

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE DRUCKER-PRAGER EXPONENCIAL PARA  
SIMULAÇÃO DE JUNTAS ADESIVAS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CARLOS EDUARDO FOLLMANN**

**RIO GRANDE – RS**

**2023**

**CARLOS EDUARDO FOLLMANN**

**IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE DRUCKER-PRAGER EXPONENCIAL PARA  
SIMULAÇÃO DE JUNTAS ADESIVAS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia de Mecânica”. Área de concentração: Engenharia de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Eduardo Bianchi

RIO GRANDE- RS

2023

## Ficha Catalográfica

F668i Follmann, Carlos Eduardo.  
Implementação do modelo de *Drucker-Prager* exponencial para  
simulação de juntas adesivas / Carlos Eduardo Follmann. – 2023.  
89 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande –  
FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,  
Rio Grande/RS, 2023.  
Orientador: Dr. Kleber Eduardo Bianchi.

1. Juntas adesivas 2. Adesivo dúctil 3. Método dos elementos  
finitos 4. Modelo de *Drucker-Prager* 5. Junta sobreposta simples  
6. MEF I. Bianchi, Kleber Eduardo II. Título.

CDU 621

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**  
**PPMec**



Ata n° **3/2023** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos vinte e oito dias do mês de março de dois mil e vinte e três, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às quatorze horas e trinta minutos, online via web conferência, a que se submeteu o mestrando **CARLOS EDUARDO FOLLMANN**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Engenharia de soldagem e materiais e Simulação e controle de processos de fabricação, com o seguinte título: **IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE DRUCKER-PRAGER EXPONENCIAL PARA SIMULAÇÃO DE JUNTAS ADESIVAS**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Kleber Eduardo Bianchi e Rene Quispe Rodriguez e o convidado Doutor Diego Tolotti de Almeida sob a presidência do Professor Kleber Eduardo Bianchi. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Kleber Eduardo Bianchi: APROVADO
2. Rene Quispe Rodriguez: APROVADO
3. Diego Tolotti de Almeida: APROVADO

Foi concedido um prazo de 45 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. \_\_\_\_\_

CPF: 440.783.230-49



Documento assinado digitalmente  
KLEBER EDUARDO BIANCHI  
Data: 29/03/2023 16:25:42-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

2. \_\_\_\_\_

CPF: 233.667.348-76



Documento assinado digitalmente  
RENE QUISPE RODRIGUEZ  
Data: 29/03/2023 17:01:53-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

3. \_\_\_\_\_

CPF: 010.687.950-26

*Diego Tolotti de Almeida*



Documento assinado digitalmente  
CARLOS EDUARDO FOLLMANN  
Data: 29/03/2023 16:52:17-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Carlos Eduardo Follmann: \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer de maneira geral a todos que se envolveram de alguma forma na elaboração deste trabalho.

A instituição de ensino Universidade Federal de Rio Grande – FURG por disponibilizar a oportunidade de aprimoramento profissional, onde tenho orgulho de ter me graduado e cursar pós-graduação.

As empresas Bruning Tecnometal e Lord por disponibilizarem os materiais estudados, como também, fornecer suporte ao esclarecimento das dúvidas.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Kleber Eduardo Bianchi, meus mais sinceros agradecimentos por todo o apoio e compreensão nos momentos mais delicados e também por ter acreditado e confiado em mim.

Aos meus amigos, os quais foram tão importantes durante a jornada, para que não desistisse nos momentos difíceis e “puxões de orelhas” em outros momentos.

Aos meus familiares por sempre estarem buscando palavras e gestos de motivação em momentos críticos.

## RESUMO

As juntas adesivas vêm recebendo enfoque cada vez maior na indústria. Porém o projeto destas uniões demanda o conhecimento acerca de seu comportamento mecânico, condição necessária para a modelagem numérica por elementos finitos. Cada um dos vários modelos de análise numérica requer um conjunto de parâmetros que caracterizam os materiais empregados na junta. Neste trabalho foi empregado o modelo de Drucker-Prager exponencial, o qual faz parte das ferramentas disponíveis no *software* Abaqus. Os parâmetros requeridos pelo modelo foram obtidos a partir de dois ensaios experimentais normatizados, de tração e de cisalhamento. Os resultados dos ensaios mecânicos revelaram um comportamento dúctil do adesivo LORD® 852. Já as análises numéricas geraram resultados conservadores.

**Palavras-chave:** Juntas adesivas; Adesivo dúctil; Método dos elementos finitos. Modelo de Drucker-Prager; Junta sobreposta simples; MEF.

## ABSTRACT

Adhesive joints have been increasingly addressed by the industry. However, the design of this kind of union demands knowledge about its mechanical behavior, a necessary condition for numerical modeling by finite elements. Each of the various numerical analysis models requires a set of parameters that characterize the materials adopted in the joint. In this work, the exponential Drucker-Prager model was employed, which is part of the tools available in the Abaqus software. The parameters required by the model were obtained from two standardized experimental tests: tensile and shear loading. The results of the mechanical tests revealed a ductile behavior of the LORD® 852 adhesive. The numerical analyzes, on the other hand, generated conservative results.

**Keywords:** Adesive joints; Ductile Adhesive; Finite element method; Drucker-Prager model; Single Lap Joint; FEM.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Composição de uma junta adesiva .....	18
<b>Figura 2.</b> Configurações comuns em juntas adesivas.....	19
<b>Figura 3.</b> Curva tensão vs. deformação característica de adesivos em tração.....	20
<b>Figura 4.</b> Diagrama resistência a tração vs. espessura da camada adesiva (a) temperatura e (b) taxa de carregamento .....	21
<b>Figura 5.</b> Diagramas comparativos: a) carga de ruptura vs. espessura da camada adesiva para os três adesivos e b) curvas carga vs. deslocamento $p/$ diferentes espessuras, no adesivo EA9361. ....	22
<b>Figura 6.</b> Máxima tensão de ruptura para diversos comprimentos de sobreposição	23
<b>Figura 7.</b> Superposição de efeitos na tração de uma junta sobreposta: (a) excentricidade das linhas de carga, (b) flexão secundária, (c) detalhe da região terminal e das tensões de arranque e cisalhamento, (d) junta deformada e (e) diagrama de corpo livre da região adesiva [ $c$ = meio comprimento da região adesiva, $P$ = carga, $V$ = esforço cortante e $M$ = momento fletor].....	24
<b>Figura 8.</b> Configuração das juntas adesivas, com e sem filete, utilizadas por Grant, Adams e Da Silva. ....	25
<b>Figura 9.</b> Diagrama de momento fletor e detalhes dos ensaios de flexão em três e quatro pontos.....	26
<b>Figura 10.</b> Resultados encontrados por Bartczak, Mucha e Trzepieciński [21]: (a) influência da excentricidade, (b) distribuição de tensões ao longo da sobreposição adesiva em diferentes espessuras de adesivo, (c) rotação da junta adesiva e (d) distribuição de tensão ao longo da sobreposição de 25 mm em juntas sobrepostas com aderentes de diferentes espessuras. ....	27
<b>Figura 11.</b> Corpos de prova utilizados para análise do ângulo de chanfro. ....	28
<b>Figura 12.</b> Corpos de provas utilizados por Marques e Silva [22] e comparação entre carga de ruptura e ângulo do chanfro.....	29
<b>Figura 13.</b> Análise de tensões atuantes ao longo do comprimento da junta para (a) adesivo dúctil, (b) adesivo frágil e (c) junta mista .....	30
<b>Figura 14.</b> Comparação de tensões e deformação entre juntas com e sem chanfro (a) adesivo frágil, (b) adesivo dúctil e (c) junta mista .....	31
<b>Figura 15.</b> Composição da junta mista utilizada por Silva et al. [23].....	31

<b>Figura 16.</b> Comparação das curvas de força vs. deslocamento em teste de cisalhamento (a) comprimento de sobreposição de 25 mm, (b) comprimento de sobreposição de 50 mm e (c) carga máxima suportada para cada comprimento de sobreposição .....	32
<b>Figura 17.</b> Paralelo entre as juntas ensaiadas (a) forças máximas suportadas (b) absorção de energia e (c) média de cargas máximas suportadas entre teste estático e de impacto. ....	33
<b>Figura 18.</b> Comparação curvas tensão vs. deformação entre adesivo natural em (a) compressão, (b) tração e adesivo+RGO (c) tração e (d) compressão. ....	34
<b>Figura 19.</b> Relações entre adesivo puro e adesivo+RGO em termos de: (a) tensão de ruptura e (b) deformação de falha .....	35
<b>Figura 20.</b> Curvas carga de cisalhamento x tempo de ensaio para (a) grandes taxas de carregamento e (b) baixa taxa de carregamento .....	35
<b>Figura 21.</b> Distribuição de tensões ao longo da SLJ durante ensaios (a) cisalhamento quase estático e (b) ensaio dinâmico de impacto. ....	36
<b>Figura 22.</b> Modos de falhas em juntas adesivas (a) falha coesiva no adesivo, (b) falha adesiva, (c) falha coesiva no aderente, (d) comparação entre falha adesiva e coesiva no adesivo e (e) falha mista coesiva no adesivo + adesiva .....	37
<b>Figura 23.</b> Dados relacionados ao trabalho de Sugiman, Crocombe e Aschroft [29]: (a) configuração do espécimen e localização dos <i>strain gages</i> , (b) curva força vs. deslocamento em cisalhamento com pontos de mudança de inclinação da curva e (c) imagens que evidenciam a extensão do dano correlacionando os pontos e regiões apresentadas na curva força vs. deslocamento. ....	38
<b>Figura 24.</b> Correlação entre (a) curva força vs. deslocamento com (b) força vs. deformação na face traseira do aderente .....	39
<b>Figura 25.</b> Correlação (a) entre as curvas cisalhamento vs. deslocamento para várias velocidades de deformação; (b) e (c) identificação dos picos de concentração de tensão para ensaio rápido e lento, respectivamente. ....	40
<b>Figura 26.</b> Exemplos de trincas em (a) junta de sobreposição simples (b) Junta T e (c) Junta chanfrada .....	41
<b>Figura 27.</b> (a) Corpo de prova com sistema de coordenadas (b) e (c) vista frontal e (d) vista superior das imagens obtidas por tomografia. ....	42

<b>Figura 28.</b> Modo de falha dos corpos de provas testados: (a) cisalhamento (sobreposição 25 mm) (b) cisalhamento (sobreposição 50 mm) e (c) teste de impacto (sobreposição 25 mm).....	43
<b>Figura 29.</b> Superfície de fratura resultante do ensaio de torção. ....	44
<b>Figura 30.</b> Comparação dos modelos Drucker-Prager Linear e Drucker-Prager Exponencial com o modelo de von Mises.....	49
<b>Figura 31.</b> Corpo de prova utilizado pela norma ASTM D1002-10 .....	51
<b>Figura 32.</b> Corpos de prova utilizados pela norma ASTM D3528-96.....	51
<b>Figura 33.</b> Corpo de prova utilizado pela norma ASTM D5656-10 .....	52
<b>Figura 34.</b> Corpos de prova utilizados pelas normas ASTM D897-08 e D2095-99..	53
<b>Figura 35.</b> Corpos de prova utilizados pela norma ASTM D638-14.....	53
<b>Figura 36.</b> Exemplos de aplicação dos testes (a) Teste de tração, (b) Teste de Compressão, (c) Teste de cisalhamento com Junta de sobreposição dupla e (d) Teste de cisalhamento com Junta de sobreposição Simples .....	54
<b>Figura 37.</b> Fluxograma metodológico empregado para implementar o modelo de análise por elementos finitos. ....	56
<b>Figura 38.</b> Curva média tensão verdadeira vs. deformação verdadeira do Adesivo LORD® 852/25GB.....	58
<b>Figura 39.</b> Representação da geometria e dimensões em mm do corpo de prova utilizado .....	59
<b>Figura 40.</b> Curva tensão vs. deformação Aço SAE J403 1008.....	60
<b>Figura 41.</b> Condições de contorno adotadas. ....	60
<b>Figura 42.</b> Refinamento de malha (a) região geral com setas indicando o sentido de diminuição do tamanho dos elementos (b) região de refinamento de malha onde ocorrem maiores concentrações de tensões e (c) aproximação da malha na extremidade da sobreposição.....	62
<b>Figura 43.</b> Curva tensão vs. deformação para ensaio de cisalhamento .....	63
<b>Figura 44.</b> Curva tensão vs. deformação verdadeira de cisalhamento .....	64
<b>Figura 45.</b> Parcelas plásticas da Curva Tensão vs. Deformação Verdadeira.....	65
<b>Figura 46.</b> Distribuição de tensões ao longo da linha central do adesivo utilizando (a) Malha 1, (b) Malha 2, (c) Malha 3, (d) Malha 4, (e) sobreposição de resultados e (f) aproximação dos resultados na extremidade da sobreposição.....	67

<b>Figura 47.</b> Corpos de prova utilizando adesivo 852 (a) antes do ensaio estático e (b) após ensaio estático, evidenciando fratura coesiva do adesivo. ....	69
<b>Figura 48.</b> Influência da espessura do adesivo na distribuição de tensões ao longo da sobreposição .....	70
<b>Figura 49.</b> Influência da espessura na curva tensão vs. deformação de junta sobreposta simples.....	70
<b>Figura 50.</b> Avaliação da rigidez global da junta. ....	72
<b>Figura 51.</b> Comparação entre curvas tensão vs. deslocamento de engenharia experimentais e numéricas.....	73

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Configurações de juntas adesivas utilizadas por Ozel et al. [20].....	25
<b>Tabela 2.</b> Propriedades para implementação do modelo de Drucker-Prager Exponencial .....	66
<b>Tabela 3.</b> Resumo de resultados obtidos no teste de sensibilidade de malha.....	68

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1.</b> Parâmetros necessários ao modelo de Drucker-Prager Exponencial e método de obtenção .....	57
--	----

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>17</b>
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>18</b>
3.1	JUNTAS ADESIVAS.....	18
3.2	NATUREZA DAS TENSÕES E FALHAS EM JUNTAS ADESIVAS.....	19
3.2.1	INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E DE MATERIAL NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNTAS ADESIVAS.....	20
3.2.2	FALHAS EM JUNTAS ADESIVAS.....	37
3.3	MODELAGEM DE JUNTAS ADESIVAS.....	44
3.3.1	MODELO DE DRUCKER-PRAGER EXPONENCIAL.....	45
3.4	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO MATERIAL.....	49
3.4.1	ENSAIO DE CISALHAMENTO .....	50
3.4.2	ENSAIO DE TRAÇÃO .....	52
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>55</b>
4.1	ADESIVO ESTRUTURAL.....	57
4.2	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO ADESIVO PARA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS.....	57
4.2.1	PROPRIEDADES EM TRAÇÃO.....	58
4.2.2	PROPRIEDADES EM CISALHAMENTO.....	58
4.3	MATERIAL DO ADERENTE .....	59
4.4	MODELAGEM DE JUNTAS ADESIVAS.....	60
4.4.1	ESPECIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	60
4.4.2	GERAÇÃO DA MALHA .....	61
<b>5</b>	<b>RESULTADOS PRELIMINARES .....</b>	<b>63</b>

5.1	CURVAS TENSÃO vs. DEFORMAÇÃO EXPERIMENTAIS DE CISALHAMENTO .....	63
5.2	CÁLCULO DE PROPRIEDADES .....	64
5.3	SENSIBILIDADE DE MALHA .....	66
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>69</b>
6.1	ANÁLISE DE FRATURA.....	69
6.2	ANÁLISE DE TENSÕES .....	69
6.4	COMPARAÇÃO DE CURVAS TENSÃO vs. DEFORMAÇÃO .....	73
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>75</b>
<b>8</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>76</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>77</b>
9.2	REFERÊNCIAS POR ESTRATO.....	83
9.3	REFERÊNCIAS POR QUALIS .....	84
9.4	REFERÊNCIAS POR DATA DOS ARTIGOS .....	84
	<b>ANEXO A – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DO ADESIVO LORD® 852 .....</b>	<b>85</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da utilização de juntas adesivas em componentes estruturais houve maior solicitação de métodos de análises confiáveis como o método de elementos finitos. As juntas adesivas vêm sendo incorporadas às estruturas do setor da mobilidade nas mais diversas situações, muitas vezes em associação com outros métodos de união. Mesmo que os materiais adesivos possuam menor resistência em relação aos metais, quando aplicados em chapas finas, tal resistência é suficiente para aplicações estruturais [1]. Uma vantagem adicional das juntas adesivas é sua aplicabilidade em peças com geometrias complexas e de materiais dissimilares [2]. Por fim, pelo fato de apresentarem maior área para distribuição da carga, propiciam menor concentração de tensões [3].

Diversos autores têm realizado estudos sobre a distribuição de esforços em juntas adesivas, especialmente em juntas de sobreposição – SLJ (*Single Lap Joints*) por serem de fácil e rápida fabricação [4]. Porém há diversas geometrias que podem ser aplicadas nos estudos e na fabricação de componentes. Nesse contexto torna-se importante a compreensão da forma como se dá a distribuição de cargas na junta. Ferramentas de projeto que gerem esta compreensão podem permitir a elaboração de estratégias de suavização do fluxo dos esforços, maximizando a resistência da estrutura [5].

As análises de juntas adesivas começaram em 1938 com o modelo de Volkersen que considera o adesivo e aderente como elástico, e o adesivo deforma apenas em cisalhamento [6]. Com o passar do tempo foi desenvolvidas formulações de modelos numéricos com solução através de elementos finitos, como o modelo *Cohesive zone model* utilizado por Campilho et al. [7] e Khoramishad et al. [8] que utiliza parâmetros adquiridos através da mecânica da fratura. Por outro lado, Dean et al. [9] utilizou o modelo de Drucker-Prager para avaliação de juntas adesivas, este modelo requer combinação de parâmetros adquiridos através de testes comumente utilizados como teste de cisalhamento, tração e/ou compressão.

A utilização de modelos numéricos na indústria auxilia na redução de tempo e custos de produção. Para que os modelos sejam implementados há necessidade de que sejam confiáveis e de rápida utilização. Alguns modelos empregados necessitam

de testes com elevada complexidade, por outro lado os modelos que requerem testes de menor complexidade precisam ser melhor estudados. Para determinar se a aplicabilidade do modelo de Drucker-Prager Exponencial analisamos a comparação das curvas tensão vs. deformação experimentais em cisalhamento com os resultados obtidos com o modelo pelo método de elementos finitos.

## 2 OBJETIVOS

Estudo do comportamento quase estático em cisalhamento através de ensaio experimental e simulação numérica de juntas adesivas de sobreposição, (*Single Lap Joints* – SLJ), para possível aplicação na construção de componente automotivo.

### 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar e implementar modelo numérico de Drucker-Prager Exponencial;
- Comparar resultados numéricos com resultados experimentais;
- Analisar numericamente o comportamento mecânico de juntas adesivas alterando a espessura da camada adesiva.

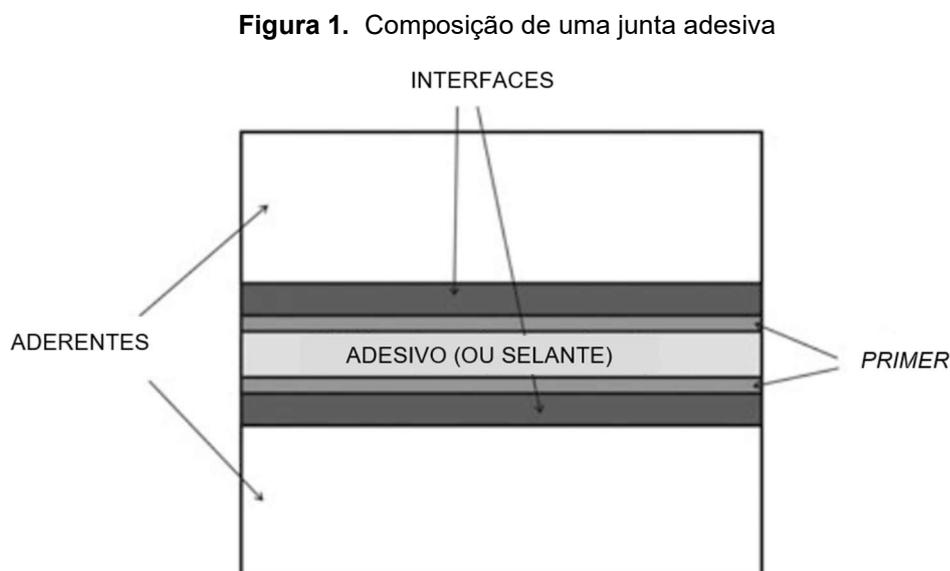
### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são introduzidos os conceitos básicos acerca do comportamento mecânico de juntas adesivas, assim como a influência das mais diversas variáveis neste comportamento. Também é detalhado o modelo de falha de Drucker-Prager.

