$K_I = Y\sigma_r\sqrt{\pi a} \quad [23]$$

Em que Y , é uma função dependente da geometria e distribuição de carregamento:

σ_r , é a tensão de carregamento;

a , é o comprimento inicial da trinca.

Neste caso, a trinca irá ocorrer quando:

$$K_I = K_{Ic} \quad [23]$$

Em que K_{Ic} é chamado de tenacidade à fratura de modo I e é caracterizada pela habilidade do material de prevenir um aumento de trinca. Quando o valor de K_I é menor que o valor de resistência a fratura de modo I, a trinca não irá se propagar. Quando este valor se iguala, a falha ocorre.

2.12.3 Modelos de Zona Coesiva

Com a finalidade de analisar danos coesivos, não é necessário trincas iniciais, a propagação de trincas é o resultado de uma degradação simulada do material. A introdução de análise de elementos finitos em conjunto com o modelo de danos coesivos de modos mistos é uma combinação de ambas as mecânicas do contínuo e de fratura pela inclusão de ambos os parâmetros de resistência e energia para caracterizar o processo de descolamento [5].

O modelo de zona coesiva (CZM) pode ser melhor analisado na Figura 24 abaixo, que ilustra uma ponta de trina.

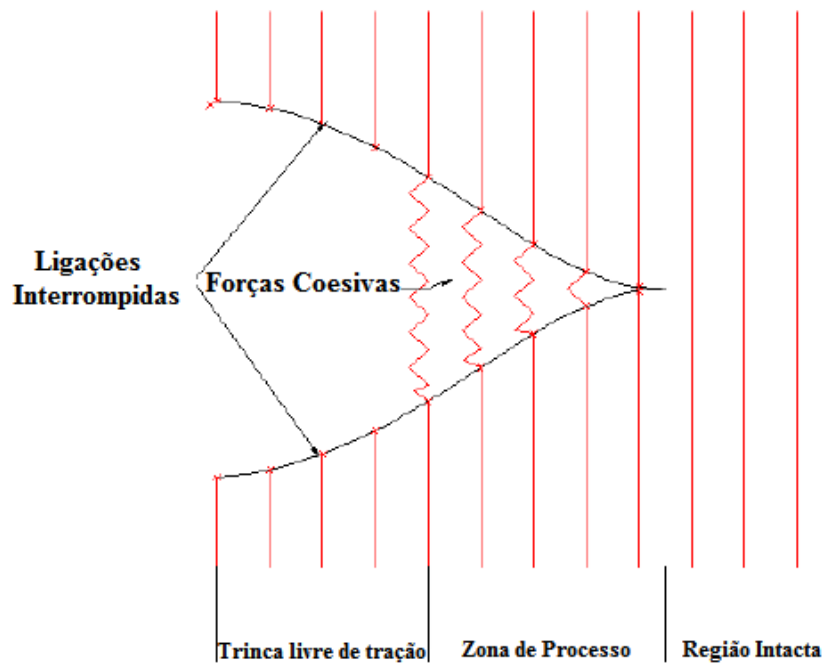


Figura 24: Ilustração do modelo de zona coesiva e suas três regiões: Região intacta, região de zona do processo; e trinca de livre tração [5].

A zona de processo ilustrado na Figura 24 acima é uma zona de transição na propagação da trinca entre a trinca de livre tração e a zona elástica linear. As forças coesivas entre as extremidades da trinca estão representadas pelas molas. A extremidade da trinca está desenhada como uma ponta afiada de uma gotícula de água para mostrar que o efeito coesivo é dominante somente na zona coesiva.

Para a distribuição de tensões na zona de processo, o modelo bilinear desenvolvido por Barenblatt é frequentemente usado conforme ilustrado na Figura 25 abaixo [20].

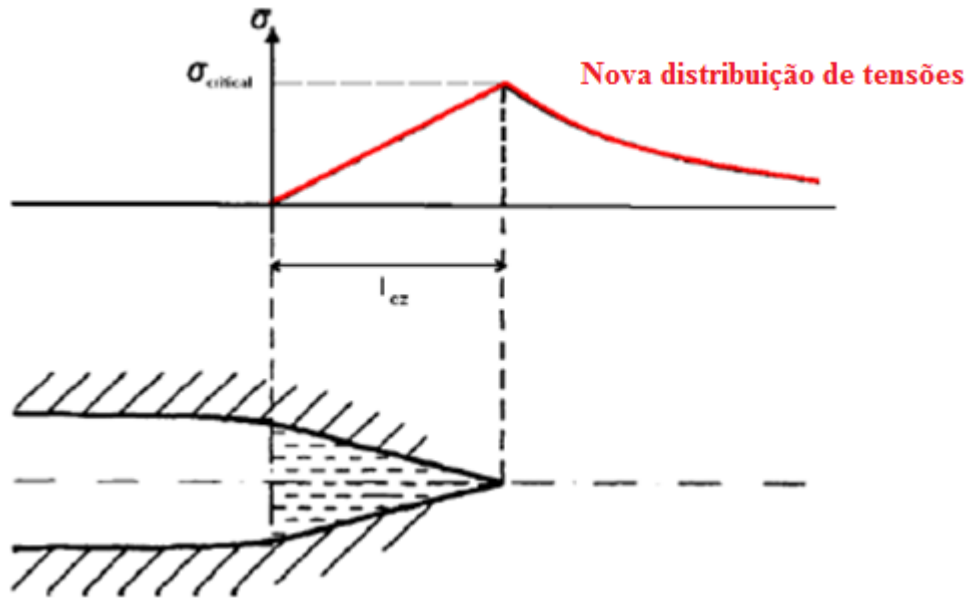


Figura 25: Modelo bilinear de distribuição de tensões [5].

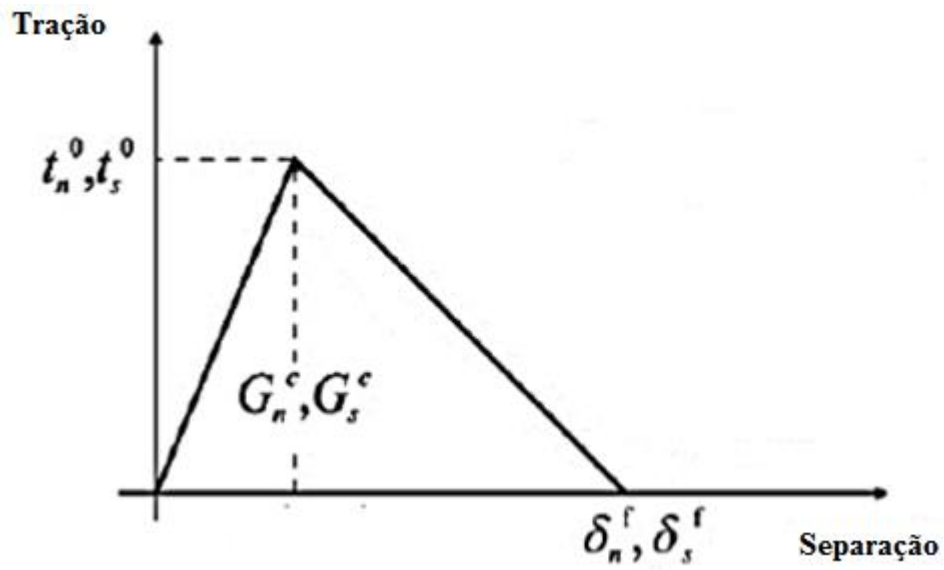
Pesquisas foram feitas com a finalidade de prever a resistência mecânica de junta colada por adesivos com foco na simulação numérica de danos e crescimento de trinca. Os resultados foram bastante precisos ao prever numericamente um crescimento de trinca. Diferentes leis de zona coesiva foram estabelecidas, conforme ilustradas na Figura 26 abaixo.

Modelos de zona Coesiva (CZM) são baseadas em um relacionamento entre tensões e deslocamentos relativos (em tensão normal ou cisalhamento) conectando pares de nós de elementos coesivos, para simular a comportamento elástico da resistência coesiva e subsequente amolecimento, para modelar a degradação das propriedades do material até a sua falha. O formato da região de amolecimento pode também ser ajustado conforme o comportamento de diferentes materiais ou interfaces [21].

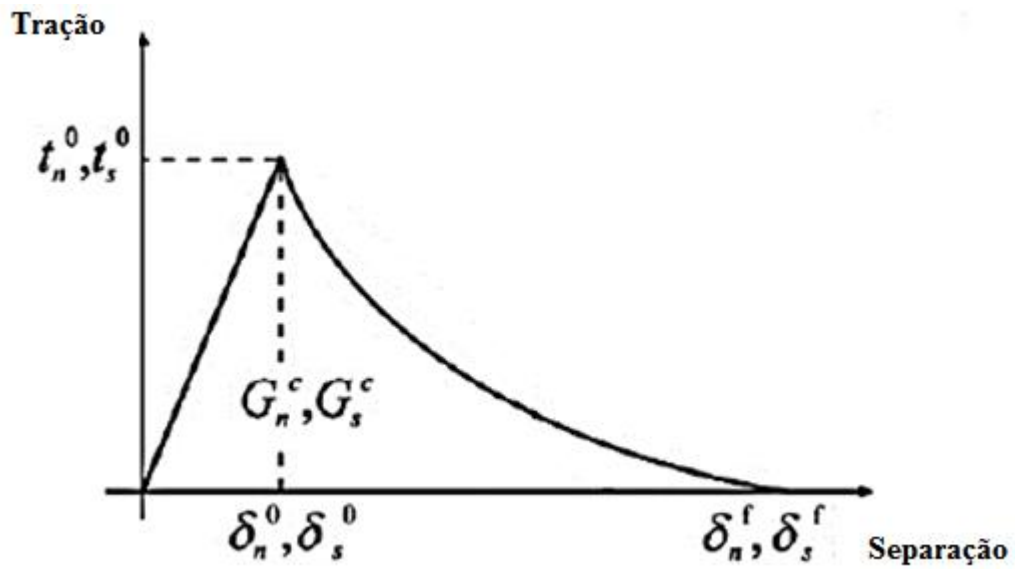
As áreas sobre as leis de tração-separação na tensão ou cisalhamento (G_n ou G_s , respectivamente) são igualadas a tenacidade de fratura na tensão normal (G_{cn}) ou no cisalhamento (G_{cs}), na respectiva ordem. Sobre puro carregamento, o dano aumenta em um ponto de integração específico quando tensões são liberadas na respectiva lei de dano. Sobre um carregamento combinado, os critérios de tensões e energia são normalmente utilizados para combinar tensão normal e cisalhamento [22].

A lei triangular assume que um comportamento inicial elástico linear é seguido por uma degradação também linear.

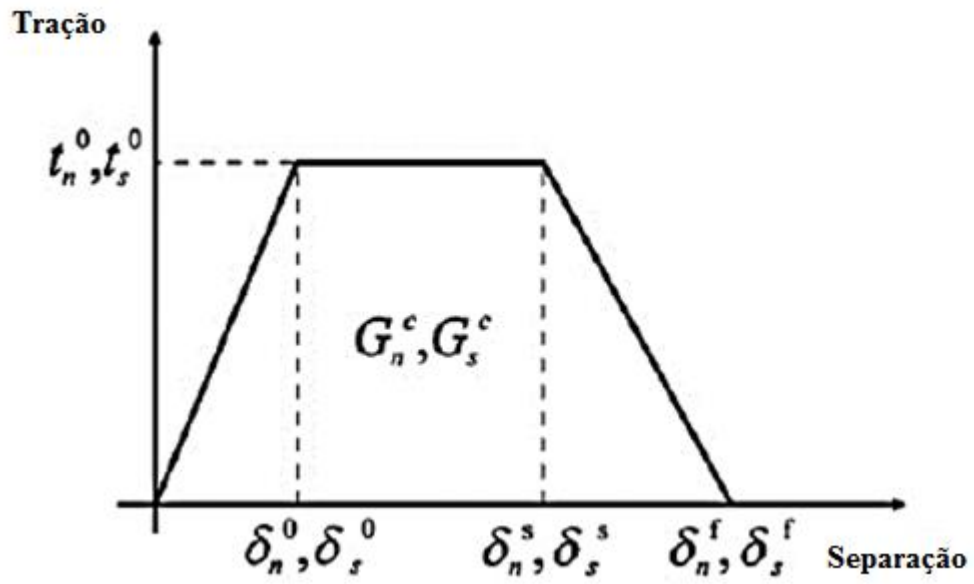
As leis coesivas triangular e exponencial, ilustradas nas Figuras 26 a e b respectivamente, são usadas especialmente para adesivos frágeis, enquanto que para adesivos dúcteis, ilustrada na Figura 26 c, o modelo de dano coesivo trapezoidal é utilizado.



a)



b)



c)

Figura 26: Ilustração das leis coesivas: a) Lei coesiva triangular; b) Lei coesiva exponencial; c) Lei coesiva trapezoidal [22].

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Atualmente, compósitos de fibras de carbono são cada vez mais utilizadas em combinação com outros tipos de materiais, principalmente metais, com o objetivo de reduzir peso sem comprometer a segurança, proporcionando uma excelente combinação de propriedades dos materiais. Para o sucesso deste tipo de junta colada é necessário a análise de sua integridade, realizada por meio de análises experimentais, numéricas e analíticas.

Nesta pesquisa, juntas coladas de sobreposição simples, utilizando substratos de laminados de fibra de carbono, HSS e Alumínio, foram submetidas a testes de cisalhamento a fim de prever seu comportamento frente à ruptura em comparação com juntas coladas com somente laminados de fibras de carbono como substrato. É importante entender como a eficiência da junta é afetada durante seu carregamento.

3.1 Materiais

3.1.1 Substratos

Os materiais de substratos aqui utilizados foram escolhidos com a finalidade de obter construções mais leves em comparação com juntas soldadas. Tais materiais serão descritos abaixo:

Aço de Alta Resistência Mecânica (HSS)

O aço de alta resistência mecânica ou (High Strength Steel) é uma liga caracterizada pela sua alta tensão de escoamento. Um aço HSS padrão possui uma tensão de escoamento entre 450 MPa e 600 MPa, enquanto aços de ultra alta resistência mecânica possuem tensões de escoamento de mais de 600 Mpa, e até mesmo chegando a mais de 1000MPa em alguns casos.

Para este estudo, foi utilizado o tipo de aço alta resistência mecânica (HSS). Sua escolha se deve ao fato de possuir baixa deformação e alta tensão de escoamento em

comparação a outras ligas. Suas propriedades mecânicas estão mencionadas na Tabela 3 abaixo. A espessura de HSS utilizada foi a de 2 mm.

Tabela 3: Propriedades do substrato de HSS [24].

Propriedades	Valor
Módulo de Young [GPa]	210
Tensão de Ruptura [MPa]	1300
Tensão de Escoamento [MPa]	1050
Alongamento [%]	14-17

Alumínio

O alumínio utilizado na presente pesquisa foi a liga 6082-T651. Esta é uma liga de alta resistência e de ótima resistência à fadiga. Sua utilização se encontra, em grande parte, nas indústrias automotivas, aeronáutica e naval.

As propriedades do alumínio utilizado para a junta estudada está mencionada na Tabela 4 abaixo:

Tabela 4: Propriedades do substrato de Alumínio [24].

Propriedade	Valor
Módulo de Young [GPa]	70
Tensão de Ruptura [MPa]	324
Tensão de Escoamento [MPa]	264
Alongamento [%]	21

Laminado de Fibra de Carbono (CFRP)

Os laminados de fibra de carbono, ou Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), foram manufacturados manualmente no laboratório da equipe Venturi de Aerodesign localizada no CEFET/RJ, utilizando camadas de manta de fibra de carbono 0° e 90°, coladas com o sistema de adesivo epóxi Araldite LY 5052 / Aradur 5052 e curadas à pressão, em temperatura ambiente, por meio de pesos distribuídos ao longo de sua área.

O processo de laminação da fibra de carbono foi realizado seguindo as seguintes etapas:

- Preparação da superfície de laminação, mesa e placa de pressão, com a colagem de fita plástica, impedindo o contato da mesa com o adesivo Araldite LY 5052 / Aradur 5052, conforme ilustrado na Figura 27;



Figura 27: Preparação da superfície para laminação.

- Corte da manta de fibra de carbono com orientação de fibras a 0° e 90° em retângulos de 300 x 150 mm contendo material suficiente para 5 amostras, conforme ilustrado na Figura 28;



Figura 28: Ilustração do corte da manta de fibra de carbono.

- Preparação do sistema de adesivo epóxi Araldite LY 5052 / Aradur 5052 com proporção de mistura de 100g de Araldite LY 5052 para 38g de Aradur 5052 conforme recomendado pela fabricante HUNTSMAN, conforme ilustrado na Figura 29;



Figura 29: Ilustração da medição de adesivo bi-componente epóxi.

- Empilhamento dos retângulos de manta de fibra de carbono, utilizando 7 camadas para cada placa laminada afim de se obter a espessura desejada, com mãos de adesivo Araldite e Aradur em cada camada, conforme ilustrado na Figura 30;



Figura 30: Colagem das camadas de manta de fibra de carbono.

- Posicionamento da placa de pressão em conjunto com pesos para melhor distribuição da pressão ao longo da área das mantas de fibras de carbono coladas; Após o posicionamento da placa de pressão, o laminado foi submetido ao processo de cura à temperatura ambiente;
- Após o processo de cura, a placa laminada foi cortada por meio de uma máquina de corte manual presa em suporte móvel montado de forma manual, conforme ilustrado na Figura 31;



Figura 31: Ilustração da máquina de corte manual.

Desta maneira, foram obtidos 20 amostras de laminado de fibras de carbono. As propriedades do CFRP utilizadas nesta pesquisa se encontram na Tabela 6 [11]. Abaixo, na Figura 32, encontram-se 10 das 20 amostras fabricadas para este estudo.

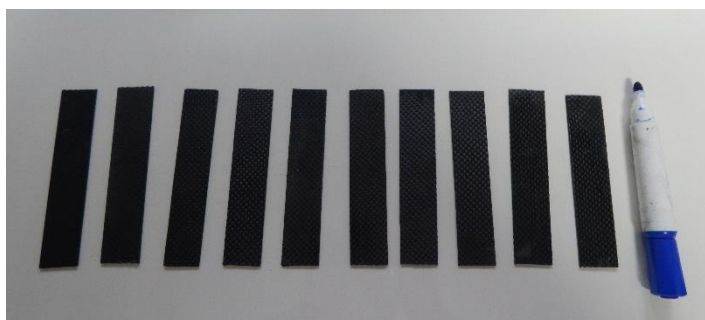


Figura 32: Amostras de CFRP fabricadas.

As propriedades do substrato de laminado de fibra de carbono se encontram na tabela 5 abaixo:

Tabela 5: Propriedades ortotrópicas do substrato de Fibra de Carbono [11].

Propriedade	Valor
Módulo de Young na direção 1 [GPa]	109
Módulo de Young na direção 2 [GPa]	8,82
Módulo de Young na direção 3 [GPa]	8,82
Módulo de Cisalhamento na direção 1 [GPa]	4,315
Módulo de Cisalhamento na direção 2 [GPa]	4,315
Módulo de Cisalhamento na direção 3 [GPa]	3,2
Coefficiente de Poisson 1-2	0,342
Coefficiente de Poisson 2-3	0,342
Coefficiente de Poisson 3-3	0,38

3.1.2 Adesivo

O adesivo usado neste estudo, BETAMATE 2096, é um adesivo epoxi bi-componente oferecido pela empresa DOW Brasil, curado por reação química entre seus dois componentes, especialmente desenvolvido para reparos e construção de veículos.

BETAMATE 2096 possui excelente adesão à aços automotivos incluindo fibras de carbono, aços revestidos e alumínio pré-tratado, além de alta durabilidade e coesão, proteção contra corrosão devido a sua capacidade selante.

De acordo com a especificação do fabricante, o adesivo é curado completamente após 48 horas em temperatura ambiente. Porém, para obter a resistência máxima da junta, é necessária uma semana de processo de cura em temperatura ambiente. As propriedades do adesivo utilizado foram obtidas por ensaio de tração, seus resultados seguem conforme a Figura 33 e Tabela 6. Para maiores informações a respeito do adesivo BETAMATE 2096, a folha de dados técnicos do adesivo se encontra em anexo neste trabalho.

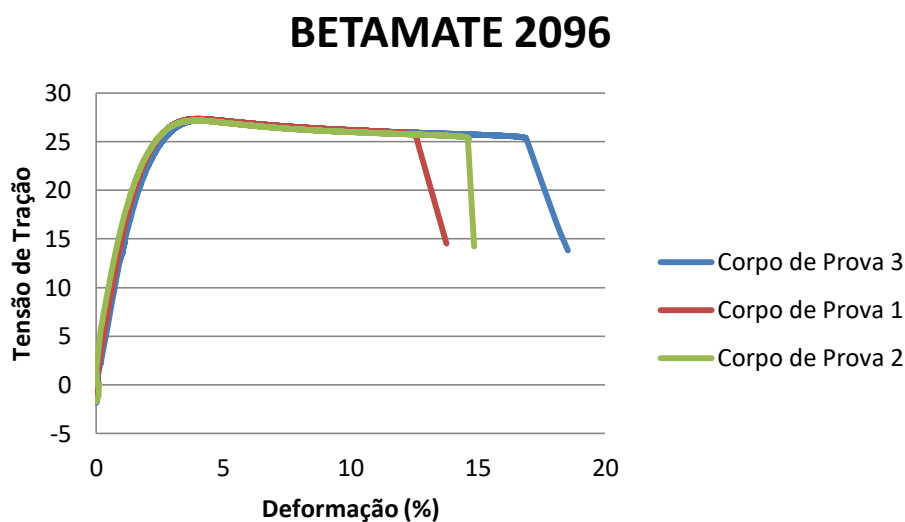


Figura 33: Gráfico Tensão de Tração vs Deformação para as 3 amostras de Adesivo BETAMATE 2096

Tabela 6: Propriedades do adesivo BETAMATE 2096.

Propriedade	Valor
Módulo de Young [MPa]	1700
Tensão de Ruptura [MPa]	29
Resistência a Descascamento [N/mm]	6
Resistência ao Cisalhamento [MPa]	18
Alongamento [%]	9

3.2 Geometria da Junta

Este presente trabalho possui como objetivo principal a análise de juntas coladas multimateriais em comparação com juntas coladas de compósito de fibras de carbono para aplicações em indústrias automobilística, utilizando não somente laminados de fibra de carbono assim como também de outros materiais como HSS e alumínio.

Conseqüentemente, as seguintes juntas coladas foram estudadas: CFRP/CFRP, CFRP/HSS, CFRP/Alumínio.

3.2.1 CFRP / HSS

A junta colada de CFRP e HSS é caracterizada pela junção de dois materiais de alta resistência mecânica com espessura de 2 mm. O comprimento de sobreposição utilizado é de 25 mm. A espessura do adesivo utilizado é de 0,2 mm.