#### 3.1 JUNTAS ADESIVAS

O adesivo pode ser definido como um material polimérico que, quando aplicado às superfícies, pode uni-las e resistir à separação. Existem, genericamente, duas classes de adesivos: a) estrutural: utilizado quando a carga necessária para gerar a separação é substancial, sendo responsabilidade do adesivo propiciar suficiente resistência e rigidez [10], e b) não estrutural: utilizado para fixação temporária ou na adesão de substratos de baixa resistência mecânica [11].

A Figura 1 mostra os elementos que compõem uma junta adesiva [1].



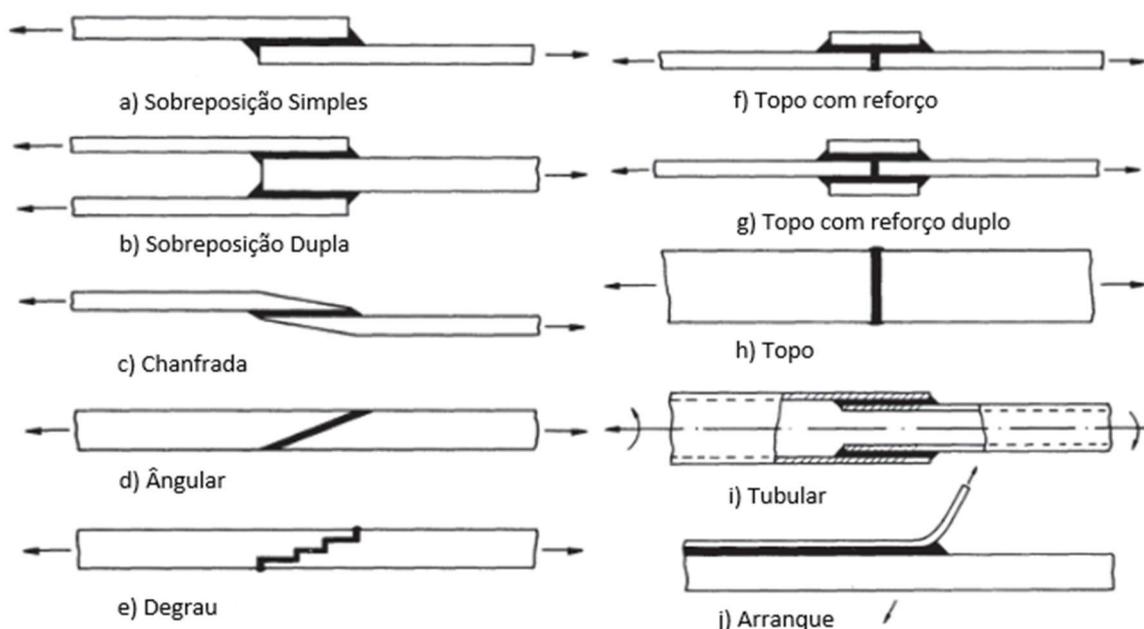
Fonte: Adaptado de Da Silva, Öschner e Adams [1]

As partes unidas são chamadas aderentes. O termo substrato também é empregado, principalmente quando é necessário enfatizar aspectos relacionados ao material que compõe tais partes. Já o elemento responsável pela união consiste num adesivo, ou então num selante. Há no mercado várias composições, na forma líquida, pasta, gel ou sólida [12]. As superfícies a serem unidas podem ser previamente

revestidas com uma camada protetiva, conhecida por *primer*, a qual também tem por função propiciar uma ancoragem mais efetiva entre adesivo e substrato. O conjunto de sub-regiões que compõem a junta propicia a transmissão das tensões entre substratos de forma gradual, ao longo da camada adesiva [3].

Juntas adesivas podem ser montadas das mais diversas formas. A Figura 2 exibe algumas das configurações comumente utilizadas em testes laboratoriais e em estruturas de engenharia.

**Figura 2.** Configurações comuns em juntas adesivas.



Fonte: Adaptado de Adams e Wake [10]

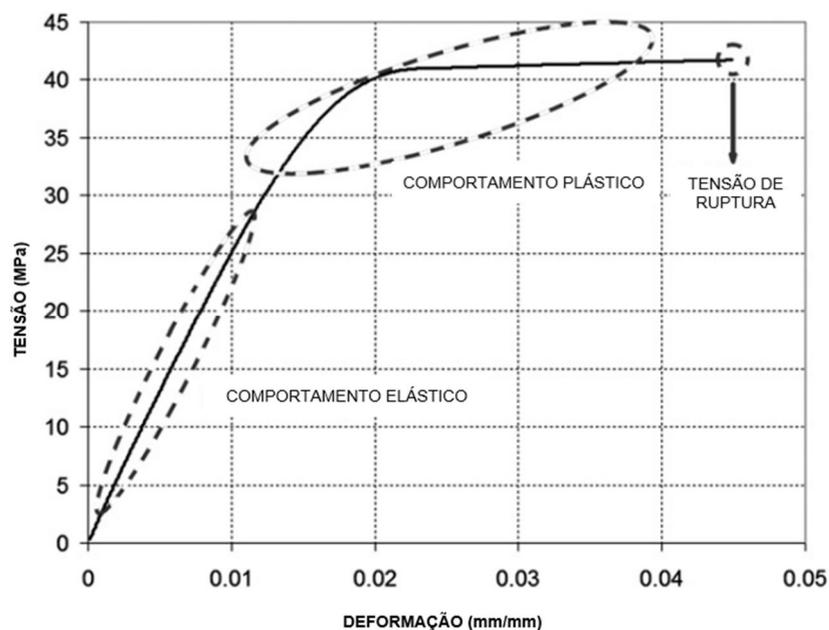
### 3.2 NATUREZA DAS TENSÕES E FALHAS EM JUNTAS ADESIVAS

De acordo com Her [3], os parâmetros que influenciam na distribuição de tensão na região adesiva podem ser classificados em duas categorias: *i*) Parâmetros do material, compreendendo o substrato e o adesivo, *ii*) Parâmetros geométricos, como a espessura das peças unidas e da camada adesiva, o comprimento de sobreposição e outros.

### 3.2.1 INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E DE MATERIAL NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNTAS ADESIVAS

A curva que descreve o comportamento mecânico de adesivos em tração é composta por três regiões: a) de deformações elásticas, b) de deformações elasto-plásticas e c) da ruptura final. A Figura 3 mostra uma curva tensão vs. deformação, na qual são destacadas essas regiões, obtida no ensaio de corpos de prova chamados '*bulk specimens*', ou seja: fabricados inteiramente com o material de interesse. Detalhes complementares serão apresentados na seção 3.4.2. A resposta não linear decorre das deformações plásticas de grande magnitude que ocorrem após a ultrapassagem da tensão de escoamento [13].

**Figura 3.** Curva tensão vs. deformação característica de adesivos em tração



Fonte: Adaptado de García et al. [13]

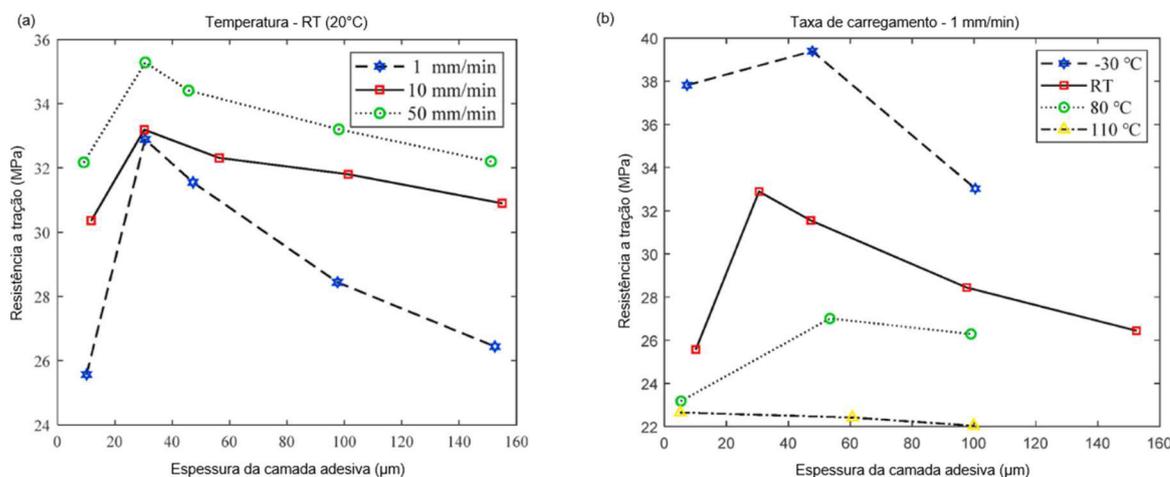
O comportamento em cisalhamento também é empregado na caracterização de adesivos. Para tal são usualmente empregados corpos de prova com junta de sobreposição simples (já mostrada na Fig. 2a), ou de sobreposição dupla (Fig. 2b).

Buscando encontrar quais parâmetros geométricos têm maior influência nas tensões de cisalhamento, Da Silva et al. [4] realizaram ensaios em juntas sobrepostas com variados comprimentos de sobreposição e espessuras de camada adesiva e de aderentes. Os autores chegaram à conclusão que o comprimento da região

sobreposta é crucial, ou seja, a resistência da junta é proporcional a este parâmetro. Em segundo lugar estão a espessura da camada adesiva e a espessura do aderente, parâmetros que apresentaram influência semelhante no desempenho. Quanto mais espessa a camada adesiva, tanto menor é a resistência da junta. No sentido oposto, o emprego de aderentes de elevada espessura causa aumento da resistência global da junta.

Guo et al. [14], ao avaliarem as variáveis temperatura, espessura da camada adesiva e taxa de carregamento (velocidade do ensaio), evidenciaram que a temperatura possui contribuição mais crítica para o desempenho de juntas adesivas, seguidas da variável espessura da camada adesiva e da taxa de carregamento. A Fig. 4(a) apresenta a variação da resistência à tração vs. espessura de adesivo para diferentes taxas de carregamento, enquanto a Fig. 4(b) apresenta a variação da resistência à tração vs. espessura de adesivo para diferentes temperaturas de ensaio. Nesta figura, RT significa temperatura ambiente (*Room Temperature*).

**Figura 4.** Diagrama resistência a tração vs. espessura da camada adesiva (a) temperatura e (b) taxa de carregamento

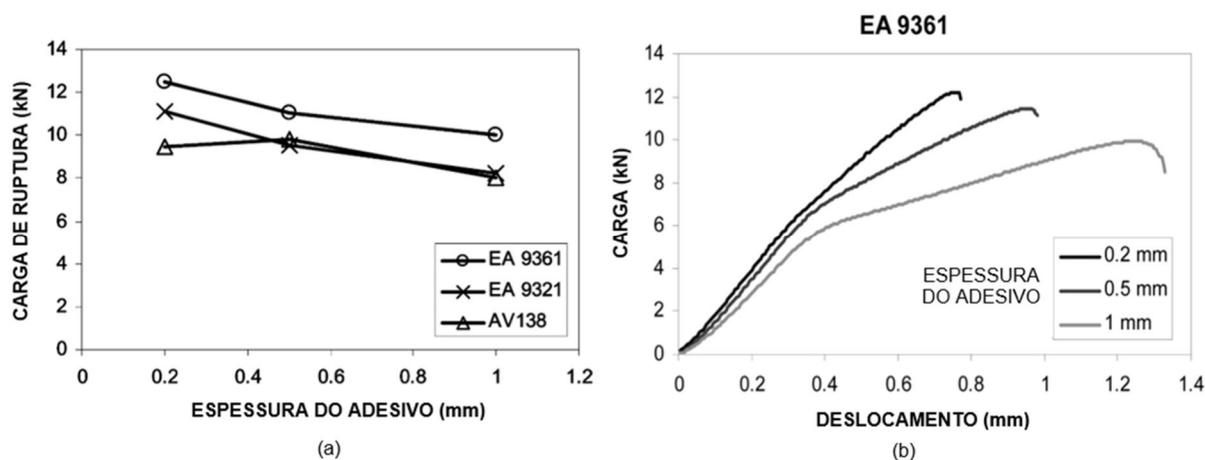


Fonte: adaptado de Guo et al. [14]

Com o intuito de compreender o efeito do tipo e da espessura do adesivo na resistência de juntas sobrepostas, Silva et al. [15] realizaram testes de caracterização de material, juntamente com simulações numéricas. Três tipos de adesivos foram empregados: dúctil (EA 9361), intermediário (EA 9321) e frágil (AV 138). Já os valores de espessura foram de 0,2 - 0,5 e 1 mm.

A Figura 5(a), obtida pelos autores, mostra que as juntas com espessura de 0,2 mm apresentaram maior resistência mecânica em relação às juntas com espessura de 1 mm, em todos os materiais. Contudo o adesivo mais frágil (AV 138) apresentou uma característica distinta: o pico de resistência correspondeu à espessura de adesivo de 0,5 mm.

**Figura 5.** Diagramas comparativos: a) carga de ruptura vs. espessura da camada adesiva para os três adesivos e b) curvas carga vs. deslocamento p/ diferentes espessuras, no adesivo EA9361.



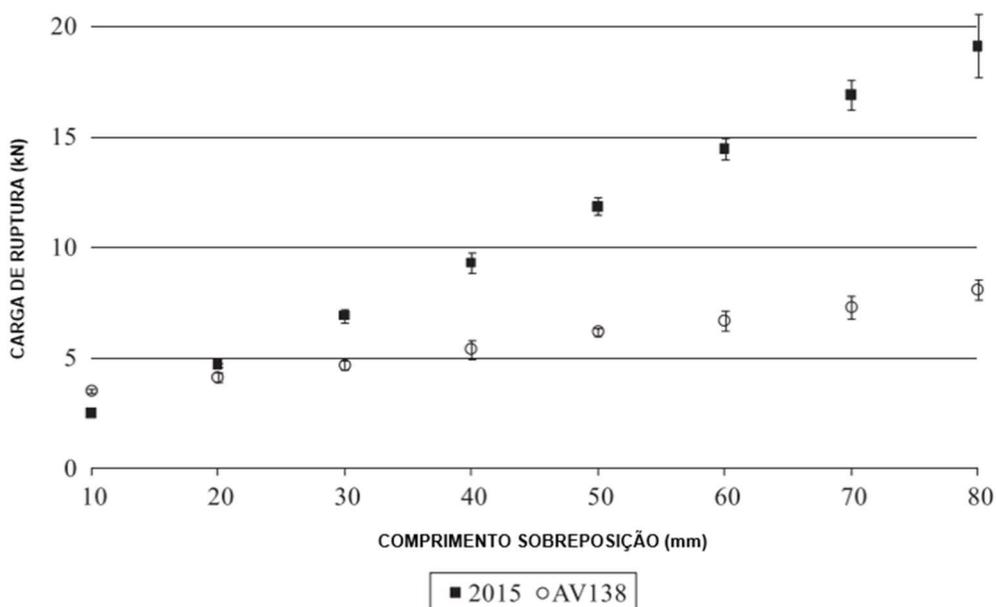
Fonte: Adaptado de Silva et al. [15]

Os autores também observaram que, no caso do adesivo dúctil (EA 9361), a rigidez aumentou com o decréscimo da espessura de camada adesiva. Isto é mostrado na Fig. 5(b). Adicionalmente, houve notória dispersão nos resultados proporcionados pelo adesivo frágil, possivelmente devido à maior sensibilidade a defeitos e concentradores de tensão. Por fim, por meio de análise estatística os autores concluíram que a influência da espessura do adesivo é levemente prevalente em relação ao tipo de adesivo.

Campilho et al. [7] realizaram a comparação do comportamento mecânico de um adesivo dúctil (denominado 2015) com outro de comportamento frágil (AV138), para variados comprimentos da camada adesiva, em juntas utilizando CFRP (polímero de fibra de carbono reforçado) como substrato. Os resultados apresentados na Figura 6 indicam que, para ambos os adesivos, houve aumento da resistência com o incremento do comprimento da camada adesiva. O adesivo dúctil apresentou maior aumento de resistência em comparação ao adesivo frágil, em decorrência da maior deformação plástica sofrida. O aumento menos significativo do adesivo frágil (AV138)

pode estar correlacionado ao aumento do gradiente de tensões encontrado ao longo da região de sobreposição.

**Figura 6.** Máxima tensão de ruptura para diversos comprimentos de sobreposição



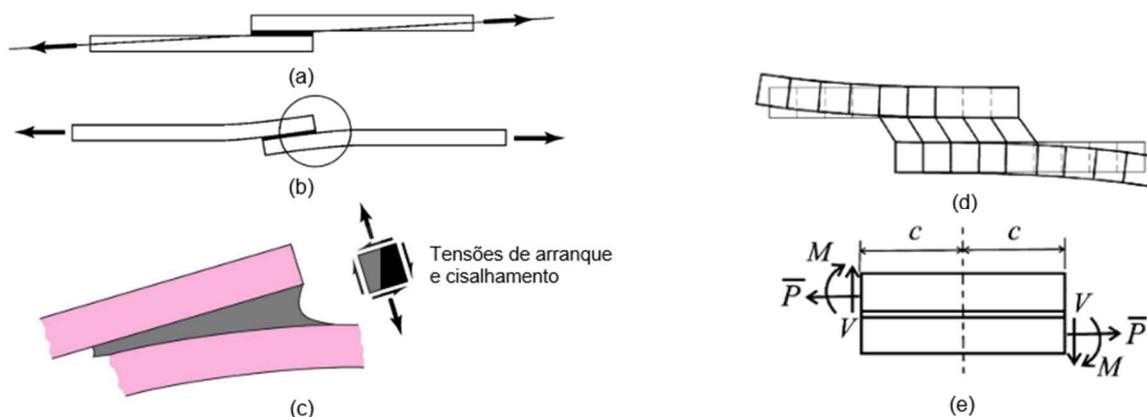
Fonte: adaptado de Campilho et al. [7]

Apesar de apresentar menor resistência de ruptura, o adesivo dúctil teve maior deformação até a falha final, uma característica importante para juntas adesivas, pois tal capacidade de deformação propicia a redistribuição das tensões nas regiões onde há concentradores de tensão. As extremidades da camada adesiva são exemplos de pontos nos quais ocorrem picos de tensão, principalmente quando estas extremidades são retas [7]. A ductilidade do adesivo possui um grande efeito quando associada a longos comprimentos de sobreposição. Neste caso as juntas podem vir a suportar grandes carregamentos [16].

Em seu estudo comparando resultados analíticos e de simulações com elementos finitos, Her [3] investigou as tensões atuantes em juntas com diversas espessuras de camada adesiva. O autor concluiu que o maior nível de concentração de tensão ocorre nas extremidades da região de sobreposição, onde a combinação das tensões normal e de cisalhamento é responsável pela iniciação da falha. As maiores tensões de cisalhamento na região adesiva ocorreram nas menores espessuras de camada. Quando comparados dois aderentes de materiais distintos, o máximo cisalhamento ocorre naquele de maior dureza.

A Figura 7 mostra o efeito da superposição da tensão longitudinal (ou de cisalhamento) e do momento fletor nas extremidades da região adesiva. O momento de flexão é ocasionado pela excentricidade nas linhas de carga, cujo resultado é a rotação da junta, até que tais linhas se encontrem. Portanto, conforme há aumento rotação, ocorre decréscimo no momento fletor. Como resultado deste momento secundário, surgem componentes de tensão transversal (de arranque, ou *peel*) nas extremidades da camada adesiva. Tal superposição de efeitos gera, nesta região, deformações consideravelmente maiores do que na zona interna da junta [17].

**Figura 7.** Superposição de efeitos na tração de uma junta sobreposta: (a) excentricidade das linhas de carga, (b) flexão secundária, (c) detalhe da região terminal e das tensões de arranque e cisalhamento, (d) junta deformada e (e) diagrama de corpo livre da região adesiva [ $c$  = meio comprimento da região adesiva,  $\bar{P}$  = carga,  $V$  = esforço cortante e  $M$  = momento fletor].



Fonte: adaptado de Budynas e Nisbett [18] e Da Silva et al. [17]

Ozel et al. [19] também investigaram a influência de algumas variáveis geométricas em juntas sobrepostas, por meio de ensaios experimentais e numéricos, nos quais foram variados parâmetros como a largura de sobreposição e a espessura de adesivo e dos aderentes. As configurações utilizadas são mostradas na Tabela 1. Os resultados corroboram a constatação de que os momentos secundários potencializam a iniciação do processo de falha nas extremidades da junta adesiva. Em alguns dos casos analisados, a distribuição de tensões proporcionou valores mínimos próximos a zero na região central da junta.