A geometria da amostra e suas dimensões estão ilustradas na Figura 34.

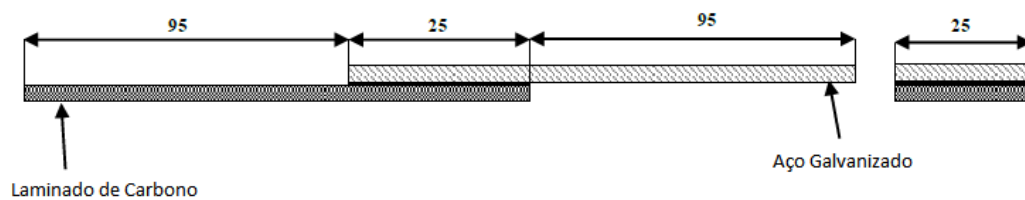


Figura 34: Ilustração da geometria da junta de sobreposição simples de CFRP/HSS.

3.2.2 CFRP / CFRP

A junta colada de laminados de carbono possui, assim como a amostra anterior, espessura de 2 mm. A geometria da amostra e suas dimensões estão mais bem ilustradas na Figura 35. O comprimento de sobreposição utilizado é de 25 mm e a espessura do adesivo utilizado é de 0,2 mm.

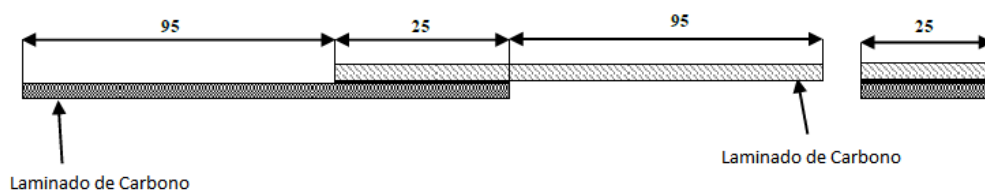


Figura 35: Ilustração da geometria da junta de sobreposição simples de CFRP/CFRP.

3.2.3 CFRP / Alumínio

A junta colada de laminado de carbono e alumínio possui, assim como a amostra anterior, espessura de 2 mm. Substratos de alumínio possuem tensão de escoamento menor que a do substrato de HSS utilizado nas outras amostras. A espessura do adesivo utilizado é de 0,2 mm.

A geometria da amostra e suas dimensões estão melhor ilustradas na Figura 36.

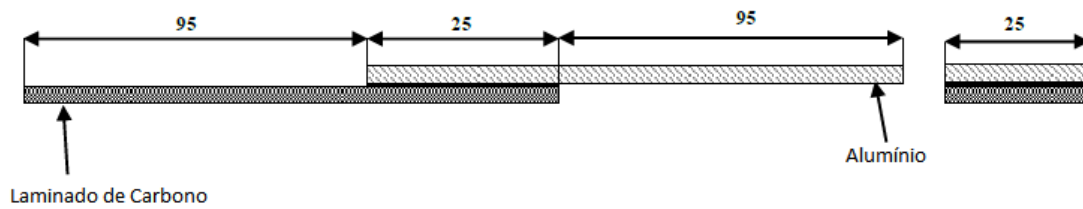


Figura 36: Ilustração da geometria da junta de sobreposição simples de CFRP/Alumínio.

Capítulo 4

Análise Analítica

Para a análise analítica das amostras, é necessário calcular a força necessária da máquina de tração para ultrapassar a tensão de ruptura do adesivo utilizado. Desta forma, a força necessária está especificada de acordo com a seguinte fórmula da tensão cisalhante:

$$\tau_a = \frac{P}{A_{colada}} = \frac{P}{L*b} \quad [24]$$

Em que,

τ_a é a tensão de ruptura do adesivo utilizado [MPa];

P é a força necessária para a ruptura do adesivo utilizado [N];

L é o comprimento de sobreposição da amostra [mm];

b é a largura da amostra [mm];

Com a substituição dos valores tem-se:

$$29 = \frac{P}{25 * 25}$$

$$P = 18125N$$

Portanto, é necessário uma máquina de ensaio de tração que tenha capacidade acima de 18,125 kN de força exercida sobre as amostras, a fim de causar ruptura no adesivo.

A tensão a qual os substratos estão submetidos para a ruptura do adesivo está especificada conforme a fórmula abaixo:

$$\tau_{substrato} = \frac{P}{A_{transversal}} = \frac{P}{b*e} \quad [24]$$

Em que,

$\tau_{substrato}$ é a tensão no substrato [MPa];

P é a força necessária para a ruptura do adesivo utilizado [N];

e é a espessura da amostra [mm];

b é a largura da amostra [mm];

Com a substituição dos valores tem-se:

$$\tau_{substrato} = \frac{18125}{25 * 2} = 362,5 MPa$$

Desta forma, os substratos de alumínio, substratos de HSS e substratos de laminados de fibra de carbono estão submetidos, para a ruptura do adesivo, a uma tensão de 362,5 MPa. Dentre estes substratos, o substrato de alumínio é o único que possui tensão de escoamento menor (o alumínio possui tensão de escoamento de 264 Mpa), e, portanto, escoará antes da ruptura do adesivo.

Capítulo 5

Análise Numérica

A análise numérica efetuada tem como finalidade a predição do comportamento das amostras perante a falha, utilizando análise detalhada por elementos finitos, com a obtenção dos gráficos de distribuição de tensões e predição de resistência mecânica baseada no modelo de zona coesiva, melhor detalhada posteriormente.

5.1 Modelo Numérico

Para a execução desta análise numérica, foi utilizado o software ABAQUS (Dessault Systemes Providence – USA), viabilizando o uso de seu modelo de zona coesiva.

A geometria das amostras foram modeladas com os elementos sólidos quadrilátero “plane strain” de 4 nós (CPE4R: Um elemento plano quadrilátero bilinear de deformações de 4 nós). Os elementos COH2D4 (Um elemento coesivo bi-dimensional de 4 nós) foram utilizados para modelar a camada adesiva.

5.1.1 Geometria e propriedades de material

A geometria para a amostra de junta de sobreposição simples utilizada está apresentada conforme a Figura 37 abaixo:

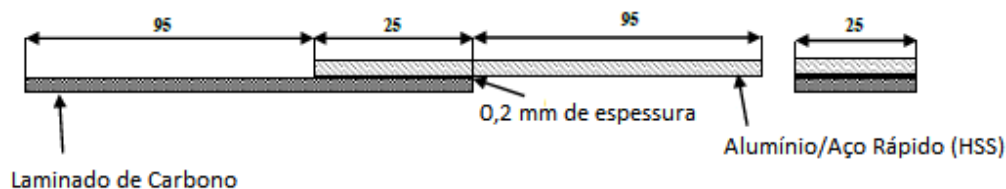


Figura 37: Ilustração da geometria da junta de sobreposição simples utilizada na análise numérica.

As propriedades dos substratos de CFRP, HSS e alumínio, assim como as do adesivo BETAMATE 2096 foram previamente apresentadas no capítulo 3.1.

5.1.2 Condições de Contorno

O objetivo desta simulação é comparar seus resultados com os resultados da análise experimental realizada na seção anterior, desta forma, é necessário que as condições de contorno sejam se não iguais, muito similares às condições utilizadas na análise experimental. As juntas foram fixadas em uma das extremidades enquanto a outra extremidade foi submetida a um deslocamento de tensão contínua com restrições de movimento transversal. As condições de contorno estão exemplificadas conforme a Figura 38a e 38b abaixo:

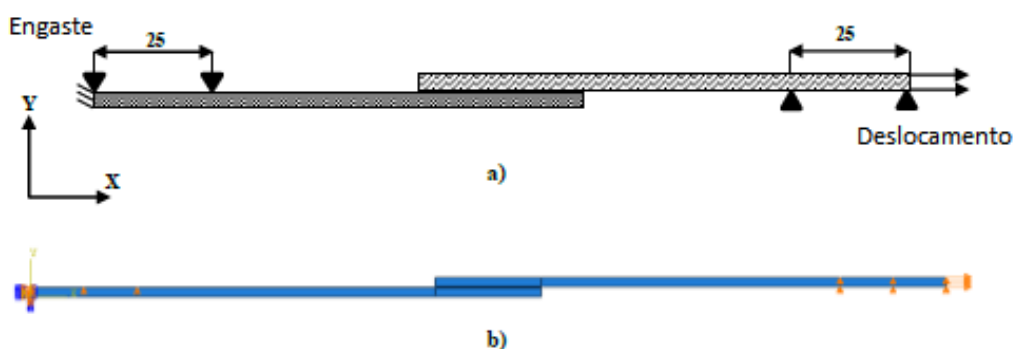


Figura 38: Ilustração das condições de contorno utilizadas na análise numérica para todas as juntas analisadas.

5.1.3 Malha

A Malha utilizada para o desenvolvimento desta análise de elementos finitos foi realizada considerando refinamento padrão. Condições simétricas não foram consideradas. A presente malha é formada por elementos CPE4R que, já explicitado anteriormente, são elementos quadriláteros “plane strain” bilineares de quatro nós.

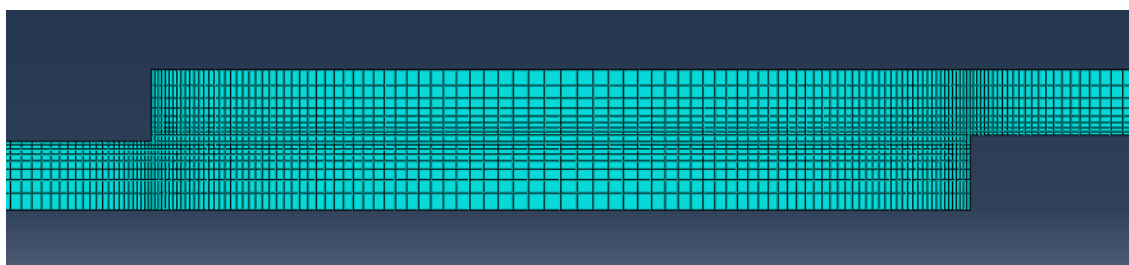


Figura 39: Ilustração da malha utilizada para todas as juntas analisadas.

Os elementos coesivos foram utilizados na camada de adesivo entre os dois substratos. Tal camada detentora de elementos quadriláteros bilineares do tipo “plain strain” melhor

observados na Figura 39. Os elementos foram refinados para um comprimento de 0,1 mm na extremidade da ligação e foi aumentado de forma gradual até o comprimento de 0,5 mm no meio da sobreposição do adesivo.

Para confirmar a utilização desta malha neste estudo numérico, uma análise de convergência de malha foi realizada a fim de garantir a precisão dos resultados encontrados. Para essa, a tensão de cisalhamento máxima foi calculada para cada tamanho de malha utilizado. O gráfico da Figura 40 ilustra a análise realizada.

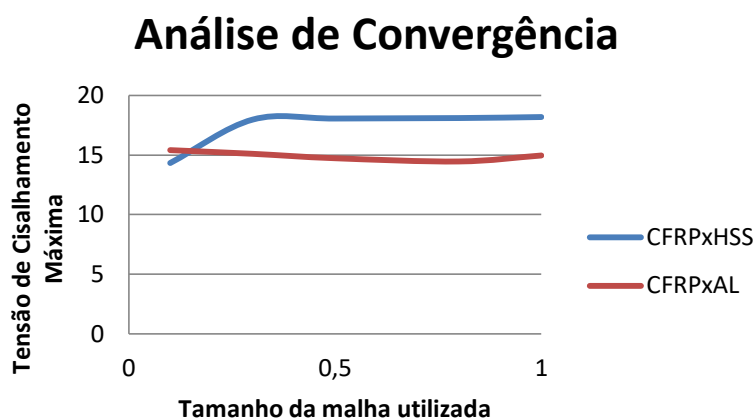


Figura 40: Gráfico de análise de convergência: Tensão de Cisalhamento Máxima vs Tamanho de Malha.