Analisando o comportamento de juntas sobrepostas com geometrias variadas em ensaios de tração e de flexão em três e quatro pontos, Grant, Adams e Da Silva [20] encontraram grandes deformações nos substratos durante os ensaios. A

geometria dos corpos de provas utilizados está representada na Figura 8, o comprimento da área de adesivo foi variado entre 7,5 e 45 mm e espessura de camada adesiva entre 0,1 e 3,0 mm. Já para os testes de cisalhamento, o comprimento de camada adesiva foi fixado em 15 mm.

**Tabela 1.** Configurações de juntas adesivas utilizadas por Ozel et al. [19]

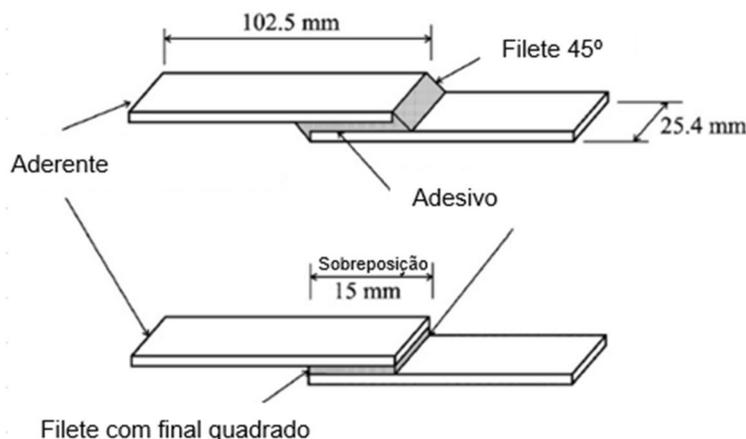
Tipo		Aderente Inferior	Aderente Superior	$h_1-h_2$ (mm-mm)	L (sobreposição-mm)
Type-I	Type-I a	[0] <sub>16</sub>	[0] <sub>16</sub>	4.4-4.4	25
	Type-I b	[0/90] <sub>8</sub>	[0/90] <sub>8</sub>	4.4-4.4	25
	Type-I c	[45/-45] <sub>8</sub>	[45/-45] <sub>8</sub>	4.4-4.4	25
	Type-I d	[0/45/-45/90] <sub>4</sub>	[0/45/-45/90] <sub>4</sub>	4.4-4.4	25
Type-II	Type-II a	[0] <sub>16</sub>	AA2024-T3	4.4-4.4	25
	Type-II b	[0/90] <sub>8</sub>	AA2024-T3	4.4-4.4	25
	Type-II c	[45/-45] <sub>8</sub>	AA2024-T3	4.4-4.4	25
	Type-II d	[0/45/-45/90] <sub>4</sub>	AA2024-T3	4.4-4.4	25
Type-III	Type-III a	[0] <sub>16</sub>	AA2024-T3	4.4-4.4	25
	Type-III b	[0] <sub>16</sub>	AA2024-T3	4.4-3.2	25
	Type-III c	[0] <sub>16</sub>	AA2024-T3	4.4-1.6	25
Type-IV	Type-IV a	AA2024-T3	AA2024-T3	4.4-4.4	25
	Type-IV b	AA2024-T3	AA2024-T3	4.4-3.2	25
	Type-IV c	AA2024-T3	AA2024-T3	4.4-1.6	25
Type-V	Type-V a	[0] <sub>16</sub>	[0] <sub>16</sub>	4.4-4.4	12.5
	Type-V b	[0] <sub>16</sub>	[0] <sub>16</sub>	4.4-4.4	25
	Type-V c	[0] <sub>16</sub>	[0] <sub>16</sub>	4.4-4.4	37.5
Type-VI	Type-VI a	AA2024-T3	AA2024-T3	4.4-4.4	12.5
	Type-VI b	AA2024-T3	AA2024-T3	4.4-4.4	25
	Type-VI c	AA2024-T3	AA2024-T3	4.4-4.4	37.5

$h_1$  = Espessura do aderente inferior

$h_2$  = Espessura do aderente Superior

Fonte: Adaptado de Ozel et al. [19]

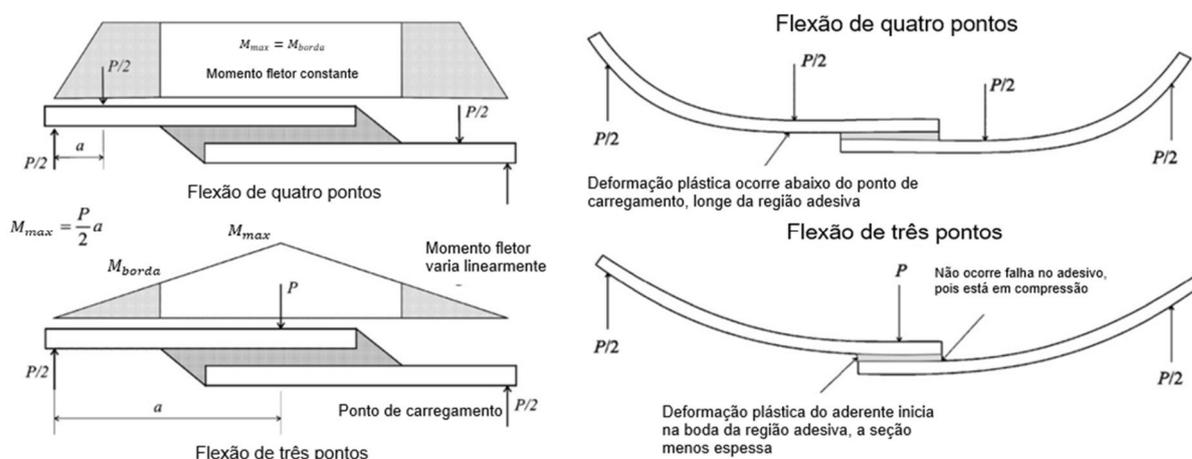
**Figura 8.** Configuração das juntas adesivas, com e sem filete, utilizadas por Grant, Adams e Da Silva.



Fonte: adaptado de Grant, Adams e Da Silva [20]

A Figura 9 mostra como são realizados os ensaios de flexão de quatro e de três pontos. Observa-se que, durante o teste de flexão de quatro pontos, a junta se mantém incólume ao carregamento, ao passo que as extremidades do corpo de prova sofrem flexão. A análise ou o teste podem ser interrompidos quando ocorrer o escoamento das seções críticas nos aderentes, ou mesmo a ruptura final [20].

**Figura 9.** Diagrama de momento fletor e detalhes dos ensaios de flexão em três e quatro pontos.



Fonte: adaptado de Grant, Adams e Da Silva [20]

Já no caso do teste de flexão em três pontos, ambas as extremidades da camada adesiva são expostas a momentos fletores de mesmo valor. Contudo, nestas regiões de extremidade, o aderente superior está em compressão, enquanto o inferior sofre tração. Da mesma forma, a região crítica na camada adesiva corresponde à extremidade esquerda, na qual as tensões de arranque (*peel*) têm valor máximo. Já a extremidade oposta (direita) sofre compressão. Diferentemente do que é observado no ensaio de tração longitudinal em juntas sobrepostas, no caso da flexão em três pontos, o aumento de espessura da camada adesiva não teve influência significativa no desempenho global. Isto se deve à grande concentração de tensão junto ao aderente inferior [20].

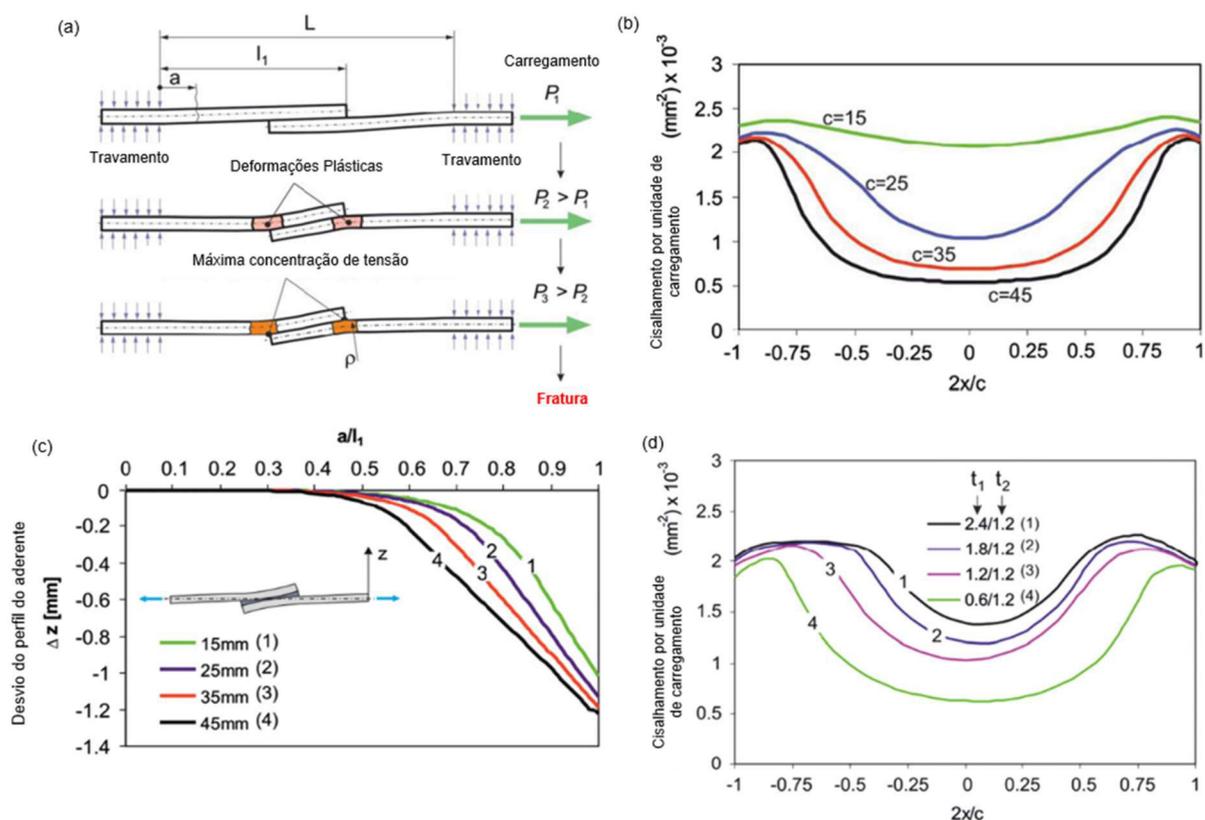
Já nos testes de flexão em quatro pontos as regiões de atuação do carregamento sofreram deformações plásticas e/ou rupturas. Por se localizarem distantes da junta adesiva, não houve falhas nesta região. Do mesmo modo, a espessura de camada adesiva não influenciou na resistência da junta [20].

Na discussão dos resultados, os autores corroboram a hipótese de que as juntas sobrepostas simples são sensíveis à espessura da camada de adesivo, ou seja, em casos de grande espessura, as tensões geradas pelo momento secundário são elevadas, o que causa redução da resistência. Uma maneira de obter maior resistência consiste em produzir juntas com filetes em 45° nas extremidades da região de sobreposição. A introdução de filetes tem maior relevância, entretanto, em

camadas adesivas de 3 mm ou mais, potencialmente aumentando a resistência em até duas vezes. Já no caso de camadas finas, a diferença no comportamento não é significativa [20].

Realizando ensaios em três tipos de juntas: *i*) adesiva, *ii*) soldada por pontos e *iii*) híbrida solda-adesivo; Bartczak, Mucha e Trzepieciński [21], constataram que, no caso de pequeno comprimento de sobreposição, o nível das tensões de cisalhamento no adesivo é elevado, sendo a distribuição destas tensões um pouco mais uniforme do que em juntas longas. Ou seja, o valor de tensão de cisalhamento, na parte central de juntas curtas, não é desprezível. Isto é observado na Fig.10(b).

**Figura 10.** Resultados encontrados por Bartczak, Mucha e Trzepieciński [21]: (a) influência da excentricidade, (b) distribuição de tensões ao longo da sobreposição adesiva em diferentes espessuras de adesivo, (c) rotação da junta adesiva e (d) distribuição de tensão ao longo da sobreposição de 25 mm em juntas sobrepostas com aderentes de diferentes espessuras.



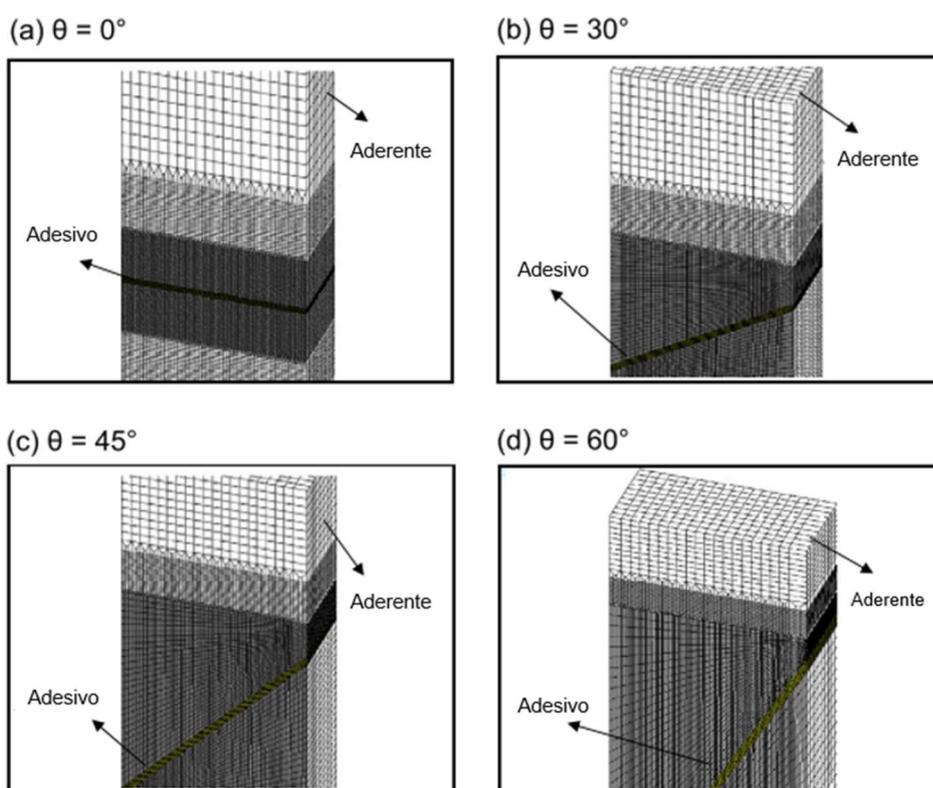
$P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  = carregamentos  
 $c$  = comprimento de sobreposição  
 $x$  = distância no eixo  $x$  a partir do centro da sobreposição  
 $t_1$  = espessura do aderente 1  
 $t_2$  = espessura do aderente 2

Fonte: Adaptado de Bartczak, Mucha e Trzepieciński [21]

Ao contrário, sobreposições mais longas ocasionam a redução das tensões no centro da camada adesiva, devido à diminuição da rotação da junta e à consequente atenuação do momento secundário. Isto é mostrado nas Figuras 10(a) e 10(c). Já quando há substratos de espessuras diferentes, ocorre assimetria das tensões principais e de cisalhamento, ou seja, valores maiores são observados no aderente de menor espessura, como visto na Fig.10(d).

Jen [2] realizou um estudo que visava compreender os diferentes comportamentos em fadiga de juntas chanfradas (*scarf joints*), com ângulo variando em  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ . A Figura 11 mostra os modelos gerados pelo autor. O epóxi foi empregado como material adesivo.

**Figura 11.** Corpos de prova utilizados para análise do ângulo de chanfro.



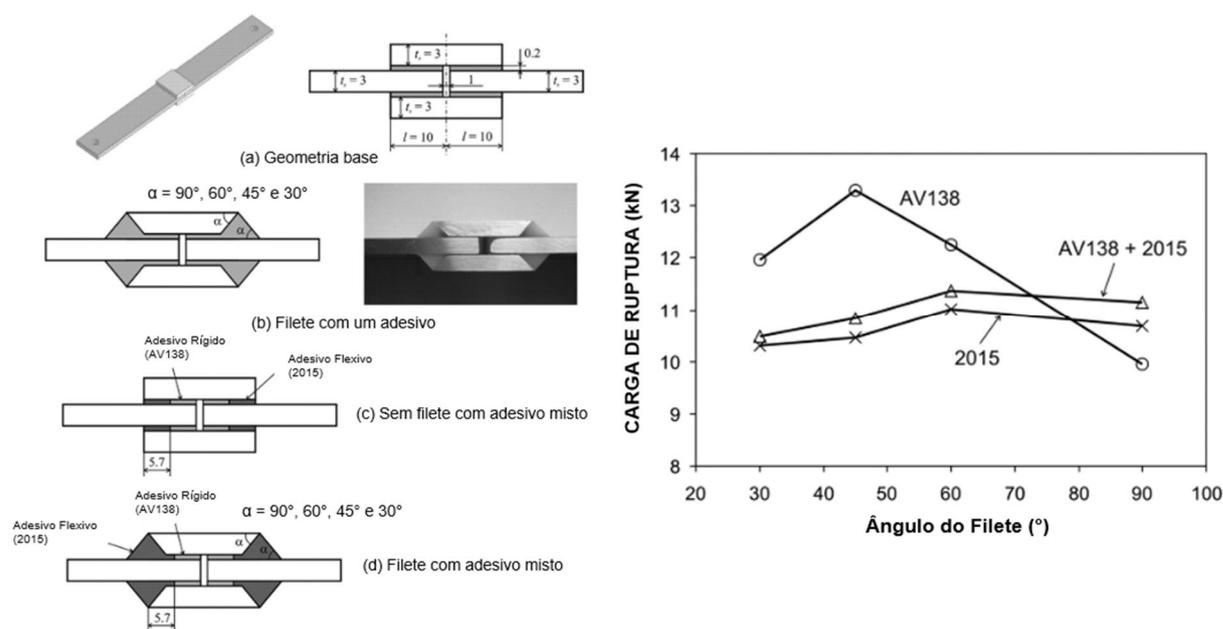
Fonte: adaptado de Jen [2]

O autor realizou, preliminarmente, ensaios estáticos, com o objetivo de obter a tensão ruptura. Os resultados preliminares indicaram que a resistência da junta variava proporcionalmente com o ângulo de chanfro. Seguindo a mesma tendência observada nos ensaios estáticos, os ensaios de fadiga evidenciaram aumento da

resistência, bem como a transformação do modo de falha adesiva para coesiva, com o emprego de ângulos elevados. Como será abordado em detalhes em seção posterior, a falha adesiva consiste no descolamento na interface adesivo/aderente, enquanto a falha coesiva se configura na ruptura interna da camada adesiva. Este modo de falha é preferido, em relação àquele, por dois motivos: *i*) usualmente ocorre em cargas relativamente elevadas e *ii*) indica que a preparação das peças e a fabricação da junta foram bem executadas. Retornando ao trabalho de Jen [2], para os ângulos de  $0^\circ$  e  $30^\circ$  houve predominância da falha adesiva, enquanto nos ângulos de  $45^\circ$  e  $60^\circ$  ocorreu o modo coesivo. Tais resultados indicaram que a tensão de arranque desempenhou um papel importante na resistência da junta.

Analisando modelos de juntas utilizadas em reparos de carenagem de aviões, Marques e Silva [22] estudaram a influência do ângulo de chanfro na resistência de juntas adesivas. Como já mencionado, o chanfro é empregado com o intuito de minimizar a concentração de tensões nas extremidades região de sobreposição. As Figuras 12(a) e 12(b) mostram a configuração dos corpos de prova e os ângulos empregados, quais sejam:  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$  (ou seja, sem chanfro). Os autores adotaram os mesmos adesivos do estudo de Campilho et al. [7], quais sejam: 2015 (de comportamento dúctil) e AV138 (frágil).