Como observado acima, os valores de tensão de cisalhamento da junta CFRPxHSS convergem para o valor 18,12 MPa, enquanto os valores de tensão de cisalhamento da junta CFRPxAL pouco variam, convergindo para 14,96 MPa.

5.2 Modelo de Zona Coesiva

Atualmente, os modelos de zona coesiva são largamente utilizados para simular processos de fratura de diferentes materiais. A ideia de um modelo de zona coesiva é que a zona de processo de fratura possa ser descrita por uma lei de separação e tração que relacione as tensões e deslocamentos relativos entre as faces das fraturas, e com isso, simulando a degradação gradual das propriedades dos materiais simulados.

Consequentemente, tem-se como resultado, um segundo parâmetro de fratura, a força de coesão. Esta é introduzida juntamente com a resistência à fratura. O formato desta lei de

separação e tração pode também ser ajustada conforme o comportamento do material a ser simulado. O único modelo de zona coesiva implementado no programa ABAQUS, e utilizado nesta pesquisa, utiliza uma curva bilinear conforme a curva apresentada na Figura 41 abaixo.

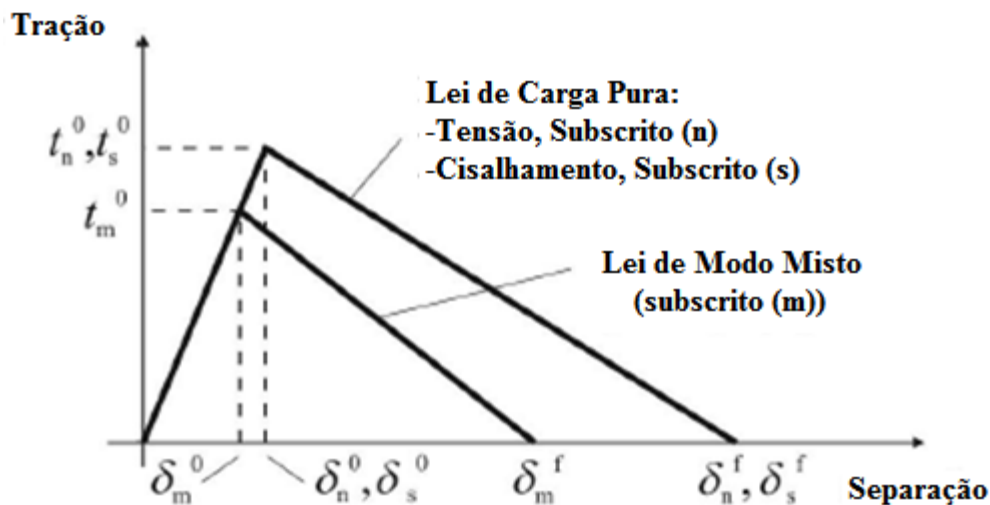


Figura 41: Modelo de zona coesiva bilinear.

5.3 Análise de Tensões

A análise de tensões é fundamental para a análise da simulação. Através da análise de tensões é possível verificar a região sob maior carregamento e onde possivelmente ocorrerá a falha.

A análise de tensões de cisalhamento (σ_y) e de tensões de arrancamento (τ_{xy}) foi realizada com um adesivo de espessura média de 0,2 mm, permitindo discussões a cerca dos resultados obtidos na simulação.

Com a finalidade de plotar os gráficos de tensão de cisalhamento e de arrancamento, a mesma configuração de comprimento de sobreposição foi utilizada. Um procedimento de normalização foi realizado para a plotagem de gráficos: Tensão de Cisalhamento/Tensão de arrancamento vs Deformação.

5.3.1 Tensões de Cisalhamento

De maneira geral, tensões de cisalhamento possuem valores consideravelmente menores que tensões de arrancamento, exceto na extremidade da área colada. O formato das

tensões de cisalhamento em juntas coladas se deve principalmente a assimetria do carregamento, permitindo uma separação nas extremidades sobrepostas e compressão no meio das camadas [25].

CFRP /Alumínio

A distribuição de tensão de cisalhamento está representada na Figura 42 abaixo. As curvas representam amostras de juntas coladas de CFRP/CFRP, CFRP/Alumínio, Alumínio/Alumínio com 25 mm de comprimento de sobreposição para todas as amostras.

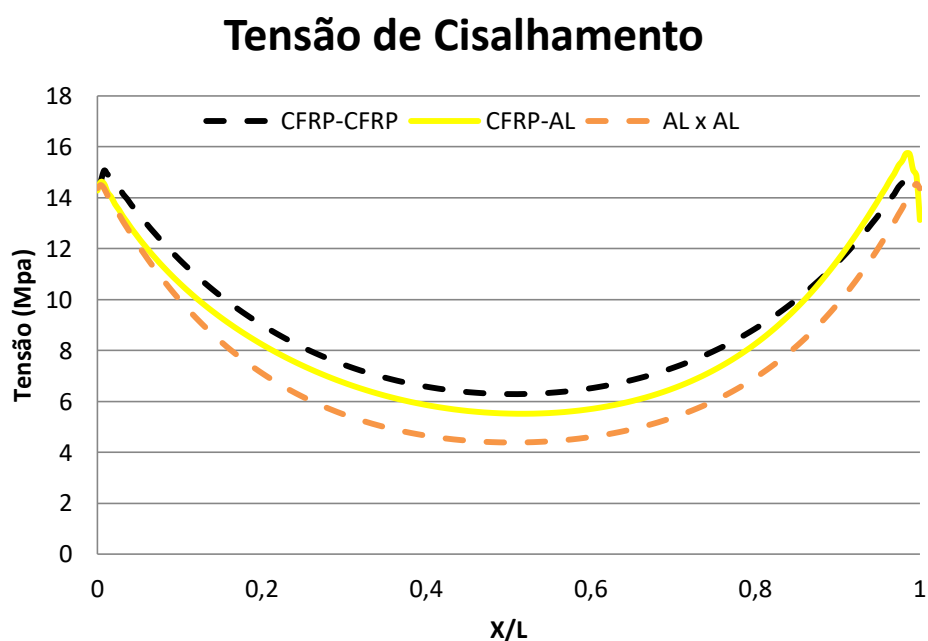
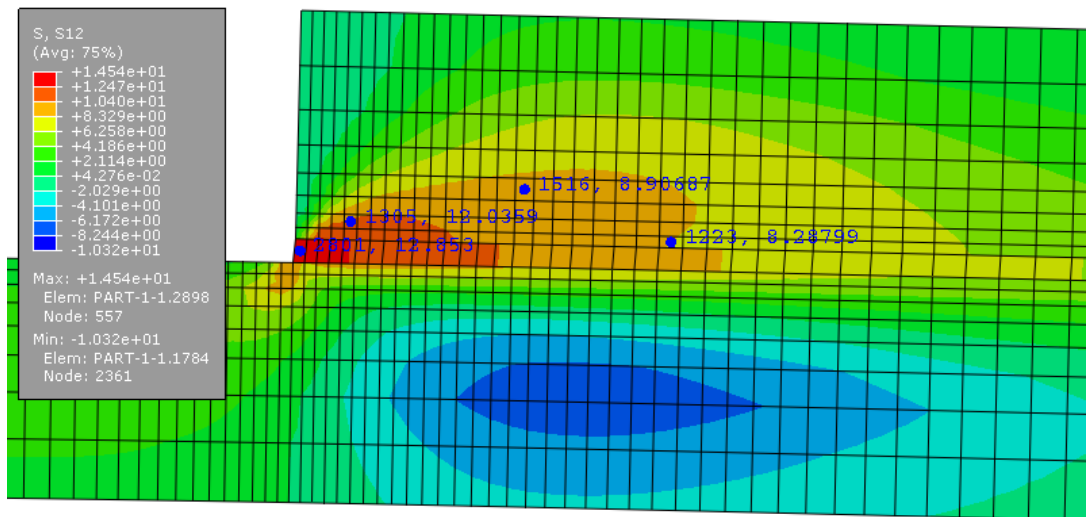


Figura 42: Gráfico tensão de cisalhamento x deformação para juntas CFRP-AL, CFRP-CFRP e AL-AL.

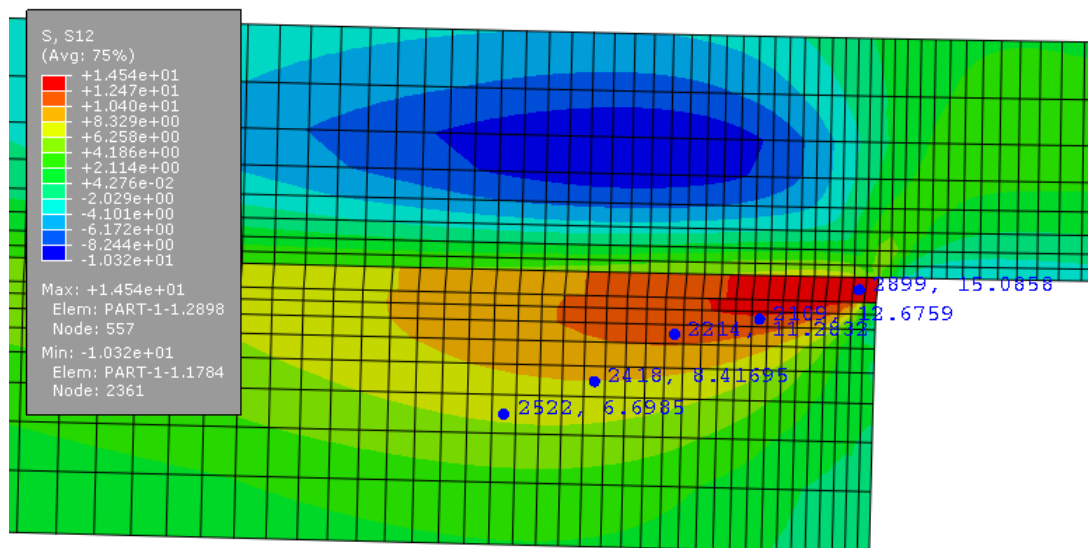
Pelo gráfico acima, observa-se a distribuição não uniforme da junta de CFRP/Alumínio, possuindo o maior valor de tensão na extremidade do substrato de alumínio.

Abaixo, pode-se observar detalhadamente a região das extremidades de ambos os substratos, a extremidade do substrato de CFRP (Figura 43a) e a extremidade do substrato de Alumínio (Figura 43b). Os pontos em azul descrevem a localização do nódulo seguido do valor da tensão de cisalhamento, ambas em azul. As maiores tensões estão presentes na

extremidade do substrato de Alumínio, de acordo com o gráfico de Tensão de Cisalhamento x Deformação na Figura 42 anterior.



a)



b)

Figura 43: Distribuição de tensões de cisalhamento ao longo da extremidade do comprimento de sobreposição: a) extremidade do substrato de CFRP; b) extremidade do substrato de Al.

Laminados de Carbono/HSS

A distribuição de tensão de cisalhamento está representada na Figura 44 abaixo. As curvas representam amostras de juntas coladas de CFRP/CFRP, CFRP/HSS, HSS/HSS com 25 mm de comprimento de sobreposição para todas as amostras.

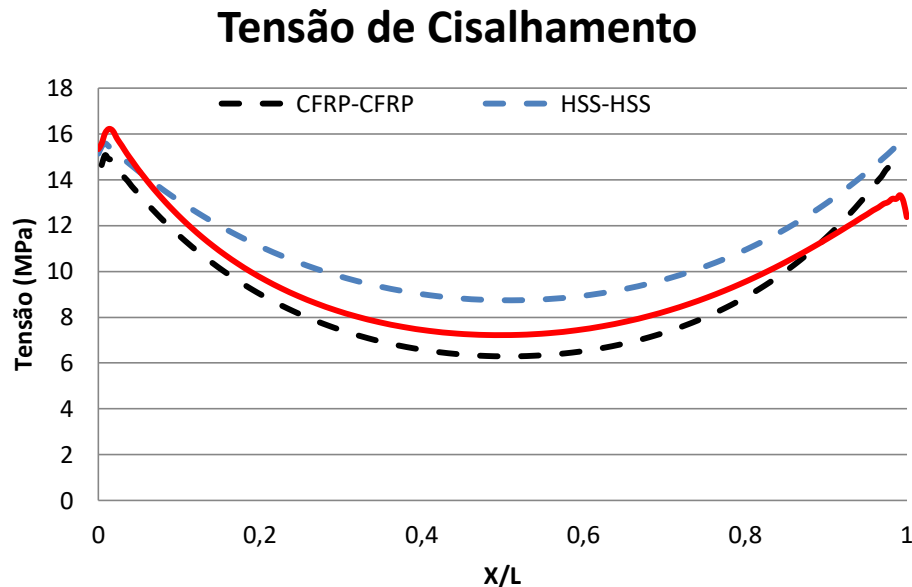
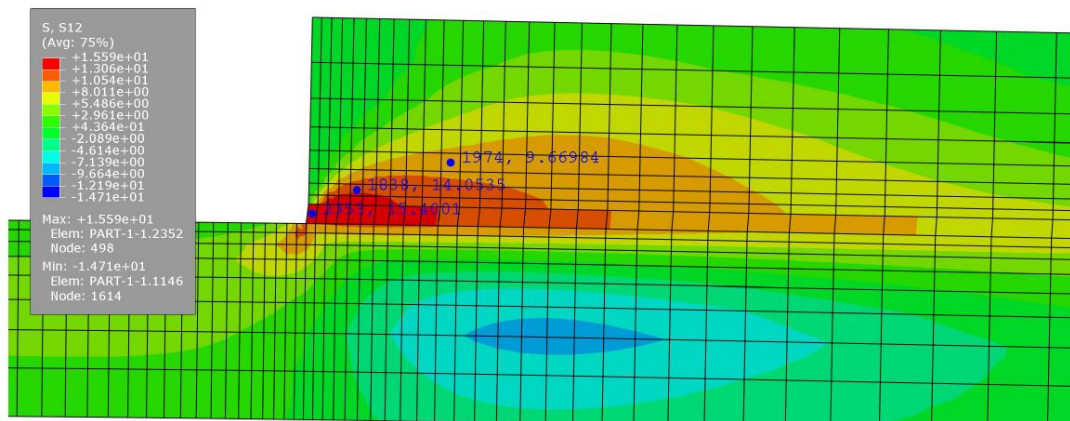


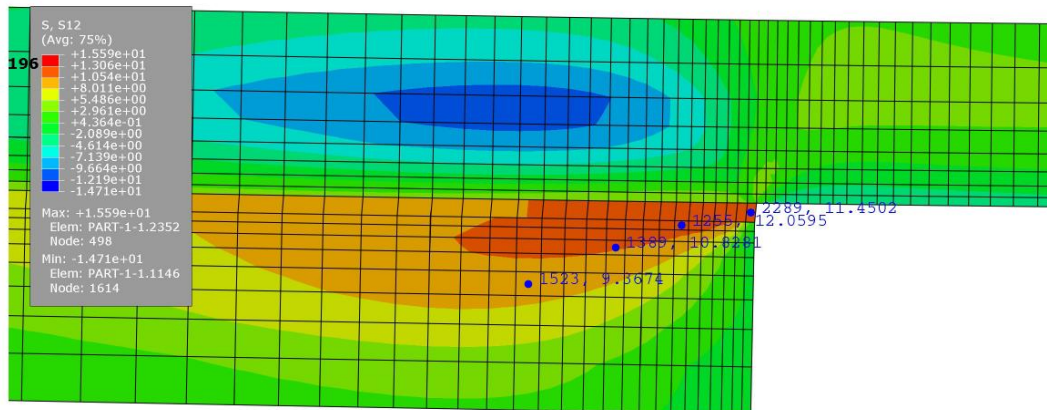
Figura 44: Gráfico tensão de cisalhamento x deformação para juntas CFRP-CFRP, CFRP-HSS e HSS-HSS.

Pelo gráfico acima, observa-se a distribuição não uniforme da junta de CFRP/HSS, possuindo o maior valor de tensão na extremidade do substrato de CFRP. O maior valor de tensão de cisalhamento se encontra também na junta CFRP/Alumínio.

Abaixo, pode-se observar detalhadamente a região das extremidades de ambos os substratos, a extremidade do substrato de CFRP (Figura 45a) e a extremidade do substrato de HSS (Figura 45b). Os pontos em azul seguem a mesma descrição utilizada anteriormente. As maiores tensões estão presentes na extremidade do substrato de CFRP, de acordo com o gráfico de Tensão de Cisalhamento x Deformação da Figura 44.



a)



b)

Figura 45: Distribuição de tensões de cisalhamento ao longo da extremidade do comprimento de sobreposição: a) extremidade do substrato de CFRP; b) extremidade do substrato de HSS.

5.3.2 Tensões de Arrancamento

Tensões de arrancamento são responsáveis por uma redução de resistência mecânica significativa em juntas coladas [21]. A distribuição de tensões de arrancamento possuem, de acordo com a literatura, baixo carregamento no meio da região colada e um aumento destas tensões de modo gradual até as extremidades da junta colada. Tal comportamento é explicado devido à diferença de deformação de cada um dos substratos ao longo da sobreposição, a partir da extremidade livre em direção à outra extremidade [25]. Na região central da sobreposição esses efeitos são cancelados, com tensões de arrancamento sendo desenvolvidos somente pela tensão de arrancamento da amostra.

Com a utilização de adesivo dúctil, como o adesivo utilizado nesta pesquisa, há a redistribuição destas tensões nestas regiões enquanto a região interna da sobreposição é gradativamente carregada, aumentando a resistência mecânica da junta.

CFRP / Alumínio

Na Figura 46 abaixo, encontra-se a distribuição de tensões de arrancamento em função do comprimento de sobreposição normalizado. A distribuição de tensões entre juntas Alumínio/Alumínio e CFRP/CFRP foram utilizadas como comparação. Todas as amostras possuem 25 mm de comprimento de sobreposição.

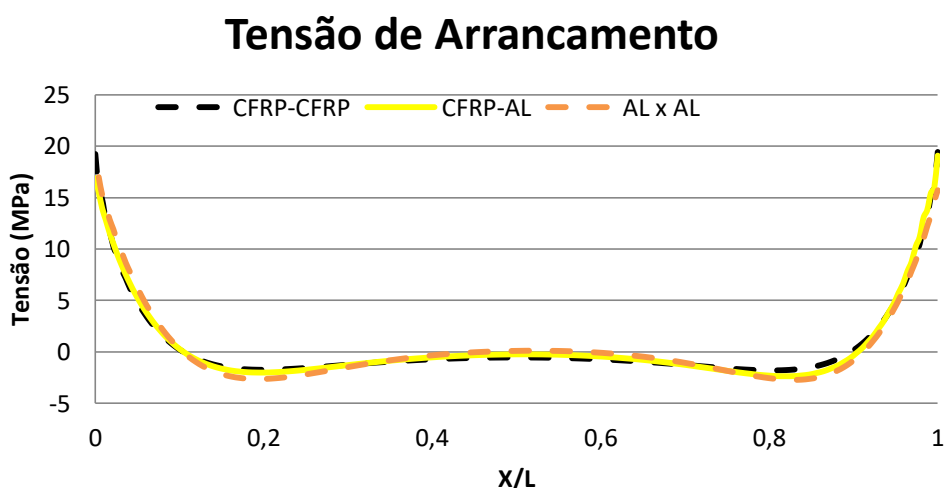
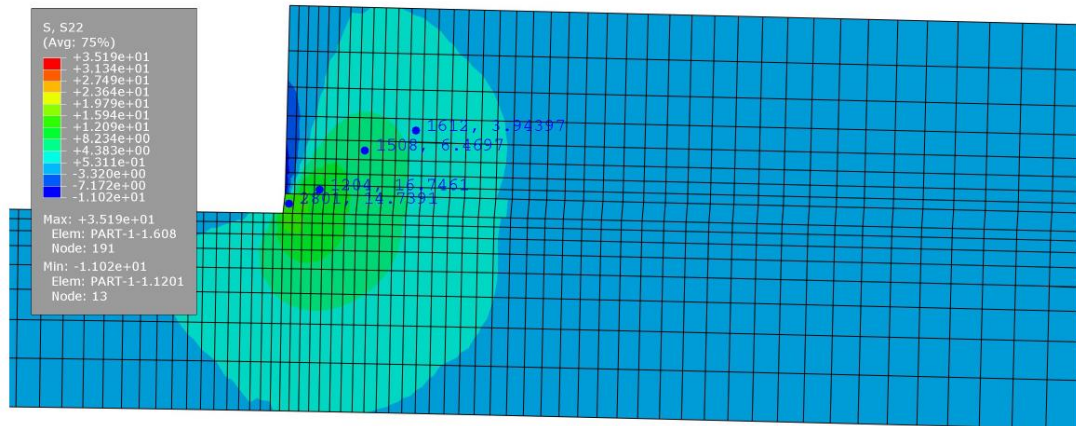


Figura 46: Gráfico tensão de arrancamento x deformação para juntas CFRP-CFRP, CFRP-AL e AL-AL.

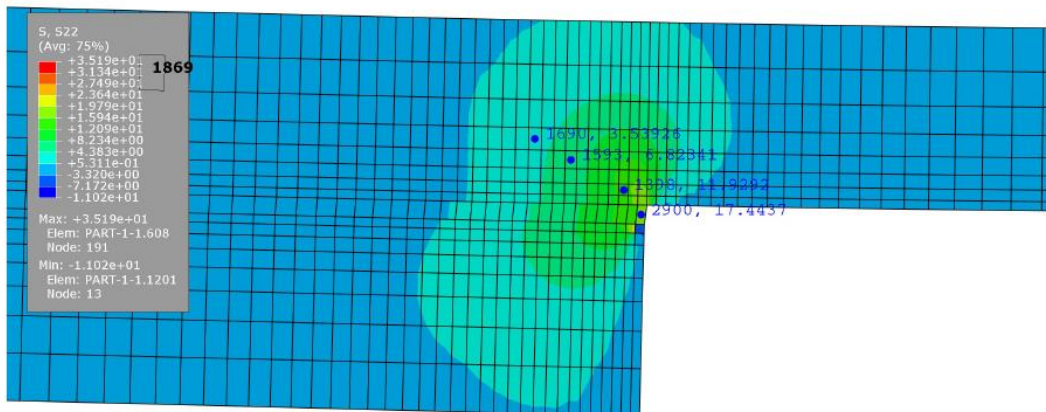
No gráfico acima, a tensão de arrancamento no adesivo possui um valor máximo na junta CFRP/Alumínio, localizado na extremidade do substrato de Alumínio. A seguir, será mostrado que ocorre a deformação plástica do alumínio na extremidade da sobreposição.