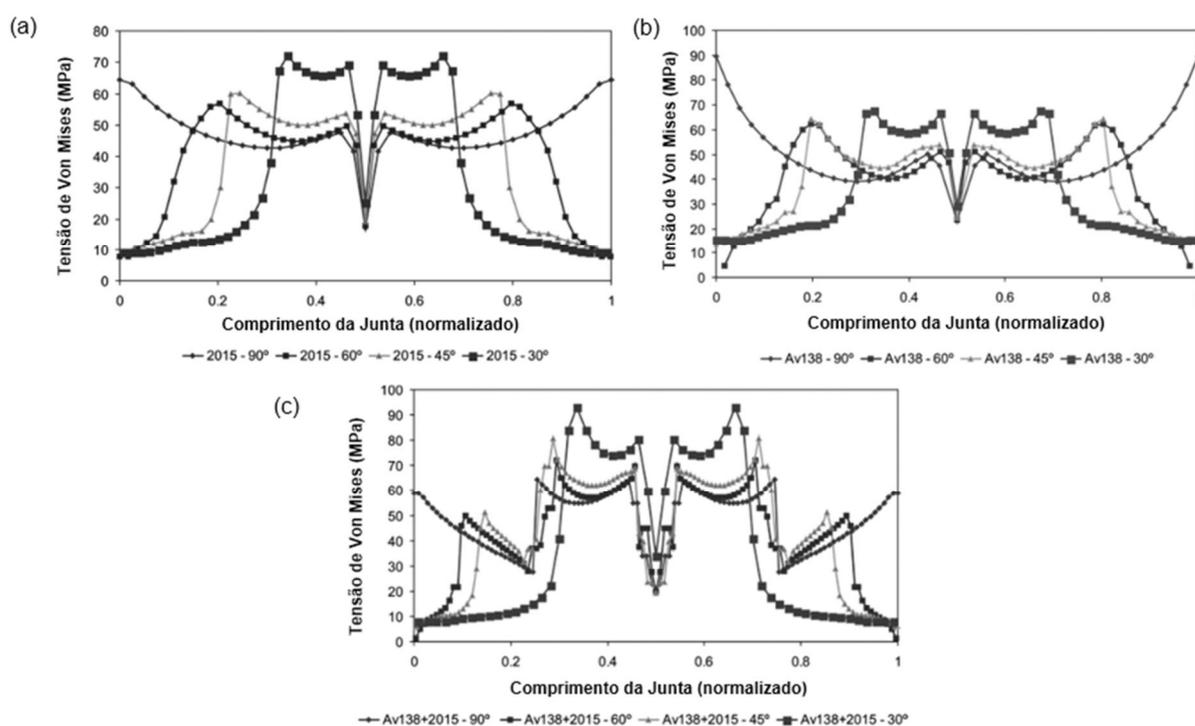
**Figura 12.** Corpos de provas utilizados por Marques e Silva [22] e comparação entre carga de ruptura e ângulo do chanfro



Fonte: adaptado de Marques e Silva [22]

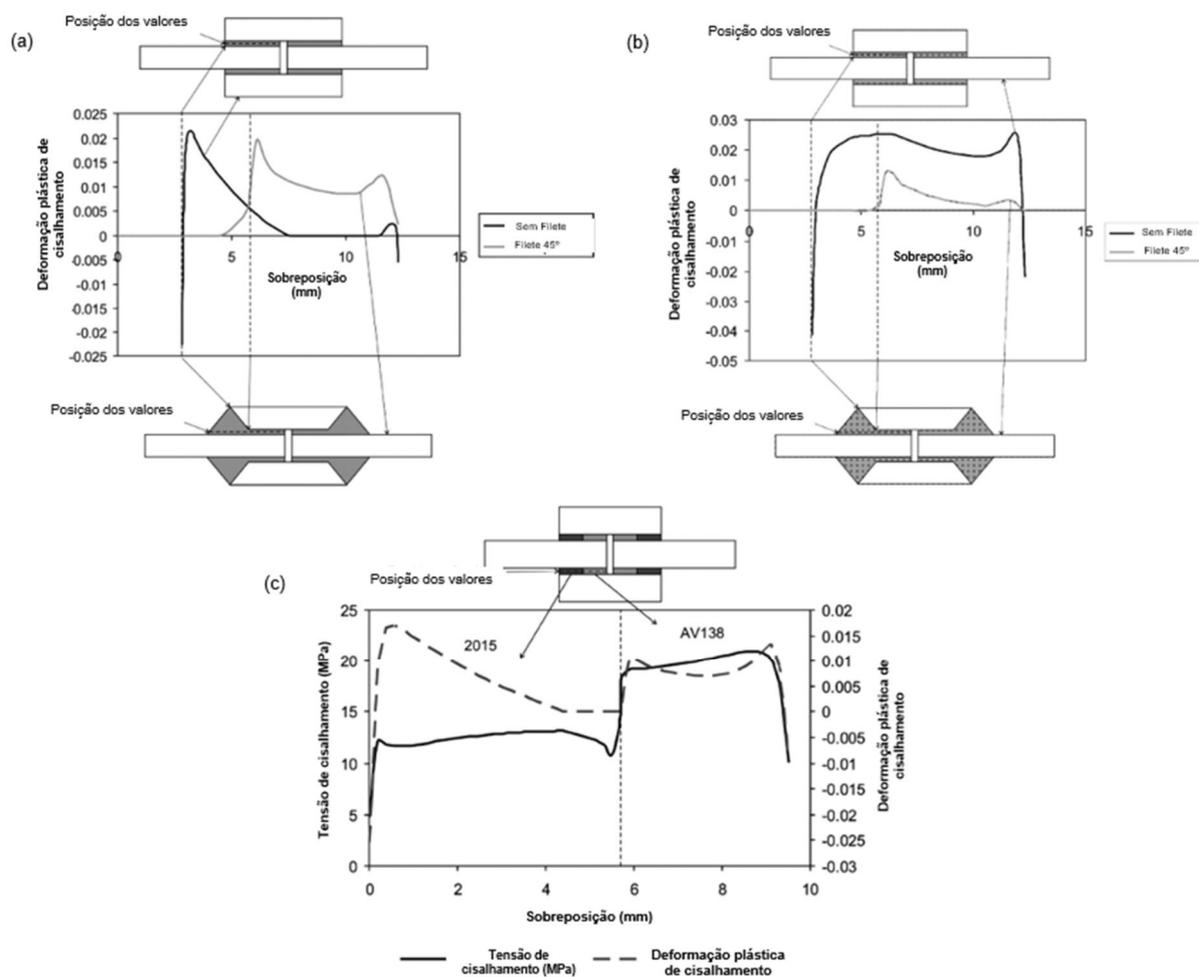
Os autores também testaram juntas mistas, compreendendo um núcleo de adesivo frágil e extremidades com o adesivo dúctil. As Figuras 12(c) e 12(d) mostram detalhes dos respectivos corpos de prova. Os resultados evidenciaram que, no adesivo frágil, o ângulo de chanfro teve grande influência na resistência. O maior valor obtido, curiosamente correspondente ao ângulo de  $45^\circ$ , foi aproximadamente 33% superior em relação à configuração sem ângulo. Já o adesivo dúctil e a junta mista apresentaram comportamento similar. O emprego do adesivo dúctil na extremidade da sobreposição proporciona alta capacidade de deformação, tornando a junta menos sensível a defeitos. Utilizando método dos elementos finitos para identificar a distribuição de tensões ao longo da junta, pelo modelo de Von Mises, verificou-se que juntas com ângulos de chanfro de  $45^\circ$  e  $60^\circ$  apresentam melhor distribuição de tensões ao longo de toda a sobreposição. Análises de plasticidade utilizando o modelo de Drucker-Prager evidenciaram que o ângulo tem grande influência no caso de adesivos frágeis, pois diminui as concentrações de tensões. Em juntas mistas, ambos os adesivos foram explorados ao seu máximo. As comparações são mostradas nas Figuras 13 e 14.

**Figura 13.** Análise de tensões atuantes ao longo do comprimento da junta para (a) adesivo dúctil, (b) adesivo frágil e (c) junta mista



Fonte: adaptado de Marques e Silva [22]

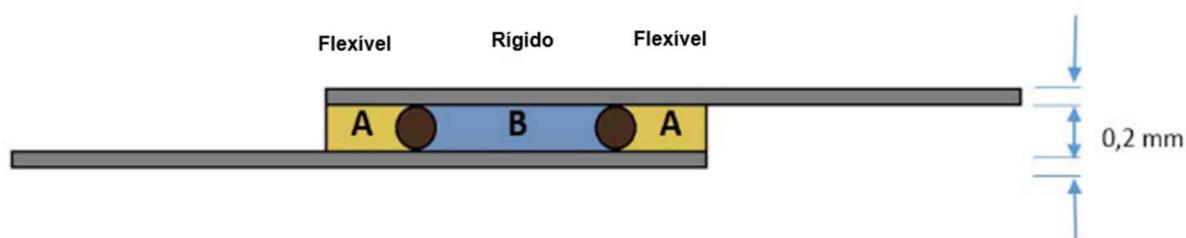
**Figura 14.** Comparação de tensões e deformação entre juntas com e sem chanfro (a) adesivo frágil, (b) adesivo dúctil e (c) junta mista



Fonte: adaptado de Marques e Silva [22]

Investigando o desempenho de juntas adesivas com quatro distintos tipos de adesivos, dois flexíveis e dois relativamente rígidos, bem como a combinação entre eles, Silva et al. [23] realizaram ensaios de cisalhamento e de impacto num conjunto de corpos de prova cuja configuração é mostrada na Fig.15.

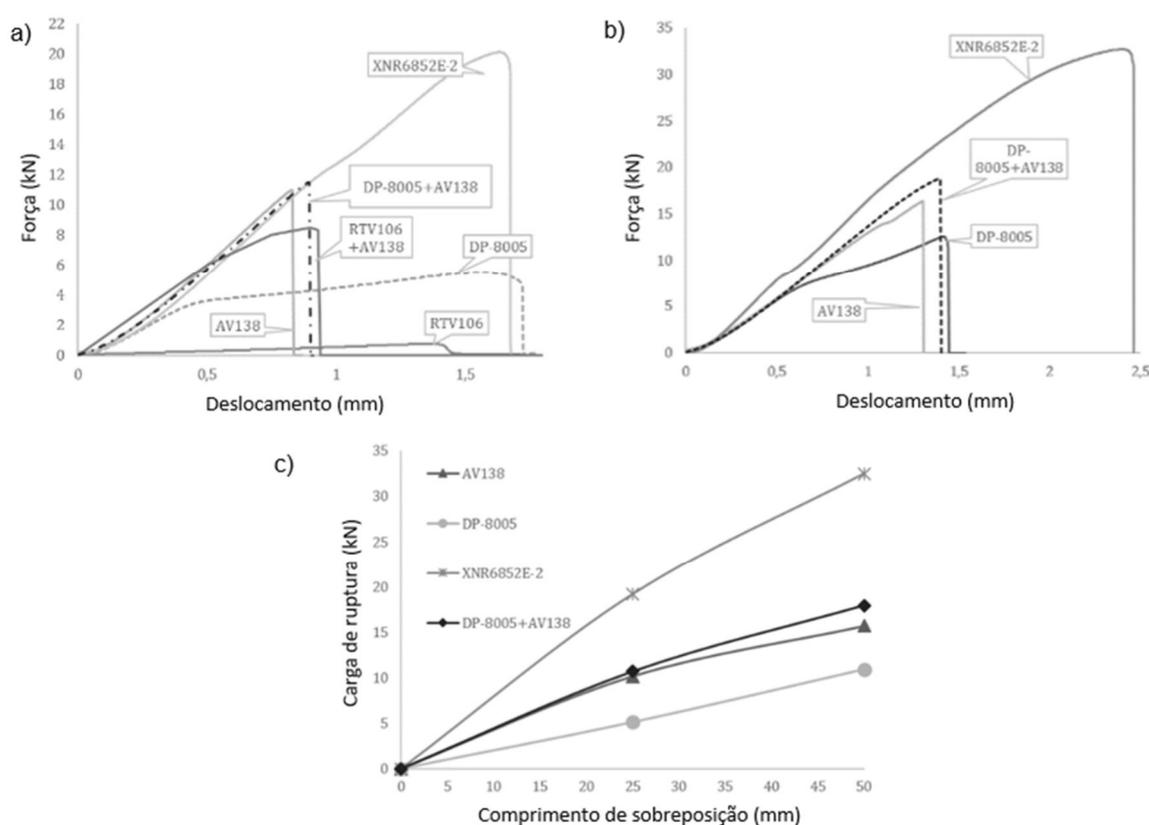
**Figura 15.** Composição da junta mista utilizada por Silva et al. [23]



Fonte: adaptado de Silva et al. [23]

Para compor a junta mista, o adesivo flexível foi aplicado nas extremidades, enquanto que o adesivo rígido foi depositado na região central. Os corpos de prova apresentavam dois comprimentos de sobreposição, de 25 mm e de 50 mm. Os resultados obtidos no teste de cisalhamento indicaram que, para o adesivo dúctil (denominado DP-8005), a tensão de ruptura aumentou proporcionalmente com o comprimento de sobreposição, como pode ser visto na Figura 16.

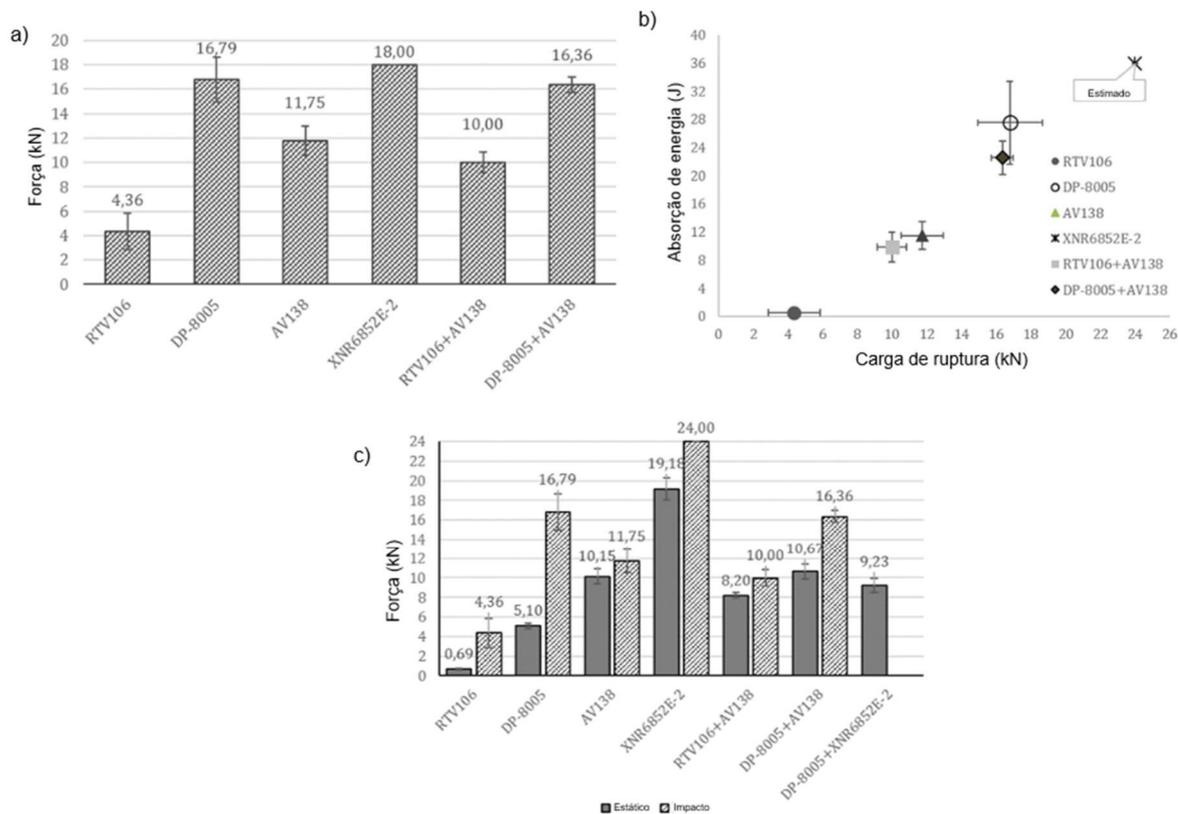
**Figura 16.** Comparação das curvas de força vs. deslocamento em teste de cisalhamento (a) comprimento de sobreposição de 25 mm, (b) comprimento de sobreposição de 50 mm e (c) carga máxima suportada para cada comprimento de sobreposição



Fonte: adaptado de Silva et al. [23]

Já os testes de impacto, realizados apenas com sobreposição de 25 mm nas mesmas combinações de juntas, compreendeu um peso de 26 kg. A Figura 17(a) apresenta as forças encontradas para os corpos de provas testados e a Fig.17(b) representa a energia absorvida durante o ensaio de impacto. Observou-se que os adesivos dúcteis apresentaram maior absorção de energia antes da falha. Por fim, a Fig.17(c) apresenta uma comparação entre os valores médios das forças máximas dos ensaios de cisalhamento e de impacto.

**Figura 17.** Paralelo entre as juntas ensaiadas (a) forças máximas suportadas (b) absorção de energia e (c) média de cargas máximas suportadas entre teste estático e de impacto.



Fonte: adaptado de Silva et al. [23]

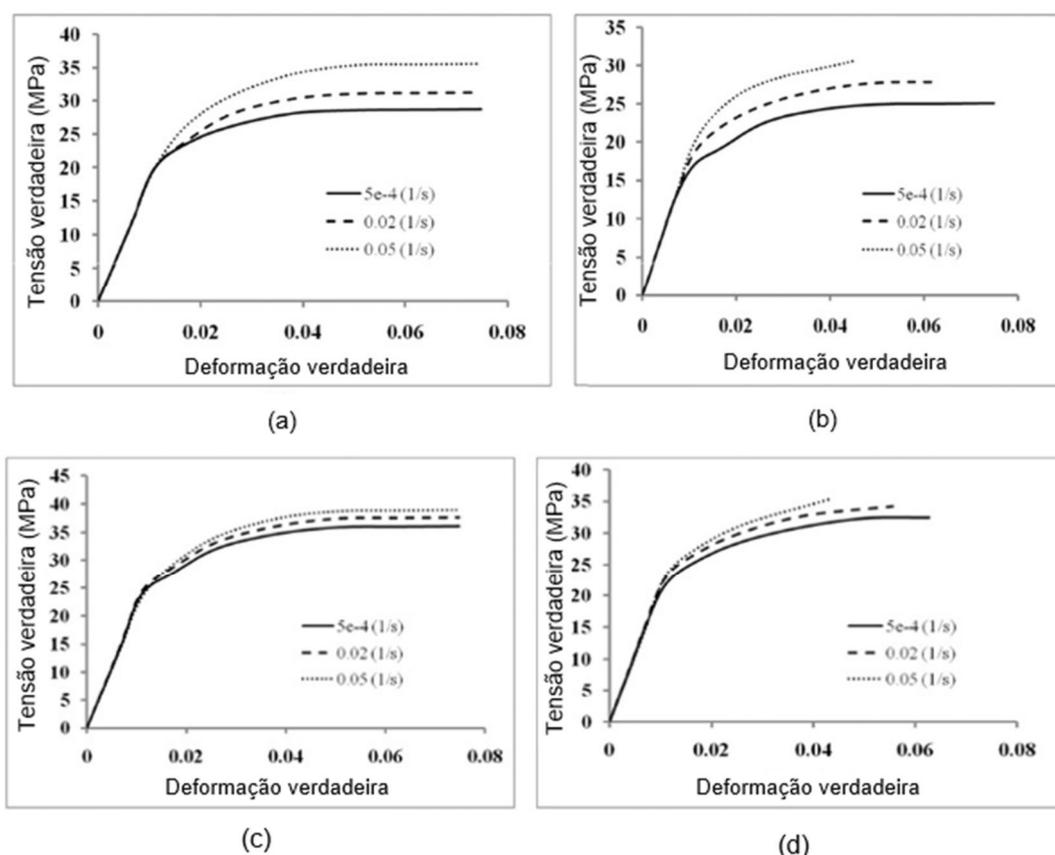
Para juntas mistas, Srinivasan et al. [24] concluíram que os caminhos complexos das falhas são ditados pelo adesivo mais rígido e a área sobreposta precisa ser otimizada a ponto de diminuir concentradores de tensão de arranque mantendo a maior proporção do adesivo mais frágil em cisalhamento.

Estudando diferentes materiais como substrato em juntas adesivas, Reis, Ferreira e Antunes [25], avaliaram a influência de parâmetros como módulo de elasticidade e tensão de escoamento na resistência de juntas de sobreposição. Os autores demonstraram que a tensão de escoamento do aderente tem grande influência na flexibilidade global da junta. Adicionalmente há maior resistência da junta no caso de aderentes de elevada tensão de escoamento, pois as deformações plásticas são menores. Já o módulo de elasticidade tem influência semelhante, porém menor, do que a proporcionada pela tensão de escoamento.

A adição de elementos de composição é uma maneira alternativa para melhorar as características mecânicas de materiais. Sadigh e Marami [26] utilizaram uma fração de 0,5% do peso de óxido de grafeno reduzido (*reduced graphene oxide – RGO*) como

aditivo em uma base de adesivo epóxi. Realizaram então ensaios de tração em corpos de prova do material adesivo e, posteriormente, em corpos de prova com juntas de sobreposição dupla e substratos de aço inox. Os testes foram realizados com três velocidades de ensaio:  $0,0005 \text{ s}^{-1}$ ,  $0,02 \text{ s}^{-1}$  e  $0,05 \text{ s}^{-1}$ . Os resultados indicam que maiores velocidades conduzem à fragilização do adesivo e à elevação da resistência mecânica. Também foi constatado que a adição de RGO propiciou ganho de resistência, como demonstrado na Figura 18.