Abaixo, pode-se observar detalhadamente a região das extremidades de ambos os substratos, a extremidade do substrato de CFRP (Figura 47a) e a extremidade do substrato de Alumínio (Figura 47b). Os pontos em azul descrevem a localização do nódulo seguido do valor da tensão de arrancamento, ambas em azul. As maiores tensões estão presentes na

extremidade do substrato de Alumínio, de acordo com o gráfico Tensão de Arrancamento x Deformação da Figura 46.



a)



b)

Figura 47: Distribuição de tensões de arrancamento ao longo da extremidade do comprimento de sobreposição: a) extremidade do substrato de CFRP; b) extremidade do substrato de Alumínio.

CFRP / HSS

Na Figura 48 abaixo, encontra-se a distribuição de tensões de arrancamento em função do comprimento de sobreposição normalizado. A distribuição de tensões entre juntas HSS/HSS e CFRP/CFRP foram utilizadas como comparação.

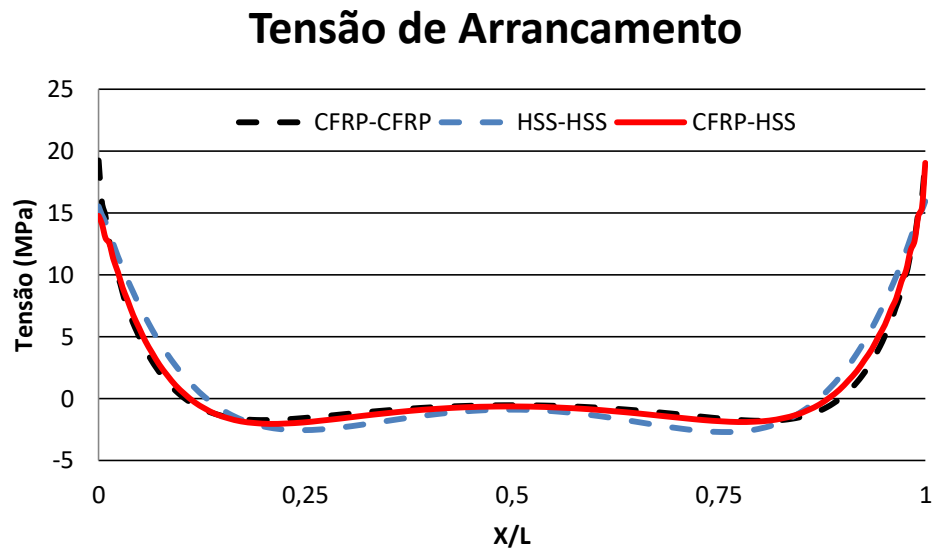
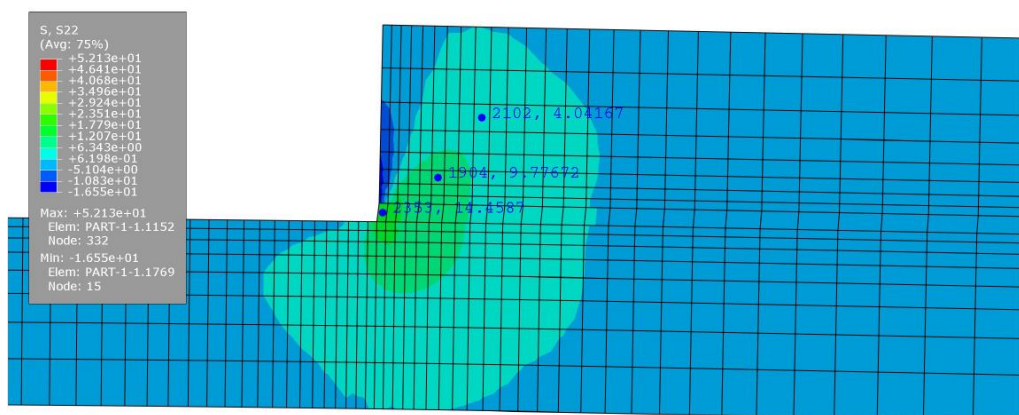


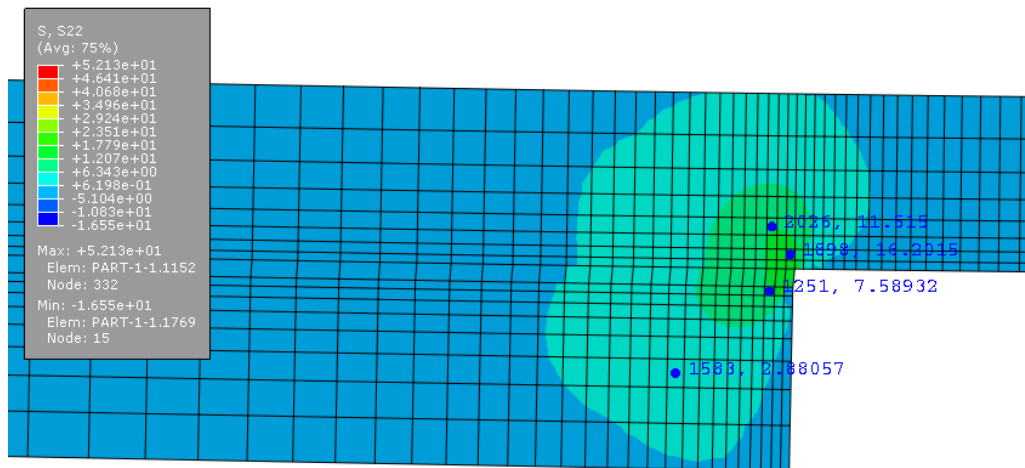
Figura 48: Gráfico tensão de arrancamento x deformação para juntas CFRP-CFRP, CFRP-HSS e HSS-HSS.

Na Figura 48, a tensão de arrancamento no adesivo possui um valor máximo na junta CFRP / HSS, localizado na extremidade do substrato de HSS.

Abaixo, pode-se observar detalhadamente a região das extremidades de ambos os substratos, a extremidade do substrato de CFRP (Figura 49a) e a extremidade do substrato de HSS (Figura 49b). Os pontos em azul descrevem a localização do nódulo seguido do valor da tensão de arrancamento, ambas em azul. As maiores tensões estão presentes na extremidade do substrato de HSS.



a)



b)

Figura 49: Distribuição de tensões de arrancamento ao longo da extremidade do comprimento de sobreposição: a) extremidade do substrato de CFRP; b) extremidade do substrato de HSS.

5.4 Análises da Resistência da Junta

Nesta etapa, foram obtidos resultados através de método de elementos finitos em termos de carga de ruptura. Foram utilizados os mesmos modelos de junta previamente descritos. Todas as juntas analisadas são modelos 2D e seguem os mesmos parâmetros, condições de contorno e lei coesiva utilizados no capítulo anterior.

CFRP / Alumínio

O substrato de alumínio de espessura de 2 mm foi escolhido para se obter uma junta colada de sobreposição simples geometricamente balanceada. As figuras abaixo demonstram a distribuição de tensão e de deformação na ruptura de uma junta colada multimaterial.

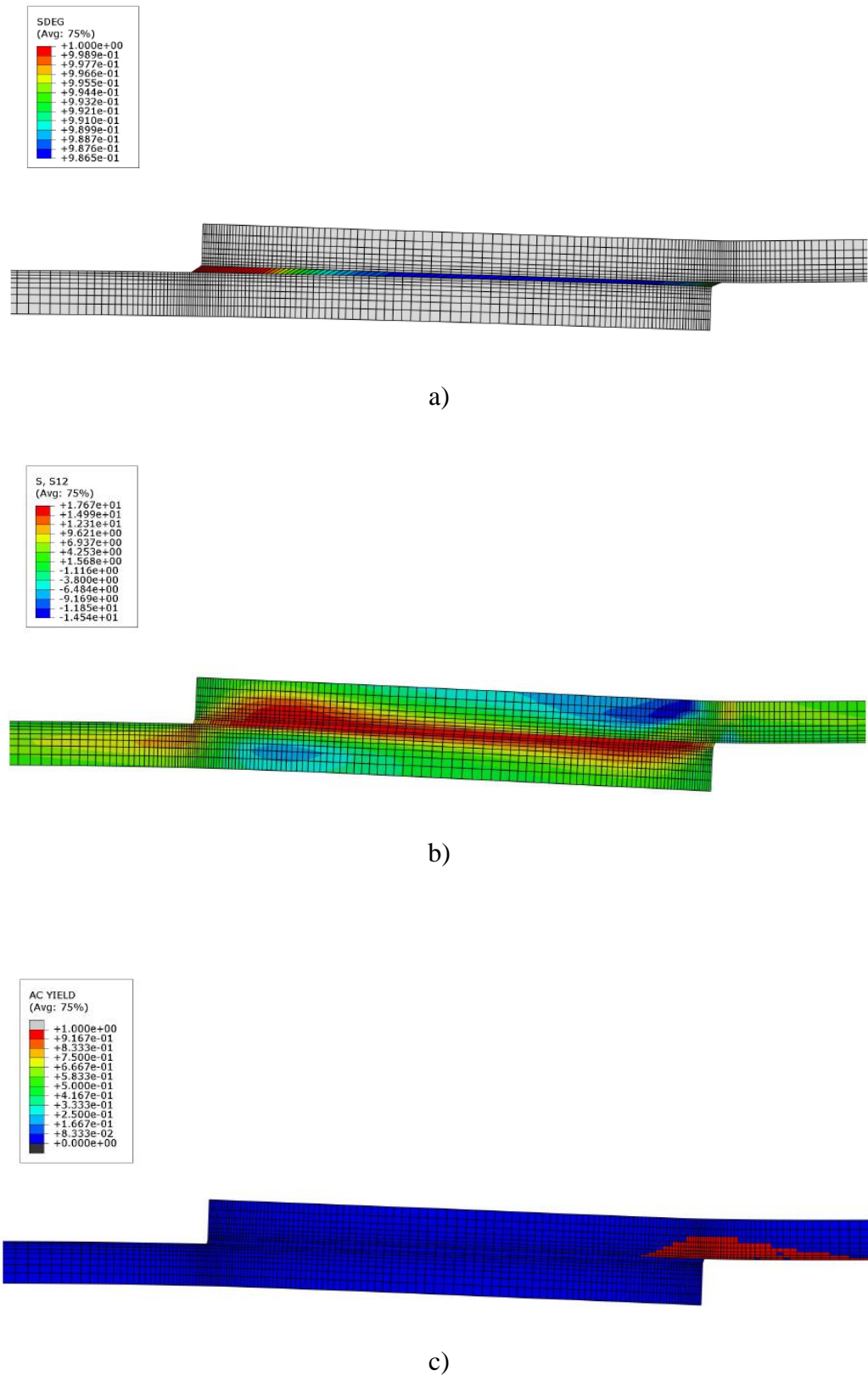


Figura 50: Resultado da análise numérica para a junta CFRP-AL: a) visualização da degradação da camada adesiva; b) distribuição da tensão de cisalhamento ao longo do comprimento de sobreposição; c) ilustração da deformação plástica do substrato de alumínio;

Na Figura 50a acima, pode-se verificar a degradação da camada adesiva, iniciada a partir das extremidades do substratos. Na Figura 50b, pode-se observar a distribuição de tensões de cisalhamento máxima do adesivo. Na Figura 50c, é observada deformação plástica (AC YIELD = 1) no substrato de Alumínio antes da ruptura do adesivo. Na Figura 50d, pode-se verificar a distribuição de deformações ao longo da junta de sobreposição simples, a deformação concentra-se no substrato de alumínio. Abaixo, na Figura 51, segue o gráfico Força x Deformação para a junta CFRP/Al.