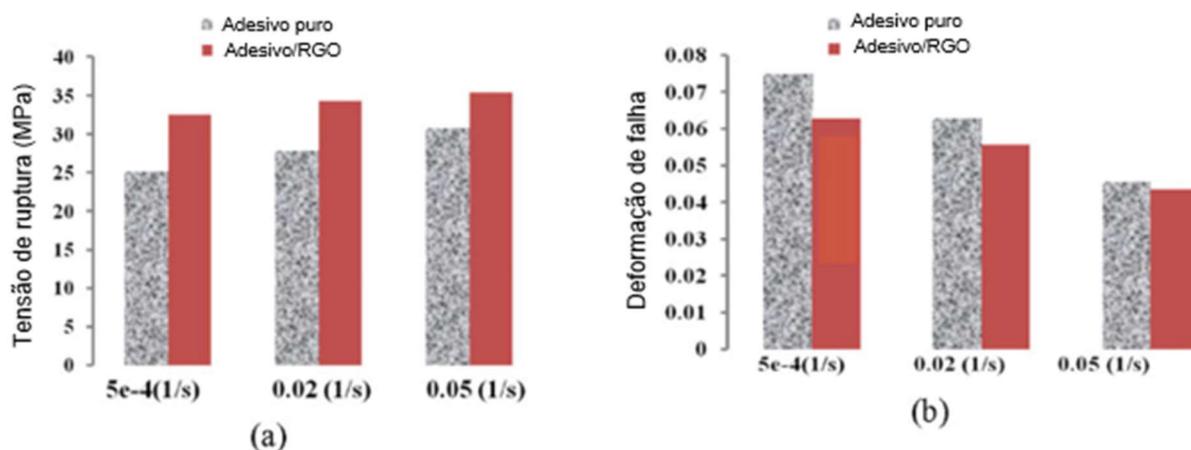
**Figura 18.** Comparação curvas tensão vs. deformação entre adesivo natural em (a) compressão, (b) tração e adesivo+RGO (c) tração e (d) compressão.



Fonte: adaptado de Sadigh e Marami [26]

A Figura 19 apresenta os diagramas comparativos entre casos (duas composições de adesivo e três velocidade de ensaio) em termos de tensão de ruptura (Fig. 19a) e deformação até a falha (Fig. 19b). Houve evidente aumento da tensão de ruptura e decaimento da deformação, para todos os casos, com a adição de RGO. Segundo os autores, a presença de partículas de grafeno ocasiona maior demanda de energia para propagação das microtrincas, as quais são obrigadas a trilhar caminhos alternativos.

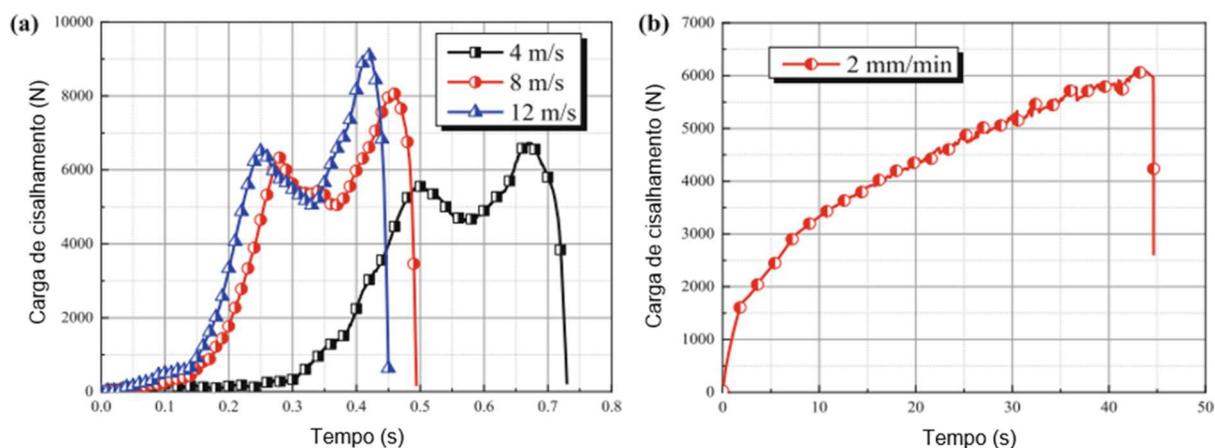
**Figura 19.** Relações entre adesivo puro e adesivo+RGO em termos de: (a) tensão de ruptura e (b) deformação de falha



Fonte: adaptado de Sadigh e Marami [26]

Wang et al. [27] correlacionaram a velocidade de carregamento no ensaio de cisalhamento com a resistência em juntas adesivas, utilizando como substrato alumínio e CFRP (polímero de fibra de carbono reforçado), e adesivo de comportamento frágil, semelhante ao AV138 mencionado anteriormente. Os autores constataram uma elevação na resistência proporcional à taxa de carregamento, o que é comprovado pelos diagramas da Figura 20. Segundo os autores, no caso de baixas taxas de carregamento há tempo suficiente para que as microtrincas presentes na junta se acomodem.

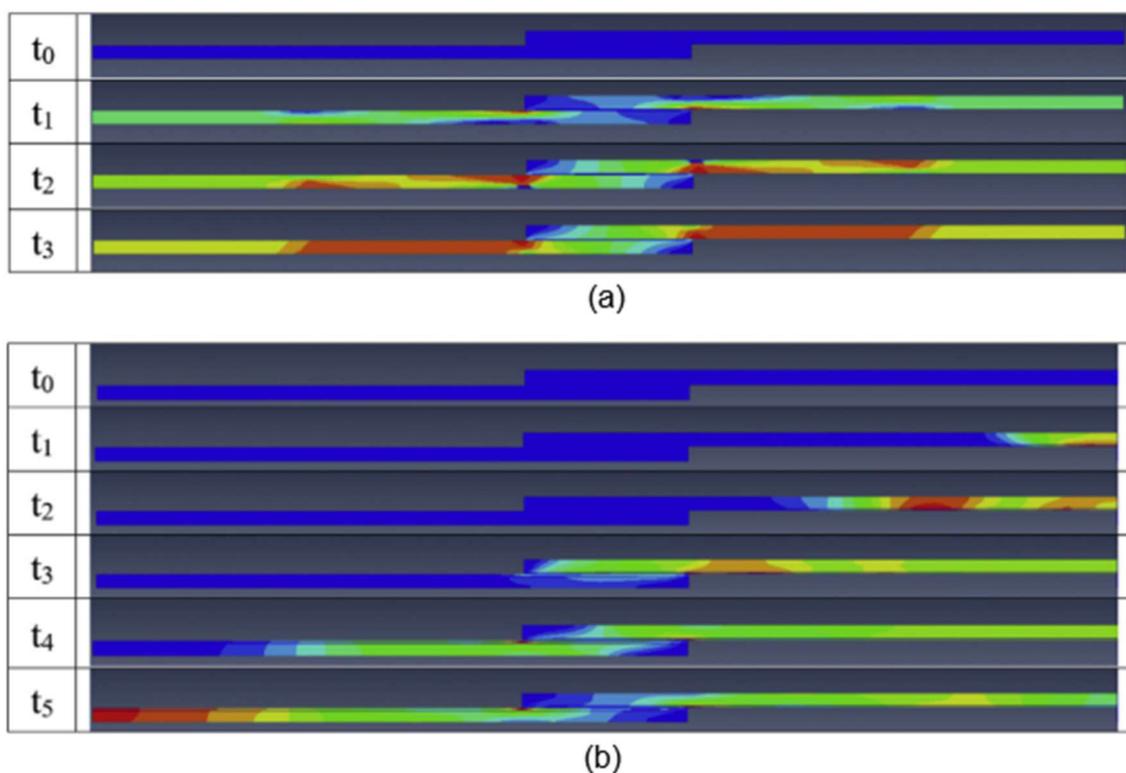
**Figura 20.** Curvas carga de cisalhamento x tempo de ensaio para (a) grandes taxas de carregamento e (b) baixa taxa de carregamento



Fonte: adaptado de Wang et al. [27]

Sabe-se que, além de cargas quase estáticas, uma junta pode sofrer com cargas dinâmicas, por exemplo cargas de impacto. Machado et al. [28] analisaram o desempenho de juntas com aderentes similares e dissimilares, aplicando diferentes faixas de temperatura, sob efeito de cargas dinâmicas e quase estáticas. Observou-se que, em baixa temperatura, todos os compostos apresentaram comportamento semelhante. Nas demais faixas de temperatura, as juntas com aderentes similares de CFRP-CFRP apresentaram a maior tensão de ruptura, bem como extrema sensibilidade à temperatura. No caso das juntas dissimilares, o comportamento foi influenciado pelas deformações ocorridas no alumínio. Em ensaio com carga quaseestática, os corpos de provas contendo alumínio como aderente absorveram mais energia que os demais. A Figura 21 representa a distribuição de tensões durante ensaio quase estático (Fig. 22(a)) e ensaio dinâmico de impacto (Fig. 22(b)), as maiores tensões são representadas pelas cores de tonalidade avermelhada.

**Figura 21.** Distribuição de tensões ao longo da SLJ durante ensaios (a) cisalhamento quase estático e (b) ensaio dinâmico de impacto.



Fonte: adaptado de Machado et al. [28]

### 3.2.2 FALHAS EM JUNTAS ADESIVAS

As formas como juntas adesivas falham se classificam em [11]:

*i)* Falha coesiva no adesivo

Ocorre dentro do volume de material adesivo, deixando a região de interface e o próprio aderente intactos. Neste caso, após a ruptura, observa-se uma camada de adesivo sobre as peças anteriormente unidas.

*ii)* Falha adesiva

As forças de união na interface entre adesivo e aderente são insuficientes para suportar o carregamento. A expressão leiga empregada para descrever o fenômeno é 'descolamento'. Neste caso, uma das partes anteriormente unidas apresentará, na região da junta, ausência completa de adesivo.

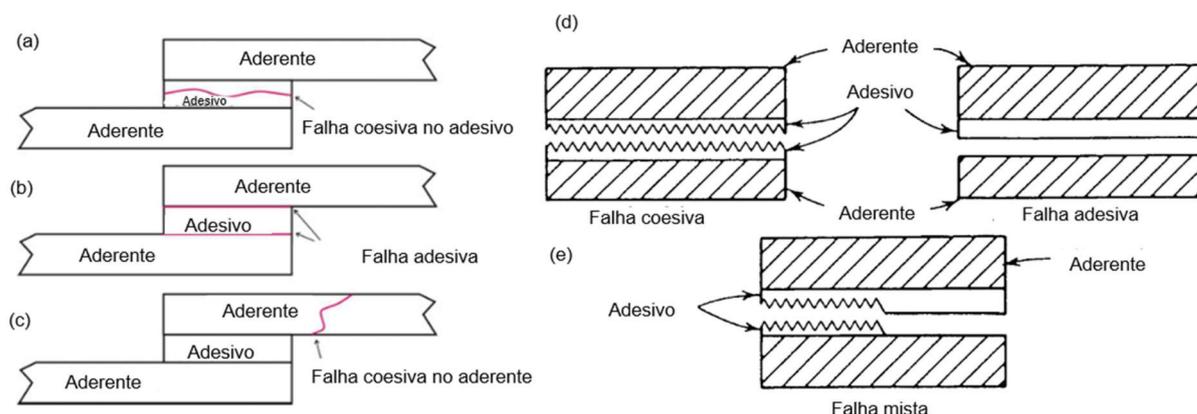
*iii)* Falha mista

A falha da junta compreende uma composição de modos adesivo e coesivo.

*iv)* Falha coesiva no aderente, a qual ocorre sem danificar o adesivo.

Na Figura 22 estão ilustrados estes mecanismos de falha.

**Figura 22.** Modos de falhas em juntas adesivas (a) falha coesiva no adesivo, (b) falha adesiva, (c) falha coesiva no aderente, (d) comparação entre falha adesiva e coesiva no adesivo e (e) falha mista coesiva no adesivo + adesiva



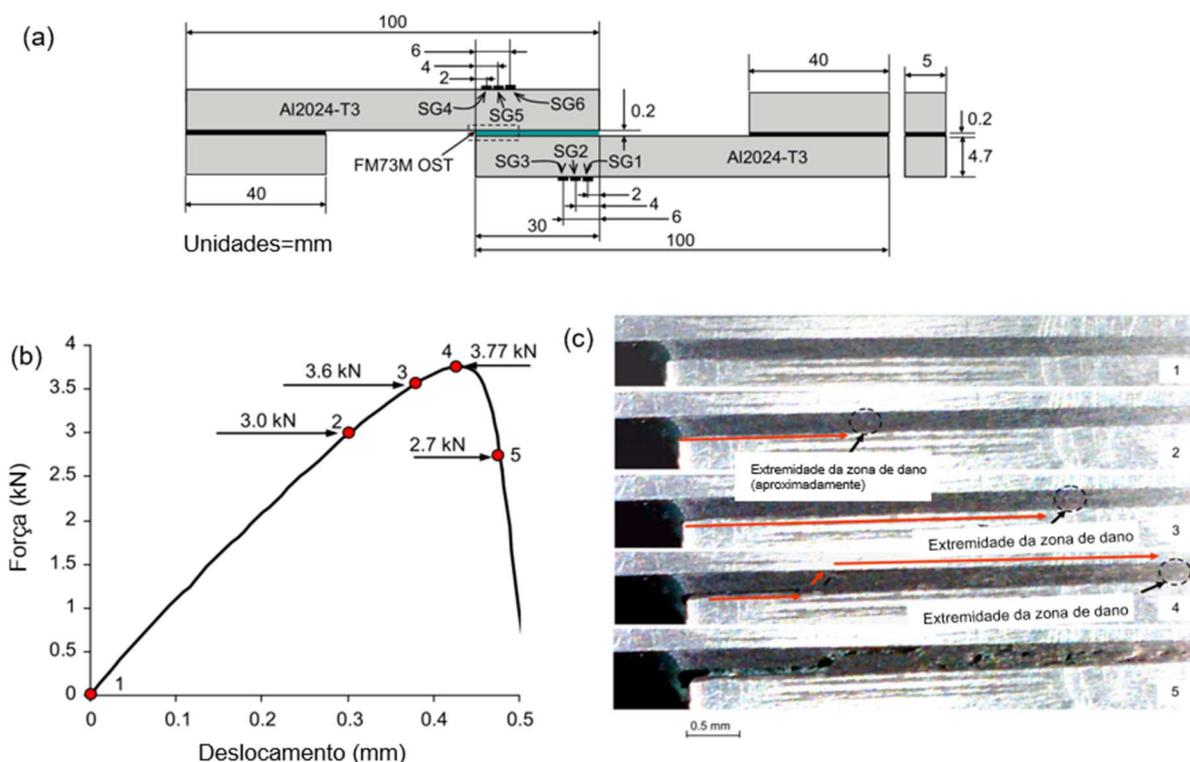
Fonte: Adaptado de Da Silva, Öschner e Adams [1] e Petrie [11]

Os modos de falhas estão correlacionados com as tensões atuantes. Nas falhas adesivas a tensão de arranque (*peeling*) que atua na interface adesiva é dominante. Já na falha coesiva, o colapso é causado pelo estado elevado de tensões no interior do adesivo [2].

Sugiman, Crocombe e Aschroft [29] monitoraram os danos na camada adesiva correlacionando imagens e sinais obtidos por *strain gauges* (SG) fixados no aderente. A Fig. 23(a) mostra a configuração e as dimensões principais do corpo de prova, com destaque para a região de análise sobre a camada de adesivo e a localização dos SGs na face posterior à face em contato com o adesivo.

A maior parte das falhas teve início nas extremidades da camada adesiva, onde há grande concentração de tensão, e se propagou para a região central da camada. A nucleação das trincas ocasionou o aparecimento de uma zona esbranquiçada no adesivo, enquanto a trinca em si apresentou coloração escura. A Fig. 23(b) mostra, sobre a curva força *vs.* deslocamento, pontos nos quais foi estimada a extensão do dano sobre o corpo de prova. Tal nível de dano pode ser observado nas imagens instantâneas do corpo de prova, dispostas na Fig. 23(c).

**Figura 23.** Dados relacionados ao trabalho de Sugiman, Crocombe e Aschroft [29]: (a) configuração do espécimen e localização dos *strain gauges*, (b) curva força *vs.* deslocamento em cisalhamento com pontos de mudança de inclinação da curva e (c) imagens que evidenciam a extensão do dano correlacionando os pontos e regiões apresentadas na curva força *vs.* deslocamento.



Fonte: adaptado de Sugiman, Crocombe e Aschroft [29]

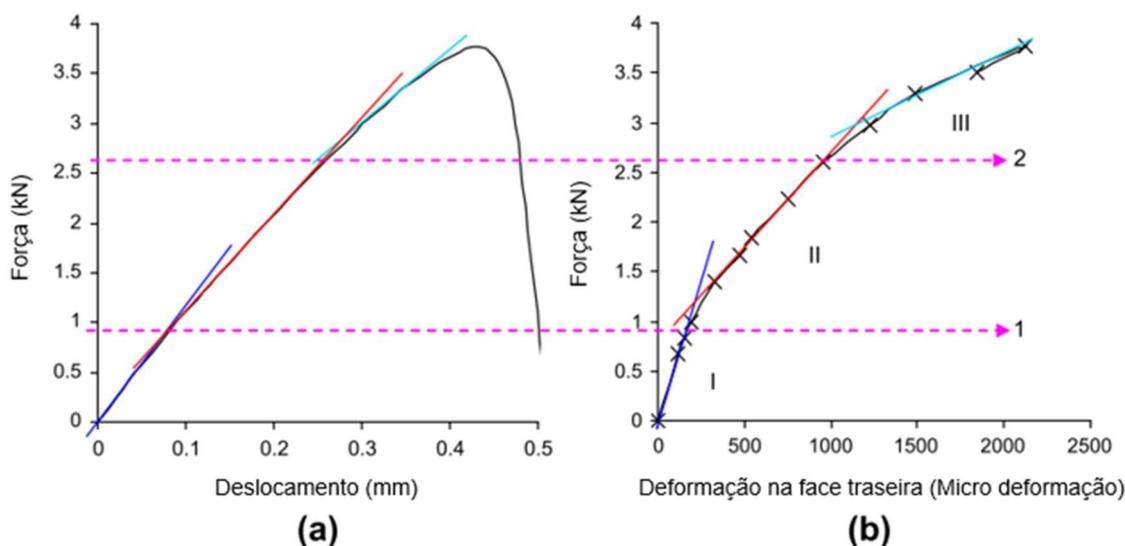
Os autores segmentaram a curva em três regiões, em função do tamanho da trinca:

- a) Região I: sem trincas detectáveis,
- b) Região II: a trinca é suficientemente grande para ser detectada e apresenta crescimento estável. Nesta região é percebida pequena mudança na inclinação da curva (no ponto 2 do diagrama mostrado na Fig. 23b).
- c) Região III: observa-se nova variação de inclinação da curva (no ponto 3). Nesta região a trinca cresce rapidamente até a falha final (ponto 4).

A Figura 24 mostra que os diferentes estágios de propagação de trincas observadas no adesivo também estão presentes na curva de deformação propiciada pelos *strain-gauges*. A Fig. 24(a) mostra a curva força vs. deformação do ensaio da junta, ao passo que a Fig.24(b) mostra a curva força vs. deformação na face do aderente (fornecida pelos *strain-gauges*).

Por fim os autores reportam ainda que a região do aderente, próxima ao final da camada adesiva, apresenta início de deformação plástica aproximadamente no ponto 2 da Fig.23(b). Este ponto está dentro da Região III na Fig.24, logo acima da linha tracejada 2.

**Figura 24.** Correlação entre (a) curva força vs. deslocamento com (b) força vs. deformação na face traseira do aderente

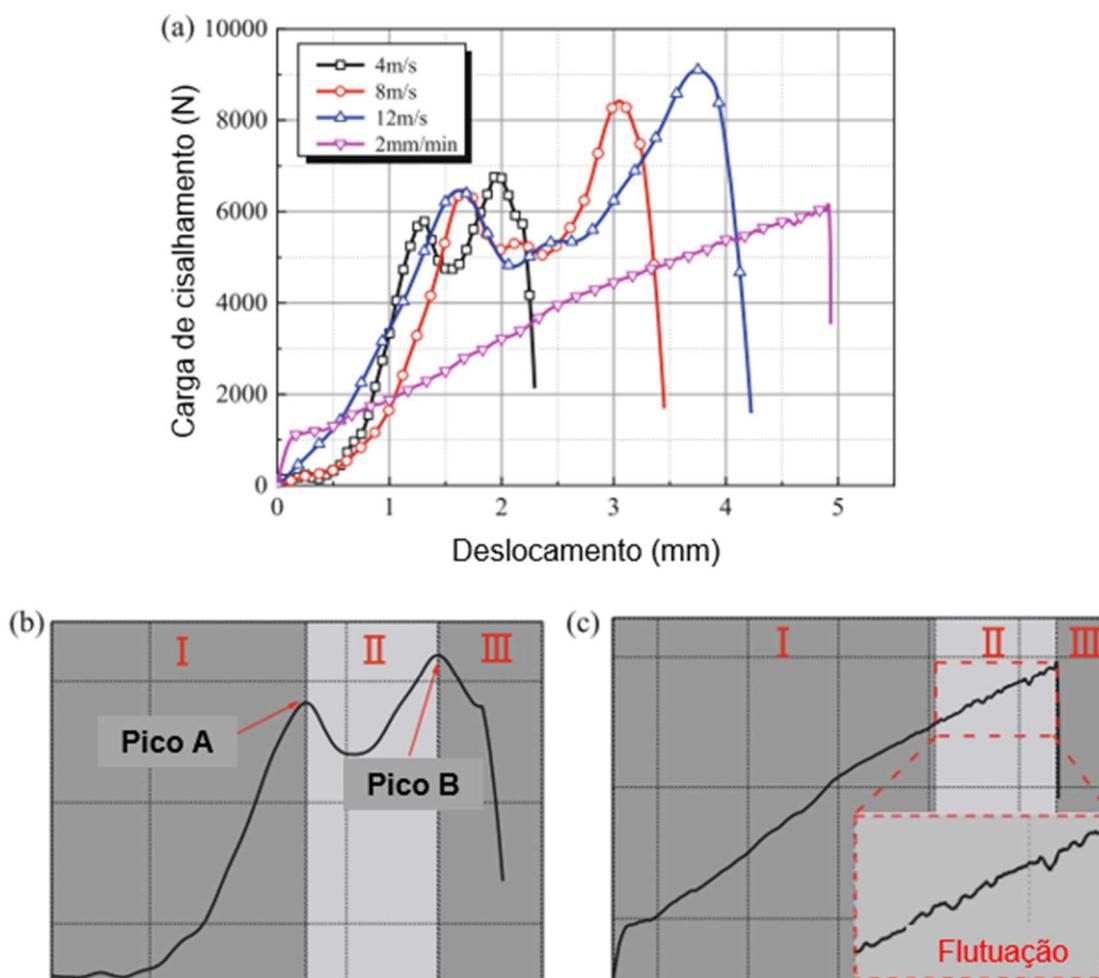


Fonte: adaptado de Sugiman, Crocombe e Aschroft [29]

Segundo Wang et al. [27], o mecanismo de nucleação e crescimento de trincas pode ser dividido em três regiões no gráfico de tensão vs. deslocamento. Por meio da Figura 25, contendo as curvas obtidas com diferentes velocidades de ensaios, são observadas três regiões:

- Região I: representa o início da concentração de tensão próximo ao aderente de alumínio (menos rígido) devido à deformação plástica do mesmo;
- Região II: onde há flutuação da tensão, ocasionada por falhas locais e pelo crescimento de trincas através da área adesiva;
- Região III: na qual ocorre a falha catastrófica da junta.

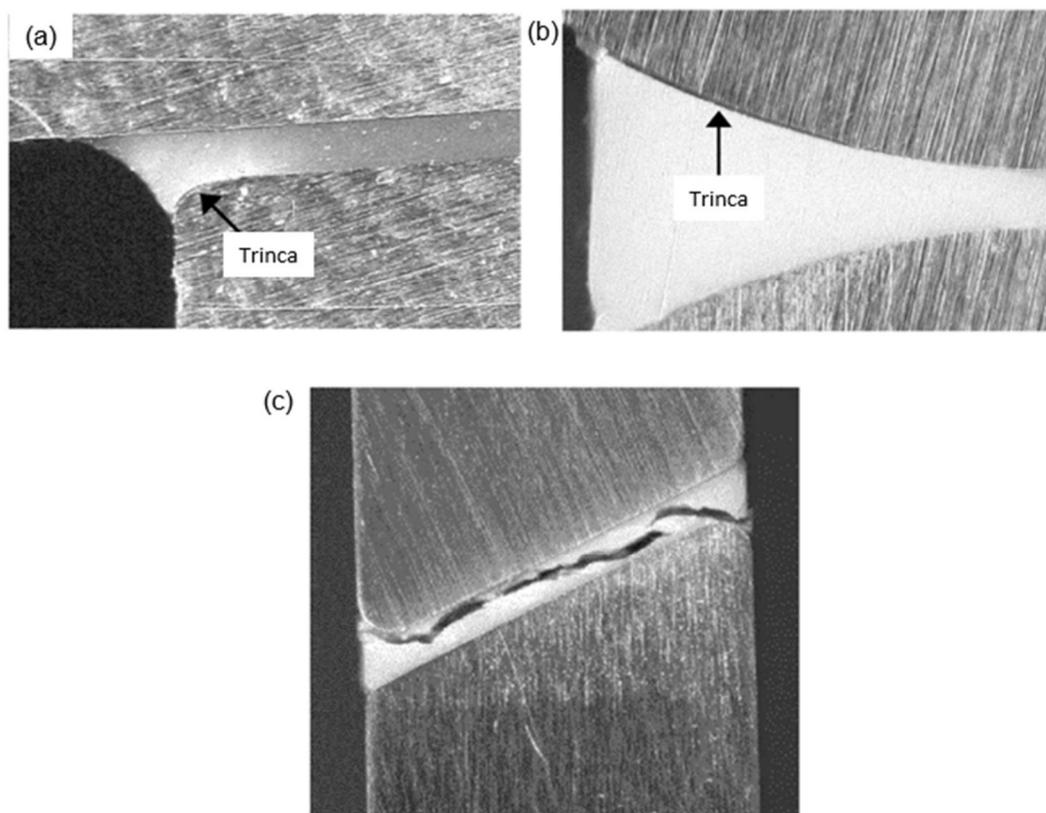
**Figura 25.** Correlação (a) entre as curvas cisalhamento vs. deslocamento para várias velocidades de deformação; (b) e (c) identificação dos picos de concentração de tensão para ensaio rápido e lento, respectivamente.



Fonte: adaptado de Wang et al. [27]

A nucleação de trincas costuma ocorrer nas extremidades da junta adesiva. As Figuras 26(a) e 26(b) ilustram trincas que apresentaram crescimento a partir de uma das extremidades de uma junta de sobreposição simples e junta T, respectivamente. Nestes pontos há natural concentração de tensões e, portanto, há maior probabilidade de iniciação de trincas. O caminho percorrido por uma trinca numa junta chanfrada é demonstrado na Fig. 26(c) [9].

**Figura 26.** Exemplos de trincas em (a) junta de sobreposição simples (b) Junta T e (c) Junta chanfrada



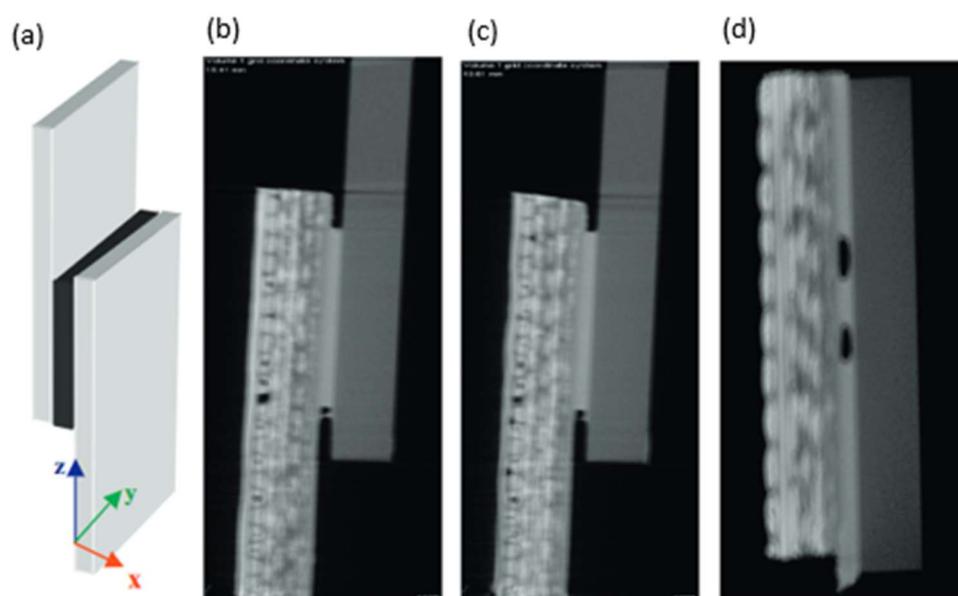
Fonte: adaptado de Dean et al. [9]

Di Bella et al. [30] realizaram um estudo no qual foram avaliados dois tipos de adesivos (A1 e A2) e dois selantes (B1 e B2), bem como substratos distintos, formando juntas com as configurações de pares de aderente: a) Vidro e GFRP (polímero de fibra de carbono reforçado); b) GFRP e PMMA (Placa de Acrílico) e, por fim, c) AISI 316 e PMMA. Por meio de ensaios de cisalhamento, os autores avaliaram o comportamento e a qualidade das uniões. Observou-se que o desempenho das juntas foi influenciado pela natureza da falha, e que as tensões suportadas pelas juntas com selante foram maiores. A grande dispersão de resultados observada foi atribuída à quantidade de defeitos apresentados na camada adesiva e na região de interface entre adesivo e

substrato. A natureza das falhas pode ser correlacionada com os vazios encontrados nas tomografias, ocasionados no processo de fabricação, como também pela deformação de um dos substratos enquanto outro permanecia em seu estado natural.

A Figura 27 ilustra defeitos encontrados por Di Bella et al. [30] por meio da técnica da tomografia. Nas Figuras 27(b) e Fig. 27(c), obtidas sobre o plano xz, é observado um pequeno defeito na extremidade do adesivo. Já a Fig. 27(d) mostra imagem do plano xy, onde é observada a presença de dois vazios.

**Figura 27.** (a) Corpo de prova com sistema de coordenadas (b) e (c) vista frontal e (d) vista superior das imagens obtidas por tomografia.



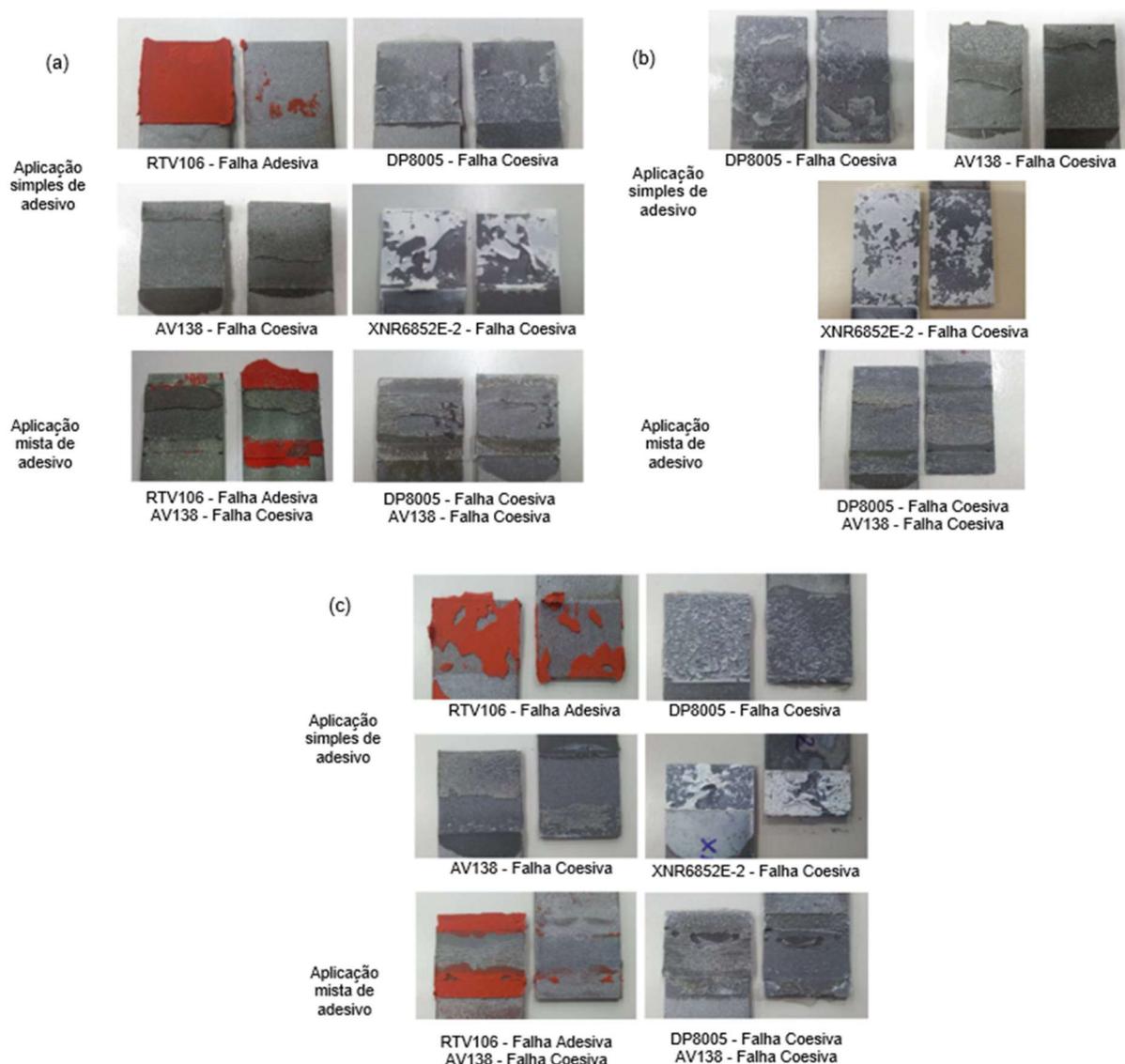
Fonte: adaptado de Di Bella et al. [30]

Um resultado interessante foi reportado por Silva et al. [23] em seu trabalho envolvendo corpos de prova com dois tamanhos de sobreposição. Os autores observaram que o modo de falha, em teste estático, não foi dependente do tamanho de sobreposição das juntas analisadas. Os autores também realizaram testes de impacto, nos quais foi observado mesmo modo de falha. A comparação das falhas encontradas está disposta na Figura 28.

Conforme Da Silva et al. [4] tratamentos de superfície influenciam no modo de falha. Foram realizados pelos autores três formas de tratamentos, sendo um deles mecânico e os outros dois químicos. O tratamento mecânico consistiu na limpeza da superfície com acetona, seguida pelo lixamento com abrasivo #180 e, como última

etapa, nova limpeza com acetona anterior à aplicação do adesivo. As juntas que passaram pelo tratamento apresentaram falhas predominantemente coesivas. Os tratamentos químicos consistiram no depósito de uma camada superficial sobre o aderente. Devido à camada cristalina formada sobre os aderentes, houve predominância de falhas adesivas.

**Figura 28.** Modo de falha dos corpos de provas testados: (a) cisalhamento (sobreposição 25 mm) (b) cisalhamento (sobreposição 50 mm) e (c) teste de impacto (sobreposição 25 mm)



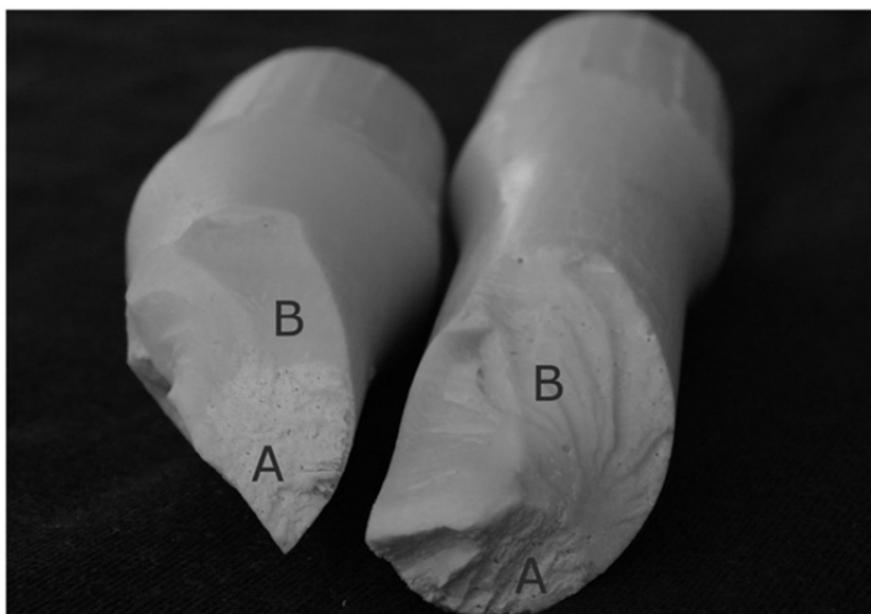
Fonte: adaptado de Silva et al. [23]

A adição de materiais para melhorar o desempenho do adesivo, pode ocasionar mudanças do comportamento em falha, como foi constatado por Sadigh e Marami [26]. Segundo os autores, o adesivo em seu estado puro apresentou modo de falha coesivo, porém, quando adicionado ao elemento RGO o modo passou a ser misto

(coesivo + adesivo). Contudo o elemento de adição causou aumento de resistência, não apresentando indícios de alteração nas propriedades de adesão. Portanto a alteração do modo de falha pode ter sido causado pela preparação inadequada da superfície.

Apesar da predominância do comportamento dúctil, adesivos podem apresentar fraturas frágeis, de forma similar ao que acontece em materiais metálicos. Com intuito de obter propriedades de material, García el al [13] realizaram ensaios mecânicos de tração e de cisalhamento com corpos de prova produzidos totalmente com o material adesivo (*bulk specimens*). O teste de cisalhamento consistiu no ensaio de torção do corpo de prova. A superfície de fratura apresentou regiões de fratura dúctil e frágil, como pode ser observado na Figura 29. A região A, onde houve falha dúctil, tem indícios da presença de várias micro trincas, as quais, com o aumento da tensão e deformação, cresceram até o tamanho crítico. Ao ter sido atingida esta condição, houve o desencadeamento da fratura frágil (região B).

**Figura 29.** Superfície de fratura resultante do ensaio de torção.



Fonte: adaptado de García el al [13].

### 3.3 MODELAGEM DE JUNTAS ADESIVAS

Segundo Quan e Alderliesten [31], é usual empregar o modelo de Von Mises para simular o comportamento plástico de materiais adesivos, devido à sua

simplicidade. Contudo os resultados experimentais mostram que a tensão de escoamento efetiva de materiais adesivos é influenciada pelo valor da tensão hidrostática, fenômeno que não é previsto no modelo de Von Mises.

Por esse motivo, análises com requisitos mais elevados de exatidão empregam o modelo de plasticidade de Drucker-Prager [32], o qual leva em consideração o efeito da pressão hidrostática na tensão de escoamento.

Por fim, como alternativa ao modelo de Drucker-Prager, Raghava [33] sugere modelos de plasticidade anisotrópica, os quais também consideram o efeito causado pela variação da tensão hidrostática.

Contudo autores como Quan e Alderliesten [31], Dean e Crocker [34] entre outros [9,13,35–43] apresentam resultados numéricos, baseados no modelo de Drucker-Prager, de elevada concordância com dados experimentais. Portanto o emprego de modelos baseados na anisotropia plástica aparentemente não se justifica.

O modelo de Drucker-Prager apresenta duas versões: linear e exponencial. O modelo linear necessita de menor número de parâmetros mecânicos, que devem ser obtidos experimentalmente. Em contrapartida o modelo exponencial proporciona melhor concordância no caso de materiais de comportamento complexo. Tais modelos são explicados em sequência.

### 3.3.1 MODELO DE DRUCKER-PRAGER EXPONENCIAL

Adesivos são geralmente caracterizados por sua resposta não-linear. Dentro da região não-linear, a deformação total é a soma das deformações elásticas e plásticas, e as relações de tensão *vs.* deformação seguem três conceitos fundamentais [35]:

- 1) Critério de escoamento: determina a tensão necessária para o início da deformação plástica;
- 2) Regra de endurecimento: especifica a variação da condição de escoamento inicial no processo de deformação plástica contínua;
- 3) Lei de Fluxo Plástico: representa a variação da deformação plástica em termos de tensão.

Como já mencionado, o modelo de Drucker-Prager leva em consideração o efeito da pressão hidrostática. No *software* ABAQUS as duas versões do modelo estão disponíveis: Drucker-Prager Linear (DPL) e Estendido (DPE) [44].