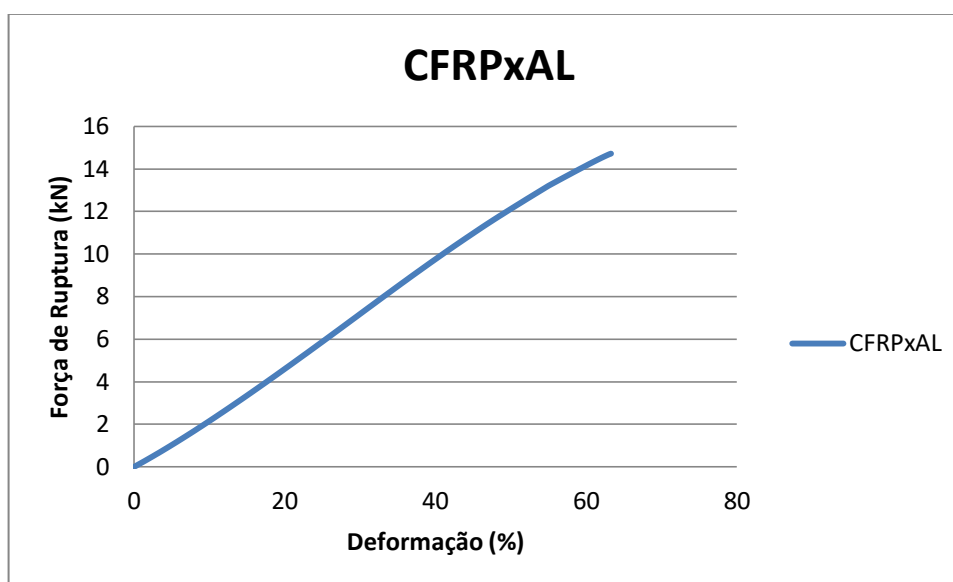
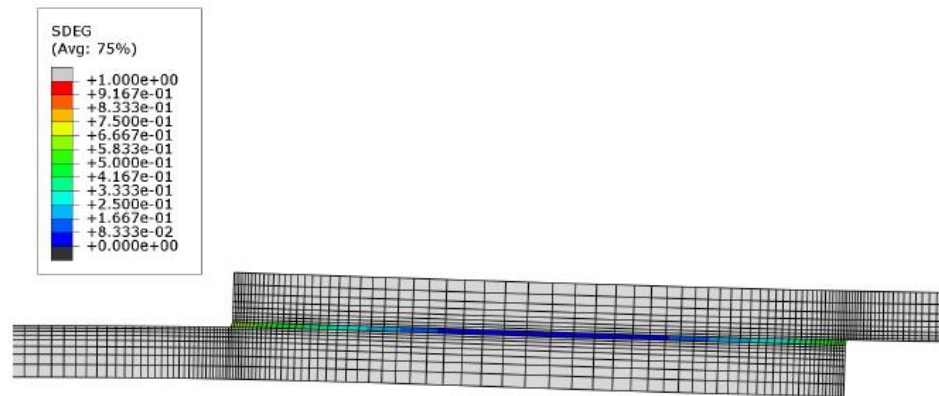


Figura 51: Gráfico de Força x deformação para a junta de CFRP-AL.

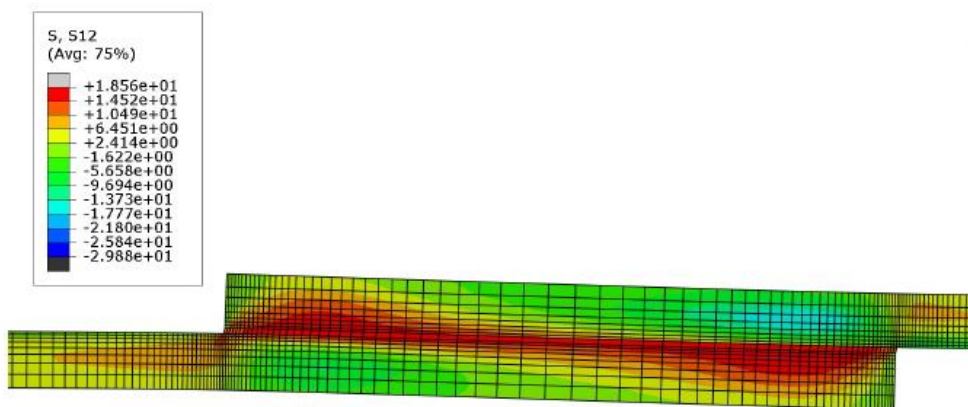
Através do gráfico da Figura 51 acima, é possível observar a força necessária para a ruptura do adesivo, 15,17 kN, e sua deformação máxima de 60 mm.

CFRP/HSS

O substrato de HSS de espessura de 2 mm foi escolhido para se obter uma junta colada de sobreposição simples geometricamente balanceada. As Figuras 52a e 52b abaixo demonstram a degradação e a distribuição de tensões na ruptura de uma junta colada multimaterial.



a)



b)

Figura 52: Resultado da análise numérica para junta de CFRP-HSS: a) degradação da camada adesiva ; b) distribuição de tensões de cisalhamento;

É observado, através da Figura 52a e 52b, que a distribuição de tensões de cisalhamento e a degradação da camada de adesivo tende a ser simétrica. Para a Figura 52b, que demonstra a tensão de cisalhamento máxima do adesivo. Não há deformações plásticas em nenhum dos dois substratos avaliados. Abaixo, na Figura 53, segue o gráfico Força x Deformação para a junta CFRP x HSS. Através do gráfico da Figura 53 abaixo, é possível observar a força necessária para a ruptura do adesivo, 19,3 kN, e sua deformação máxima de 30 mm.

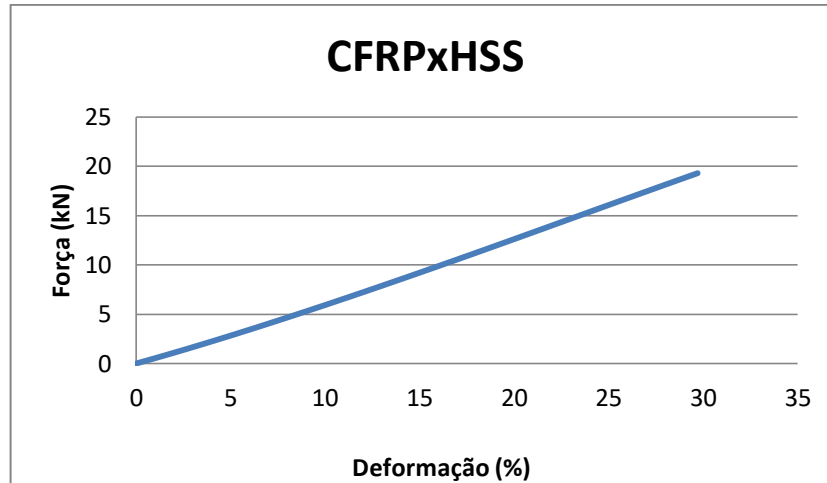


Figura 53: Gráfico de Força x deformação para a junta de CFRP-HSS.

5.5 Conclusões da Análise Numérica

Os resultados obtidos por meio da análise de elementos finitos para todas as amostras foram descritos na seção anterior. Nesta seção, os resultados são comentados e avaliados.

Primeiramente, foi realizada uma comparação entre as previsões de resultado da análise numérica e os resultados da análise analítica. A Tabela 7 abaixo relaciona os resultados além de expor o erro percentual da análise por elementos finitos.

Tabela 7: Comparação de valores de força de ruptura obtidos por análise analítica e numérica.

Tipo de Amostra	Valores Numéricos (kN)	Valores Analíticos (kN)	Erro Percentual de Ruptura
CFRPxHSS	19,3	18,12	6,11%
CFRPxAL	15,17	18,12	16,28%
CFRPxCFRP	19,43	18,12	6,74%
ALxAL	18,32	18,12	1,09%
HSSxHSS	19,4	18,12	6,60%

De acordo com a tabela acima, o erro percentual máximo alcançado permanece abaixo de 20%, um valor de erro percentual adequado para uma análise numérica, confirmando a precisão dos resultados obtidos.

Para as amostras de CFRP/AL, foi observado que as maiores tensões de cisalhamento e de arrancamento estão concentradas na extremidade do comprimento de sobreposição do substrato de alumínio. Isso ocorre devido a menor rigidez do substrato de alumínio em comparação com o substrato de CFRP, tanto na direção da tensão de cisalhamento (direção de aplicação da força de cisalhamento), quanto na direção da tensão de arrancamento (perpendicular à direção de aplicação da força de cisalhamento). Tal pequena rigidez ocasiona maiores deformações no substrato de alumínio, e por consequência, maior concentração de tensões no mesmo substrato.

Para as amostras de CFRP/HSS, foi observado que as maiores tensões de cisalhamento estão concentradas na extremidade do comprimento de sobreposição do substrato de CFRP. Isso ocorre também devido a menor rigidez, porém desta vez uma menor rigidez substrato de CFRP em comparação com o substrato HSS na direção da tensão de cisalhamento aplicada (direção da força de cisalhamento aplicada na amostra).

Entretanto, ao analisar os resultados das tensões de arrancamento, a distribuição dessas tensões não ocorre do mesmo modo que as tensões de cisalhamento. As maiores tensões de arrancamento estão concentradas na extremidade do comprimento de sobreposição do substrato de HSS. A comparação da resistência mecânica entre as juntas está mais bem descrita na Figura 54 abaixo:

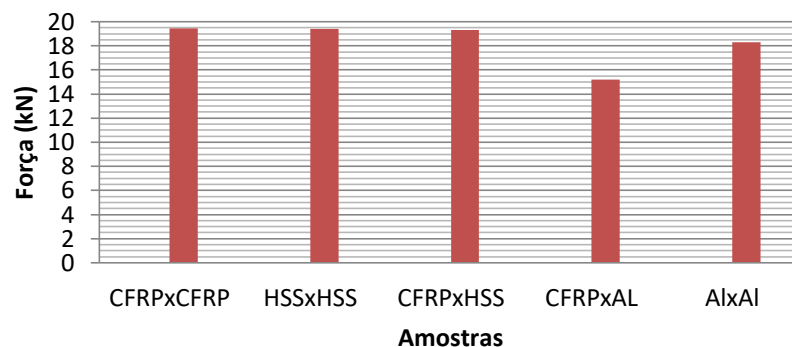


Figura 54: Gráfico Comparativo da Resistência Mecânica entre as Juntas Coladas

Capítulo 6

Conclusão

Neste projeto, juntas de sobreposição simples multimateriais foram analisadas por meio de método de elementos finitos, utilizando a mesma geometria e o mesmo comprimento de sobreposição, e comparadas às juntas de sobreposição simples com substratos de mesmo material. Dessa forma, as seguintes conclusões foram realizadas:

A análise realizada apresentou erros percentuais muito pequenos em comparação à análise analítica, todos abaixo de 20%, comprovando a precisão das análises realizadas neste projeto.