O critério de escoamento relacionado ao modelo DPL é descrito como [31]:

$$\sigma_e + \sigma_m \mu - \sqrt{3} \sigma_s = 0 \quad (1)$$

Nessa equação,  $\sigma_e$  é a tensão efetiva de Von Mises,  $\sigma_m$  representa a pressão hidrostática,  $\mu$  é o parâmetro que correlaciona a pressão hidrostática e a tensão de escoamento e, por fim,  $\sigma_s$  é tensão de escoamento em cisalhamento.

A Equação (1) é idêntica àquela empregada no *software* ABAQUS, porém, com uma notação diferente:

$$q = d + p(\tan\beta) \quad (1a)$$

Na qual:  $q = \sigma_e$ ,  $p = -\sigma_m$ ,  $\tan\beta = \mu$  e  $d = \sqrt{3}\sigma_s$ .

O parâmetro  $\mu$  depende do material adesivo e caracteriza o nível de sensibilidade do escoamento em relação à pressão hidrostática. Tal parâmetro pode ser determinado por meio de testes em diferentes condições de tensão. Utilizando as tensões de escoamento obtidas em testes de tração e de cisalhamento [34]:

$$\mu = 3 \left[ \sqrt{3} \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_T} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

Na qual  $\sigma_s$  é a tensão plástica de cisalhamento e  $\sigma_T$  é a tensão plástica de tração.

No caso de testes de compressão e de cisalhamento:

$$\mu = 3 \left[ 1 - \sqrt{3} \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_C} \right) \right] \quad (3)$$

Na qual  $\sigma_C$  é a tensão plástica de compressão.

Por fim, no caso de testes de compressão e de tração:

$$\mu = \frac{3 \left[ \left( \frac{\sigma_C}{\sigma_T} \right) - 1 \right]}{\left[ \left( \frac{\sigma_C}{\sigma_T} \right) + 1 \right]} \quad (4)$$

Já o modelo DPE pode ser representado como [31]:

$$a\sigma_e^b + \sigma_m - p_t = 0 \quad (5)$$

Na qual  $a$  é a propriedade do material levando em consideração a pressão hidrostática na tensão de cisalhamento,  $b$  é o expoente,  $p_t$  é o parâmetro representando a resistência à tensão hidrostática.

Este critério é implementado no Abaqus com o expoente  $b$  igual a 2. O critério de escoamento é então expresso na forma [34]:

$$aq^2 = p + p_1 \quad (6)$$

Renomeando:  $q = \sigma_e$ ,  $p = -\sigma_m$  e  $p_1 = p_t$ .

Os parâmetros  $a$  e  $p_1$  são os seguintes:

$$a = \frac{1}{3\sigma_T(\lambda-1)} \quad \text{e} \quad p_1 = a\lambda\sigma_T^2. \quad (7)$$

Nas quais  $\lambda$  é outro parâmetro de sensibilidade à pressão hidrostática, que pode ser obtido por meio das tensões de escoamento  $\sigma_C$ ,  $\sigma_S$ ,  $\sigma_T$  da seguinte forma:

$$\lambda = \frac{\sigma_C}{\sigma_T} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{\sigma_C^2}{3\sigma_S^2} \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{3\sigma_S^2}{\sigma_T^2} \quad (10)$$

As tensões de escoamento  $\sigma_C$ ,  $\sigma_S$ ,  $\sigma_T$  são obtidas por meio das curvas tensão vs. deformação dos respectivos ensaios. Contudo estas curvas necessitam ser preparadas para que apresentem apenas a parte correspondente do regime plástico.

Caso haja baixa influência da deformação plástica sobre o parâmetro  $\lambda$ , haverá convergência para valores próximos entre si. Neste caso pode ser usado para  $\lambda$  um valor médio, obtido no intervalo de deformações plásticas de interesse [33]. Um valor de  $\lambda$  não unitário é uma evidência de dependência de critério de escoamento em relação à tensão hidrostática [10].

Quando o parâmetro  $b$  é considerado igual a 2 (valor recomendado para adesivos) e o material não apresenta sensibilidade à tensão hidrostática ( $\lambda = 1$ ) a equação do critério de Drucker-Prager se transforma na equação de Von Mises [10].

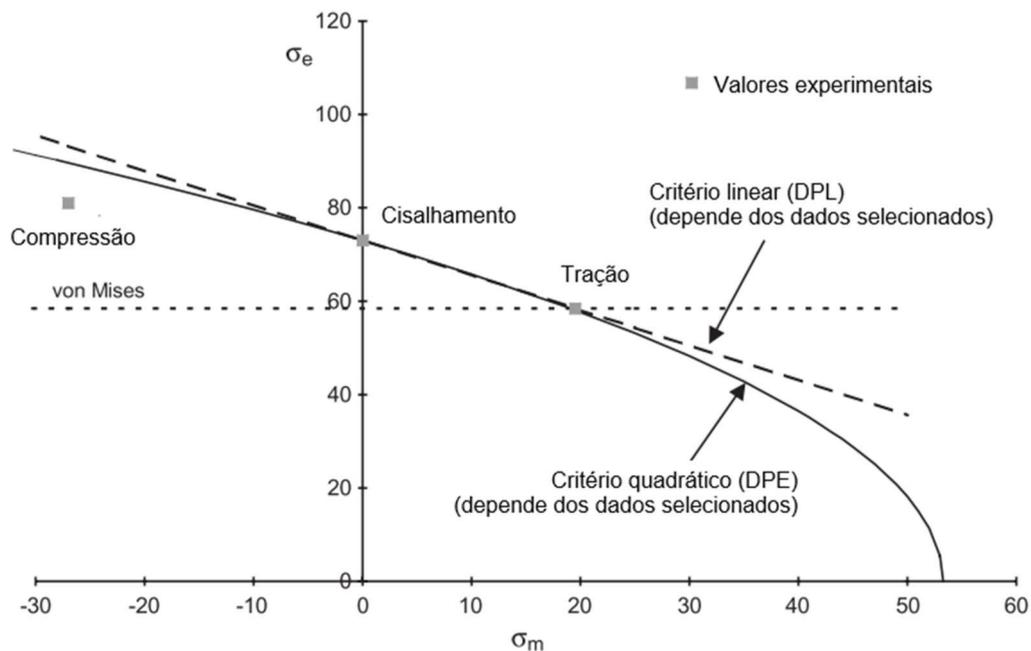
O ângulo de dilatação descreve a orientação do vetor de fluxo plástico numa deformação puramente desviatória [15], definindo o ângulo de inclinação da superfície de ruptura em relação ao eixo hidrostático, medido no plano meridional. Utilizando o coeficiente de Poisson plástico ( $\nu_p$ ), o ângulo de dilatação é definido pela seguinte equação:

$$\tan \psi = \frac{3(1 - 2\nu_p)}{2(1 + \nu_p)} \quad (11)$$

A caracterização em modo misto de carregamento permite a geração da superfície de escoamento do adesivo no plano hidrostático vs. Von Mises, permitindo desenvolver melhores modelos para simulação de adesivos [1].

Dean et al. [9] traçaram as curvas dos modelos de Drucker-Prager Exponencial (DPE) e Drucker-Prager Linear (DPL), as quais foram obtidas por meio das Equações (6) e (1), comparando-as com a curva de Von Mises. O resultado é mostrado na Figura 30.

**Figura 30.** Comparação dos modelos Drucker-Prager Linear e Drucker-Prager Exponencial com o modelo de von Mises



Fonte: Adpatado de Dean et al. [9]

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO MATERIAL

Segundo da Silva e Campilho [6], para prever a resistência mecânica de uma junta, deve ser obtida a distribuição das tensões e aplicado um critério de falha adequado. A distribuição de tensão pode ser obtida por uma análise de Elementos Finitos (EF) ou por um modelo fechado. O método de EF é empregado em casos onde haja complexidade de geometria e de comportamento dos materiais. Os modelos de falha mais simples são aqueles fundamentados na mecânica do contínuo, nos quais é estabelecido um estado limite de tensão ou de deformação. Os princípios da Mecânica da Fratura também podem ser usados em análises de elementos finitos, quer seja na forma do fator de intensidade de tensões ou de energia potencial (parâmetro de Griffith ou Integral J). Uma extensão dessa abordagem é a modelagem do dano em elementos da zona coesiva, o qual também permite estimar o que ocorre na região logo adiante da ponta da trinca.

Cada modelo de falha (quer esteja seja baseado na mecânica do contínuo, mecânica da fratura ou no dano da zona coesiva) emprega um conjunto específico de parâmetros mecânicos, os quais devem ser levantados experimentalmente. Tais

experimentos, por sua vez, devem ser realizados de forma a ressaltar a propriedade ou comportamento que se deseja medir, tanto quanto possível, mitigando efeitos parasitas, como por exemplo, a própria geometria do corpo de prova ou da junta.

Ressalta-se que qualquer modelo de análise necessita de uma relação constitutiva efetiva do adesivo, ou seja, de sua curva tensão vs. deformação real. Porém o comportamento mecânico do adesivo é não linear e, na região plástica, ocorre endurecimento por deformação, bem como intensos efeitos transversais (caracterizados pelo coeficiente de Poisson).

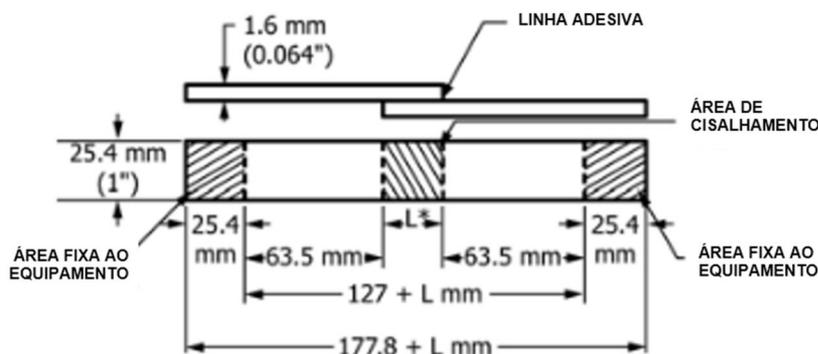
As propriedades mecânicas podem ser obtidas de forma estática ou dinâmica, podendo-se atingir a ruptura do material ou não. Propriedades como módulos elásticos, tensão e deformação no escoamento, tensão máxima, entre outros, podem ser obtidas sem ruptura do material. Por outro lado, para obter parâmetros como a tensão ou deformação na ruptura, a resistência ao impacto e número de ciclos de vida em fadiga, é necessário atingir o limite da resistência destrutiva do material [45].

Para que implementar o modelo de Drucker-Prager é necessário que sejam realizados alguns ensaios para a caracterização do material. Organizações regulamentadoras, por exemplo, ASTM (*American Society for Testing and Materials*), BS (*British Standard*) e ISO (*International Organization for Standardization*), desenvolveram diversas normas para obter os parâmetros necessários, estabelecendo procedimentos de ensaios, corpos de prova e cálculos para obtenção dos parâmetros. Utilizaremos como base as normas ASTM.

#### 3.4.1 ENSAIO DE CISALHAMENTO

Trata-se de testes voltados à medição da resistência do adesivo ao esforço de corte. Os corpos de prova possuem configurações simples e são de fácil fabricação. A norma ASTM D1002-10 (2019): *Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*, cujo espécimen padrão é mostrado na Figura 31, rege este tipo de ensaio. Porém a configuração de junta sobreposta, por possuir uma excentricidade, naturalmente sofre momento secundário, o qual, como já observado, causa tendência ao arranque (*peel*).

**Figura 31.** Corpo de prova utilizado pela norma ASTM D1002-10

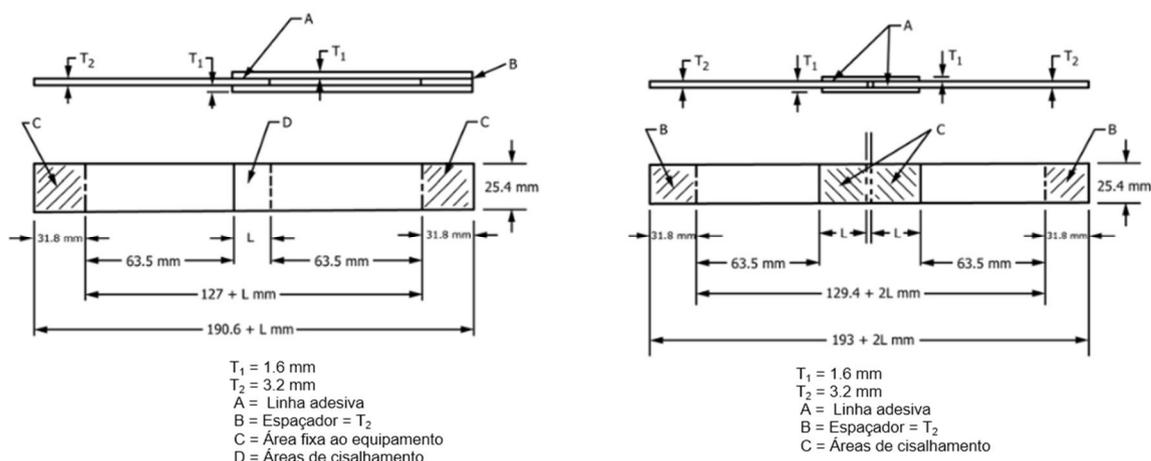


$L^*$  = comprimento de sobreposição, pode variar de acordo com o projeto  
 $L$  = comprimento de sobreposição definida

Fonte: adaptado da norma ASTM D1002-10 (2019) [46]

A norma ASTM D3528-96 (2016): *Standard Test Method for Strength Properties of Double Lap Shear Adhesive Joints by Tension Loading* tem por objetivo a determinação da resistência ao cisalhamento por meio de corpos de prova nos quais o momento secundário é muito pequeno. Os corpos de prova utilizados podem ser construídos conforme a Figura 32.

**Figura 32.** Corpos de prova utilizados pela norma ASTM D3528-96

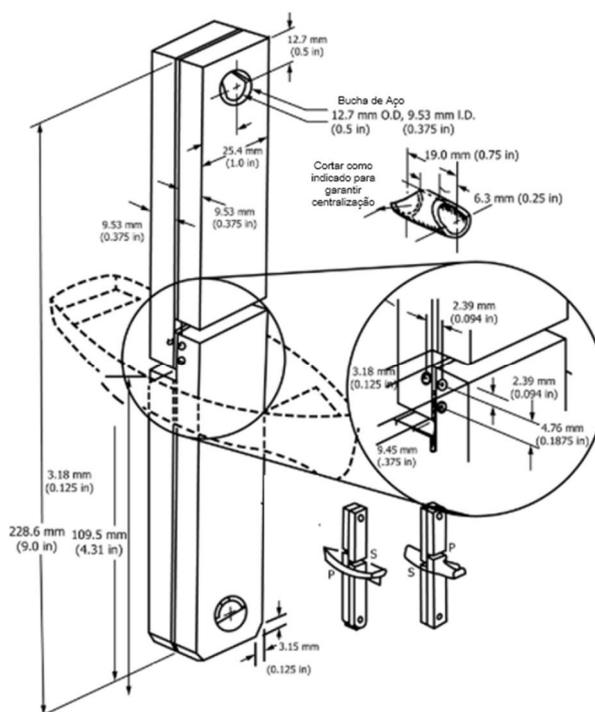


Fonte: adaptado de ASTM D3528-96 (2018) [47]

Por fim, a curva tensão-deformação em cisalhamento, e conseqüentemente a resistência ao cisalhamento, podem ser obtidas por meio de ensaio segundo a norma ASTM D5656-10 (2017): *Standard Test Method for Thick-Adherend Metal Lap-Shear Joints for Determination of the Stress-Strain Behavior of Adhesives in Shear by Tension Loading* [48], a qual abrange os corpos de prova com aderente espesso. Tais

corpos de prova, conhecidos como TAST (*thick adherend shear test*), são mostrados na Fig. 33. O emprego de chapas relativamente espessas visa reduzir os esforços secundários.

**Figura 33.** Corpo de prova utilizado pela norma ASTM D5656-10



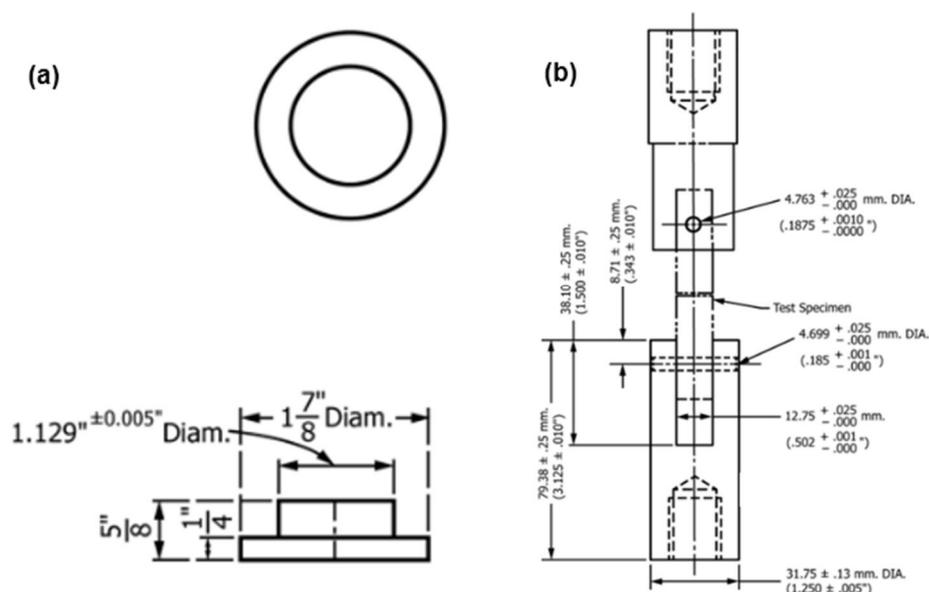
Fonte: Adaptado de ASTM D5656-10 (2017) [48]

### 3.4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Trata-se de testes com objetivo de avaliar o comportamento do material quando tracionado. Parâmetros como o módulo de elasticidade e a resistência ao escoamento e à ruptura são obtidos, assim como a própria curva tensão versus deformação.

Os códigos ASTM D897-08 (2016) e D2095-99 (2015) são exemplos de normas empregadas com esse objetivo. Os corpos de provas utilizados são cilíndricos para a norma D897 (Fig. 34(a)), e para D2095 podem ser em barras ou cilindros (Fig. 34(b)).

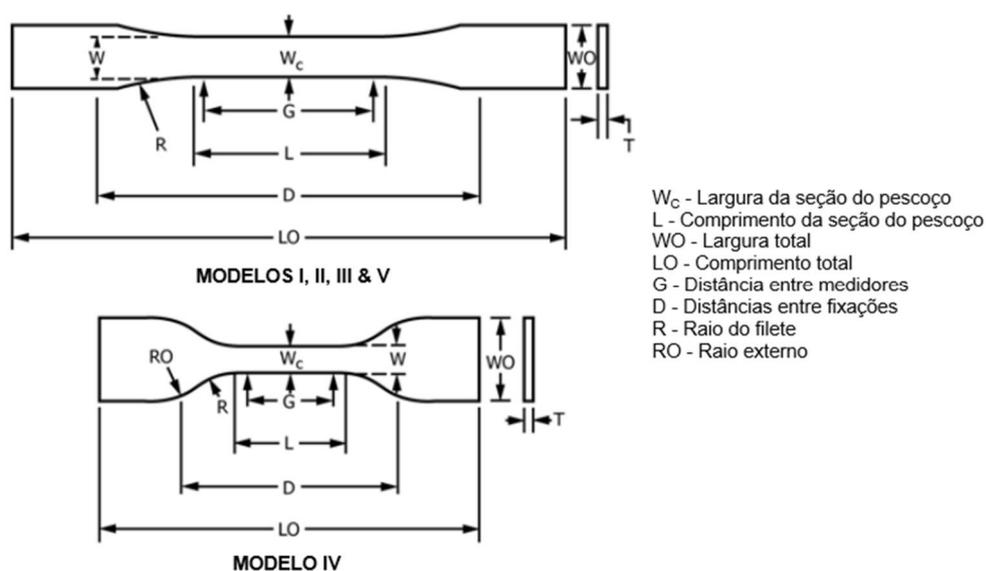
**Figura 34.** Corpos de prova utilizados pelas normas ASTM D897-08 e D2095-99



Fonte: adaptado de ASTM D897-08 (2016) [49] e ASTM D2095-99 (2015) [50]

Também é possível obter os parâmetros necessários por meio de corpos de prova confeccionados inteiramente do material a ser testado, chamados de *Bulk Specimens* ou *Dog-Bone Specimens*. A norma de código ASTM D638-14 (2022) [51] é responsável por reger geometrias de corpos de prova divididos em modelo I, II, III, IV e V. Estas geometrias estão representadas na Figura 35.