Os resultados obtidos neste estudo são de grande importância para o design das juntas coladas multimateriais, pois a rigidez de cada substrato é um parâmetro fundamental para a resistência da junta. Para todas as amostras estudadas neste projeto, a rigidez foi um parâmetro fundamental, sendo diretamente proporcional à resistência mecânica das amostras. Amostras com substratos de alta rigidez apresentam juntas coladas multimateriais de maior resistência mecânica em comparação a outras amostras com substratos de menor rigidez. A diferença desta propriedade entre os substratos ocasiona uma distribuição de tensões, tanto de cisalhamento quanto de arrancamento, assimétrica, gerando concentrações de tensões no substrato de menor rigidez. Com a concentração de tensões, tem-se a diminuição da resistência mecânica da junta. Deste modo, é necessário levar em considerações tal assimetria na distribuição de tensões no design de juntas coladas.

Trabalhos Futuros

Não foi possível a realização do ensaio experimental devido a complicações no processo de compra do adesivo BETAMATE 2096 utilizado no estudo numérico da presente pesquisa.

Como trabalho futuro, tem-se:

- Realização de análise experimental nas amostras preparadas;
- Utilização de diferentes comprimentos de sobreposição;
- Utilização de diferentes geometrias e espessuras de amostras.

Referências Bibliográficas

- [1] D.P. GRAHAM; A. REZAI; D. BAKER; P.A.SMITH; J.F.WATTS. Hybrid Joints:High-Strength Multi-Material Joints, UK
- [2] DA SILVA, L.F.M; DE MAGALHAES, Antônio G. ; DE MOURA, Marcelo F. S. F. Juntas coladas Estruturais – 2007
- [3] DE MORAIS João Francisco – Desenvolvimento de ferramentas e provetes para o ensaio Thick Adherend Shear Test (TAST) – SP,2011
- [4] FUCUHARA, Karina Ayumi - Aplicação De Adesivos Estruturais Em Painéis De Carros Guaratinguetá, 2014
- [5] DA SILVA, L.F.M, ÖCHSNER Andreas, ADAMS, Robert D. Handbook Of Adhesion Technology. Berlin: Springer, 2011;
- [6] HART-SMITH, L.J. Adhesive bonded single lap joints. s.l.: NASA, Langley Research Center, 1973;
- [7] AHMED, A. Study of Thermal Expansion in Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites (Conference proceedings): SAMPE International Symposium, 2012;
- [8] HOLLAWAY, L.C, Advances in adhesive joining of dissimilar materials with special references to steels and CFRP composites: Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures, 2005;
- [9] MENDES, C. N. R. P; Contribuição ao desenvolvimento de projeto de carrocerias automotivas utilizando adesivo estrutural para a junção de chapas metálicas. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.
- [10] ASTM D1002 Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Liga metálica Specimens by Tension Loading (Liga metálica-to-Liga metálica)
- [11] BANEJA, M.D; DA SILVA, L.F.M. Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. Journal of Materials Design and Applications. 2008.
- [12] KINLOCH, A. J. Adhesion And Adhesives. London: Chapman and Hall, 1987.

- [13] ADAMS, R. D, and V. MALLICK. A Method For The Stress Analysis Of Lap Joints. *The Journal of Adhesion* 38 (3-4) (1992), pp. 199-217;
- [14] DA SILVA, L.F.M. and CAMPILHO, R. D. S. G. *Advances in Numerical Modelling Of Adhesive Joints*. Berlin: Springer, 2012;
- [15] ADAMS, R.D., and J.A. HARRIS. The Influence Of Local Geometry On The Strength Of Adhesive Joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives* 7(2) (1987), pp. 69-80;
- [16] ZHAO, X., Adams, R.D. and da Silva, L.F.M., Single lap joints with rounded adherend corners, *J. Adhes. Sci. Tehnol*, 25 (2011), pp. 837-856).
- [17] DA SILVA, L.F.M. and Magalhaes, A.G. *Juntas Adesivas Estruturais*. s.l. : Publindústria, 2007;
- [18] CROCOMBE, A. D., and R. D. Adams. Influence Of The Spew Fillet And Other Parameters On The Stress Distribution In The Single Lap Joint. *The Journal of Adhesion* 13(2) (1981), pp. 141-155;
- [19] ADAMS, Robert D. *Adhesive Bonding*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005;
- [20] BARENBLATT, G.I. Concerning Equilibrium Cracks Forming During Brittle Fracture. The Stability Of Isolated Cracks. Relationships With Energetic Theories. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* 23.5 (1959), pp. 1273-1282;
- [21] CAMPILHO, R.D.S.G., Banea, M.D., Pinto A. da Silva, L.F.M., de Jesus, A. Strength Prediction Of Single- And Double-Lap Joints By Standard And Extended Finite Element Modelling. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 31(5) (2011), pp. 363-372;
- [22] DUGDALE, D. S. Yielding of steel sheets containing slits, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8(2), (1960), pp. 100-104;
- [23] RICHARD G. Budynas, *ELEMENTOS DE MÁQUINA DE SHIGLEY*. 10 ed. 2016.
- [24] HIBBELER, Russell C. *RESISTENCIA DOS MATERIAIS*. 7 ed. 2010.

[25] FERNANDES, T. A. B., Campilho, R.D.S.G, Banea, M.D., da Silva, L.F.M. Adhesive Selection For Single Lap Bonded Joints: Experimentation And Advanced Techniques For Strength Prediction. *The Journal of Adhesion* 91(10-11) (2015), pp. 841-862;

ANEXOS

Folha de Dados Técnicos do Adesivo



BETAMATE™ 2096

Description BETAMATE™ 2096 is a two component, epoxy based adhesive especially developed for the body shop and the repair of vehicles.

Benefits & Features Excellent adhesion to automotive steels including coated steels (e.g. e-coated or organic coated steel) and pretreated aluminum, helps to increase or restore the stiffness and crash stability of the entire car body, high durability of the adhesive and adhesive bond, corrosion protection due to its sealing capability, compatible with other mechanical and thermal joining techniques

Typical Applications Used in the car to increase the operation durability, the crash performance and the body stiffness.

Uncured Properties	Adhesive	Component A	Component B	Unit
Color	--	Blue	White	
Density (23°C)	1.12	--	--	g/cm ³
Viscosity (23°C, Bohlin, Casson Model)	--	140	2.0	Pa·s

Cured Properties	Adhesive	Unit	Test Method
Lap Shear Strength ¹	18.0	MPa	DIN EN 1465
Peel Strength ² (T-Peel)	6.00	N/mm	ISO 11339
Tensile Modulus	1700	MPa	ISO 527-1
Tensile Strength	29.0	MPa	ISO 527-1
Tensile Elongation at Break	9.0	%	ISO 527-1

Application Technique

Cartridges: hand-operated or pneumatic gun with mechanical piston.
Drums, pails: standard pumping system.

The product is cold pumpable and applicable as a bead (mixing ratio 2:1, static or dynamic). It can be applied with the following parameters:
Application speed: Up to 200-500 mm/s
Recommended Temperatures:
Follower plate: Cold
Follower plate - doser: Cold
Nozzle: Cold

For an optimum tack of the adhesive, the parts to bond should be stored at 15°C or higher. In case of an application break longer than 1 hour the mixer should be changed.

Packaging/Sizes Available

Drums: 200 kg A-Component / 96.6 kg B-Component
Pails: 20 kg pails (diameter 280 mm) with PE-liner
Cartridges:
Side by side 0.24 kg (215 ml / A+B)
Universal single cartridge 0.22 kg (195 ml / A+B), usable volume: 180 ml
Side by side 56 g (50 ml / A+B)

Storage & Stability

Shelf life dependent upon storage temperatures of the material. Optimal storage conditions are three months at less than 25°C. For complete storage stability capabilities, please refer to Customer Test Report.

Toxicity and Safety Information

Read the Safety Data Sheet before using this material. Toxicity and safety information is included in the SDS.

Food Contact Applications

Dow Automotive products are not approved for direct or indirect food contact or drinking water applications. If your applications include food contact or drinking water requirements, please contact your Dow representative. For more information on the regulatory status of this product, please refer to the SDS for this product.

Notes

These are typical properties only and are not to be construed as specifications. Users should confirm results by their own tests.

¹ 2d RT

CRS 1403: 1.5 mm

Adhesive layer thickness: 0.2 mm

Bonding dimension: 25x10 mm

² H340 LAD + Z Daimler: 0.8 mm

Adhesive thickness: 0.2 mm

Bonding dimension: 25x100 mm

Product Stewardship

The Dow Chemical Company and its subsidiaries ("Dow") has a fundamental concern for all who make, distribute, and use its products, and for the environment in which we live. This concern is the basis for our Product Stewardship philosophy by which we assess the safety, health, and environmental information on our products and then take appropriate steps to protect employee and public health and our environment. The success of our Product Stewardship program rests with each and every individual involved with Dow products — from the initial concept and research, to manufacture, use, sale, disposal, and recycle of each product.

Customer Notice

Dow strongly encourages its customers to review both their manufacturing processes and their applications of Dow products from the standpoint of human health and environmental quality to ensure that Dow products are not used in ways for which they are not intended or tested. Dow personnel are available to answer your questions and to provide reasonable technical support. Dow product literature, including safety data sheets, should be consulted prior to use of Dow products. Current safety data sheets are available from Dow.

Medical Applications Policy

NOTICE REGARDING MEDICAL APPLICATION RESTRICTIONS: Dow will not knowingly sell or sample any product or service ("Product") into any commercial or developmental application that is intended for:

- long-term or permanent contact with internal bodily fluids or tissues. "Long-term" is contact which exceeds 72 continuous hours;
- use in cardiac prosthetic devices regardless of the length of time involved ("cardiac prosthetic devices" include, but are not limited to, pacemaker leads and devices, artificial hearts, heart valves, intra-aortic balloons and control systems, and ventricular bypass-assisted devices);
- use as a critical component in medical devices that support or sustain human life; or
- use specifically by pregnant women or in applications designed specifically to promote or interfere with human reproduction.

Dow requests that customers considering use of Dow products in medical applications notify Dow so that appropriate assessments may be conducted. Dow does not endorse or claim suitability of its products for specific medical applications. It is the responsibility of the medical device or pharmaceutical manufacturer to determine that the Dow product is safe, lawful, and technically suitable for the intended use. **DOW MAKES NO WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, CONCERNING THE SUITABILITY OF ANY DOW PRODUCT FOR USE IN MEDICAL APPLICATIONS.**

Disclaimer

NOTICE: No freedom from infringement of any patent owned by Dow or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, the Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for the Customer's use and for ensuring that the Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. Dow assumes no obligation or liability for the information in this document. **NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.**

NOTICE: If products are described as "experimental" or "developmental": (1) product specifications may not be fully determined; (2) analysis of hazards and caution in handling and use are required; (3) there is greater potential for Dow to change specifications and/or discontinue production; and (4) although Dow may from time to time provide samples of such products, Dow is not obligated to supply or otherwise commercialize such products for any use or application whatsoever.

Additional Information

North America		Europe/Middle East	+800-3694-6367
U.S. & Canada:	1-800-441-4369		+31-11567-2626
	1-989-832-1426	Italy:	+800-783-825
Mexico:	+1-800-441-4369		
Latin America		South Africa	+800-99-5078
Argentina:	+54-11-4319-0100		
Brazil:	+55-11-5188-9000		
Colombia:	+57-1-219-6000	Asia Pacific	+800-7776-7776
Mexico:	+52-55-5201-4700		+603-7965-5392

www.dowautomotive.com

This document is intended for use within Africa & Middle East, Europe

Published: 2013-07-09

© 2015 The Dow Chemical Company