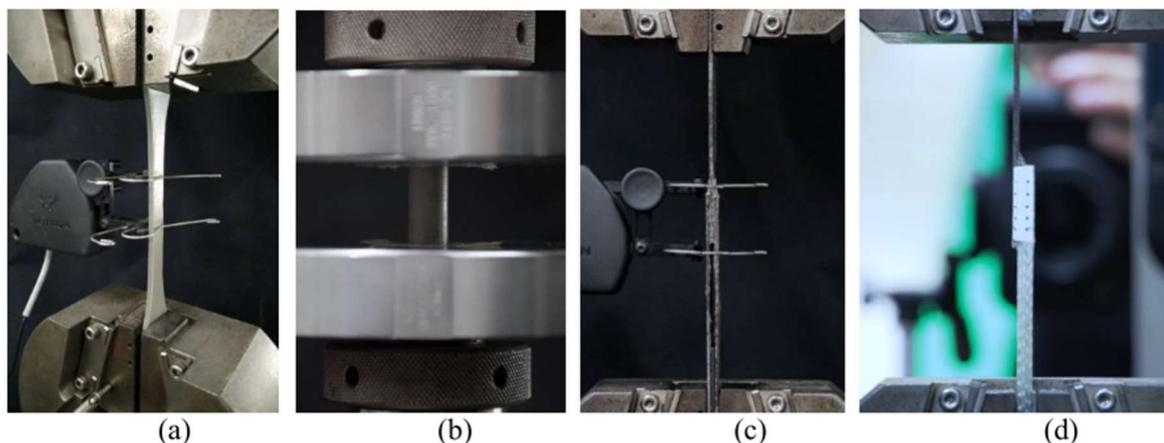
**Figura 35.** Corpos de prova utilizados pela norma ASTM D638-14



Fonte: adaptado de ASTM D638-14 (2022) [51]

Alguns ensaios descritos anteriormente são exemplificados na Figura 36.

**Figura 36.** Exemplos de aplicação dos testes (a) Teste de tração, (b) Teste de Compressão, (c) Teste de cisalhamento com Junta de sobreposição dupla e (d) Teste de cisalhamento com Junta de sobreposição Simples



Fonte: adaptado de Suwanpakpraek, Patamaprohm e Chaikittiratana [52]

Modelos de corpos de prova para caracterização, com adaptações às normas, são discutidos por Da Silva et al. [53], Da Silva, Adams e Gibbs [54], Da Silva e Adams [55], Baldan [12] e Jouan e Constantinescu [56]. Um corpo de prova alternativo que possibilita caracterização mecânica em tração, cisalhamento e a combinação de ambos os esforços se chama ARCAN, o qual é apresentado e detalhado por Santos e Batalha [43] e Choupani [57].

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

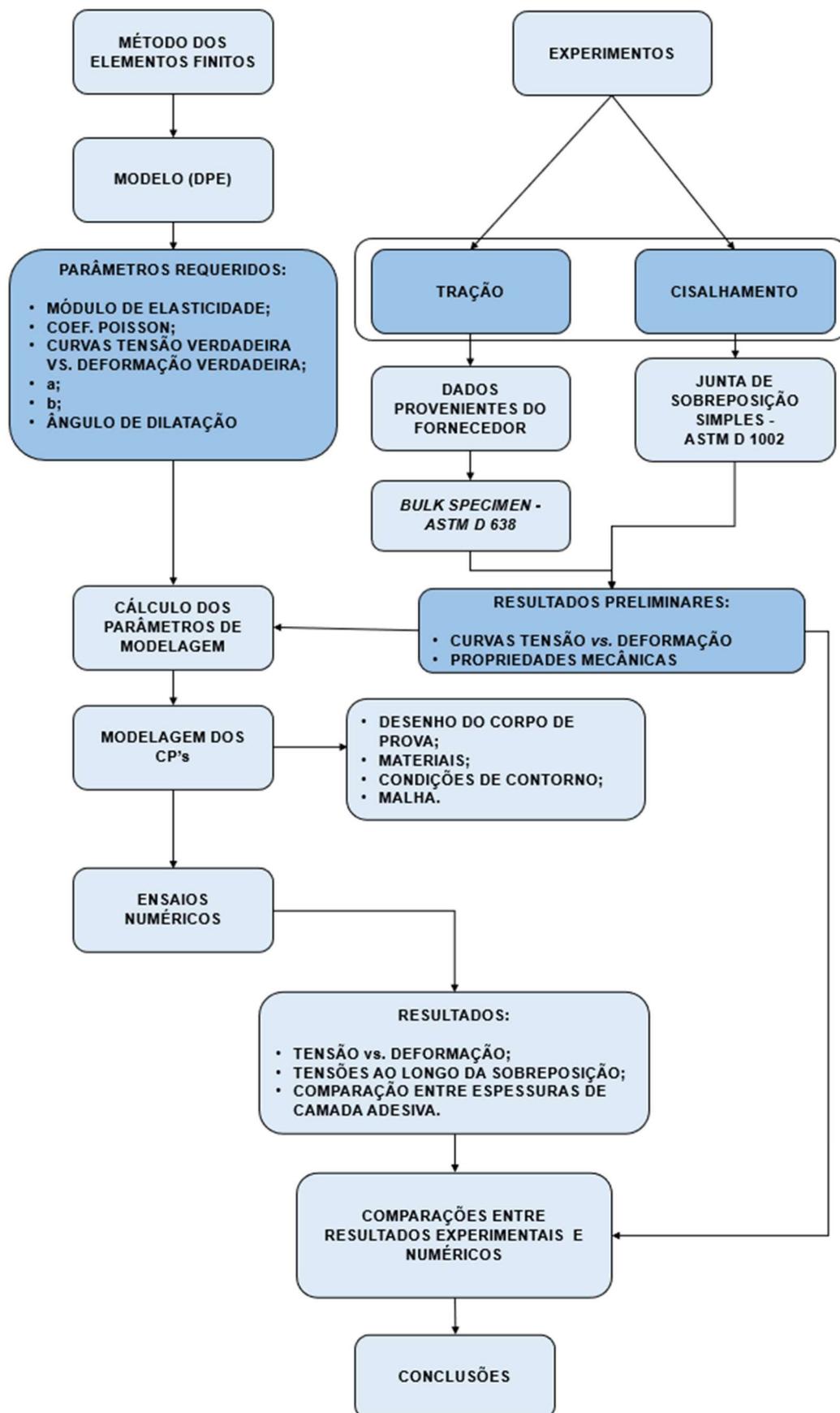
As etapas dos processos experimentais necessários e o processo numérico que foi desenvolvido consistiram em:

- a) Estudo do modelo Drucker-Prager Exponencial;
- b) Levantamento dos parâmetros requeridos pelo modelo;
  - i) Elásticos
  - ii) Plásticos
- c) Processos experimentais para obtenção dos parâmetros do modelo;
  - i) Ensaio de tração
  - ii) Ensaio de cisalhamento
- d) Implementação do modelo no *software*:
  - i) Projeto do corpo de prova (CP)
  - ii) Caracterização dos materiais (aderente e adesivo)
- e) Extração de dados numéricos;
- f) Correlação entre dados numéricos e dados experimentais.

O fluxograma apresentado na Figura 37 resume os procedimentos adotados.

Neste trabalho a caracterização do material foi realizada a partir dos seguintes ensaios: a) tração em corpos de prova do adesivo (*bulk specimens*), os quais foram confeccionados em molde específico e b) cisalhamento em corpos de prova com junta sobreposta simples. Cabe aqui uma observação quanto à adequação destes ensaios, no que concerne à aplicação dos dados obtidos em análises EF. O emprego de corpos de prova maciços do material adesivo (*bulk specimens*) naturalmente conduz a resultados representativos da falha coesiva. Como o material apresenta boa homogeneidade, há tendência de nucleação e de propagação de trincas no sentido transversal à carga de ensaio. Já no ensaio de cisalhamento os resultados representam o comportamento da junta como um todo. A camada de adesivo, de pequena espessura, fica contida entre placas do aderente, as quais apresentam resistência mecânica relativamente maior. Contudo, devido à excentricidade natural de uma junta sobreposta e à baixa rigidez à flexão das delgadas placas do aderente, ocorre momento secundário e, conseqüentemente, o modo misto de tensão: tração transversal de arranque (*peel*) e cisalhamento [7].

**Figura 37.** Fluxograma metodológico empregado para implementar o modelo de análise por elementos finitos.



Os materiais de confecção dos corpos de prova para os ensaios de caracterização foram os seguintes: a) adesivo: LORD® 852/25GB e b) aderente: aço SAE J403 1008. As propriedades mecânicas relevantes para o estudo serão apresentadas nas seções subsequentes.

As simulações foram realizadas com intuito de avaliar a aplicabilidade do modelo de Drucker-Prager para a análise das juntas e validar o método por meio da comparação com resultados experimentais.

#### 4.1 ADESIVO ESTRUTURAL

O adesivo estrutural de alta performance LORD 852, empregado juntamente com o acelerador 25GB, tem base acrílica, sendo indicado na eventual substituição de juntas soldadas, rebitadas ou confeccionadas por outros métodos de união.

Segundo os dados do fabricante, que podem ser observados no anexo A, mantém as propriedades adesivas na faixa de temperaturas entre -40°C e 149°C. Além disso, possui resistência a intempéries, ácidos diluídos, graxas, óleos, umidade e radiação ultra violeta indireta. Por fim também apresenta tolerância a pequenas quantidades de óleo de usinagem.

#### 4.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO ADESIVO PARA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

Os parâmetros necessários para implementação do modelo estão resumidos na Quadro 1, como também, o método de obtenção dos mesmos.

**Quadro 1.** Parâmetros necessários ao modelo de Drucker-Prager Exponencial e método de obtenção

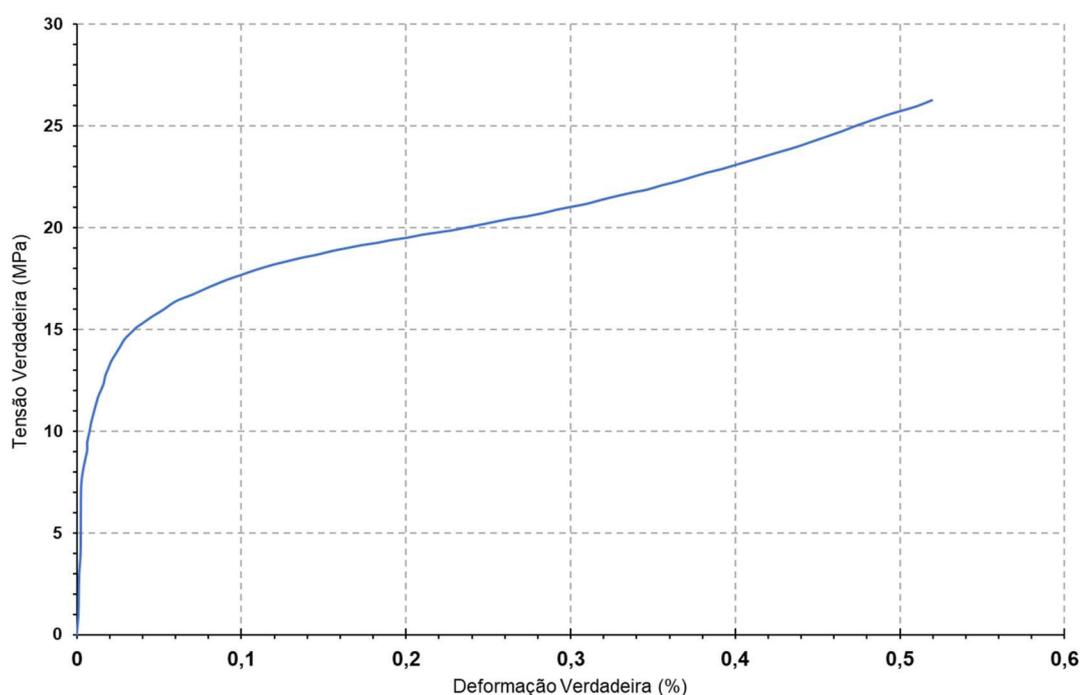
Parâmetro	Definição	Obtenção
$\sigma_T$	Tensão de Escoamento em Tração	Ensaio de Tração
$\sigma_S$	Tensão de Escoamento em Cisalhamento	Ensaio de Cisalhamento
$\lambda$	Sensibilidade a Pressão Hidrostática	Equação (10)
$\psi$	Ângulo de Dilatação	Equação (11)
$\nu_p$	Coefficiente de Poisson Plástico	Ensaio de Tração
$b$	Expoente	Convenção de artigos
$a$	Coefficiente de Sensibilidade Hidrostática	Equação (7)

#### 4.2.1 PROPRIEDADES EM TRAÇÃO

A caracterização mecânica das propriedades do material adesivo foi efetuada e fornecida pela LORD®, seguindo a norma regulamentadora ASTM D638-14, anteriormente descrita.

A curva tensão verdadeira *vs.* deformação verdadeira média, resultante do ensaio de 5 corpos de prova, é apresentada na Figura 38. Desta curva foram obtidos o módulo de Young ( $E = 862$  MPa), o Coeficiente de Poisson elástico ( $\nu = 0,42$ ) e o Coeficiente de Poisson Plástico ( $\nu_p = 0,2$ ).

**Figura 38.** Curva média tensão verdadeira *vs.* deformação verdadeira do Adesivo LORD® 852/25GB.



Fonte: LORD®

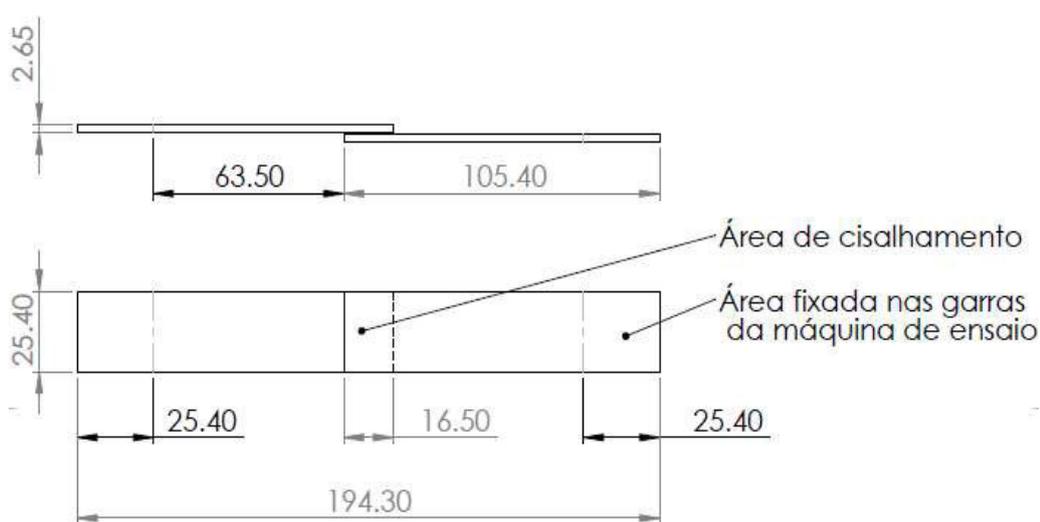
#### 4.2.2 PROPRIEDADES EM CISALHAMENTO

Os ensaios mecânicos de tração cisalhante (*lap shear*) foram realizados pela empresa Bruning Tecnometal LTDA, utilizando a máquina de ensaio universal da marca EMIC, modelo DL 200, com capacidade de 200 kN de carga.

Os corpos de prova foram concebidos com base na forma ASTM D1002-10. O dimensionamento dos corpos de prova tomou por base parâmetros relacionados a

uma aplicação de interesse da empresa. Foi adotada a espessura de aderente de 2,65 mm, correspondente à chapa utilizada na linha de fabricação, um comprimento de sobreposição de 16,5 mm e espessura da camada adesiva de 0,3 mm. Tal espessura da camada adesiva decorre da presença de microesferas de vidro, de 0,3 mm de diâmetro, na composição do adesivo 852/25GB. A presença dessas esferas espaçadoras visa garantir a exatidão necessária, em termos de espessura da camada adesiva, no momento da fabricação das juntas. A Figura 39 mostra a configuração e as dimensões principais do corpo de prova.

Figura 39. Representação da geometria e dimensões em mm do corpo de prova utilizado



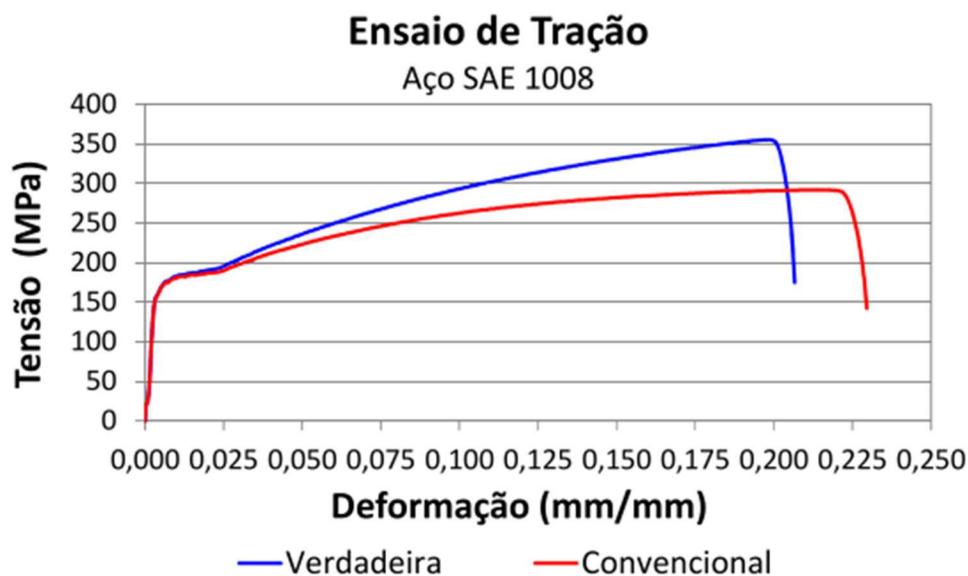
Fonte: O autor

#### 4.3 MATERIAL DO ADERENTE

O material do aderente utilizado é o aço SAE J403 1008 corresponde à chapa atualmente empregada na fabricação de para-lamas agrícolas, os quais são fixados à estrutura principal por processo de soldagem por pontos.

A curva tensão *vs.* deformação em tração, utilizada para caracterização elasto-plástica do material, foi obtida e descrita por Pinto [58] e Haag e Ferranti [59], sendo representada na Figura 40. Os autores também definiram as seguintes propriedades do material: módulo de elasticidade  $E = 190$  GPa e coeficiente de Poisson  $\nu = 0,27$ .

**Figura 40.** Curva tensão vs. deformação Aço SAE J403 1008



Fonte: adaptado de Pinto [58]

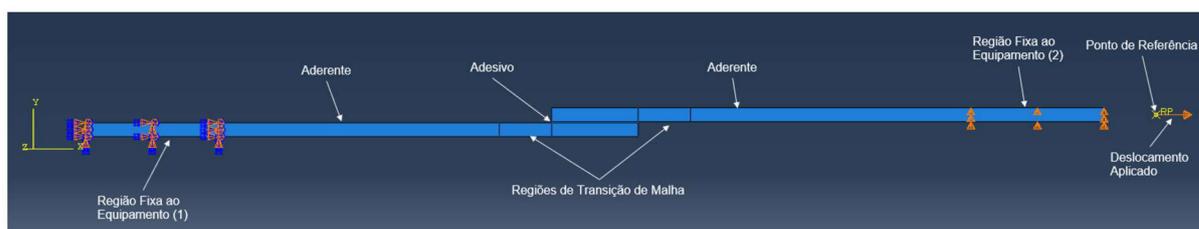
#### 4.4 MODELAGEM DE JUNTAS ADESIVAS

As dimensões dos corpos de prova utilizados para as simulações são idênticas às apresentadas na Fig. 39. Os procedimentos de modelagem numérica foram baseados nas recomendações de Özer e Öz [41], Da Silva e Campilho [6] e outros autores já citados.

##### 4.4.1 ESPECIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno foram estabelecidas de forma a obter a maior semelhança possível entre a simulação e o ensaio experimental estático. A Figura 41 mostra as restrições impostas ao modelo.

**Figura 41.** Condições de contorno adotadas.



Fonte: O autor

Seguindo exemplo de Da Silva e Campilho [6], dentre outros autores já citados, foi adotada restrição de engaste na região 1, correspondente à região de agarre do equipamento ( $U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0$ ). A região 2, também fixa ao equipamento, teve seu deslocamento em Y restrito ( $U2=0$ ). A solicitação foi definida como um deslocamento imposto no ponto de referência (RP), caracterizado como um ponto rígido conectado aos nós correspondentes na face do modelo. O valor arbitrado para este deslocamento foi de 0,5 mm, relativamente pequeno em relação ao deslocamento total do ensaio experimental.

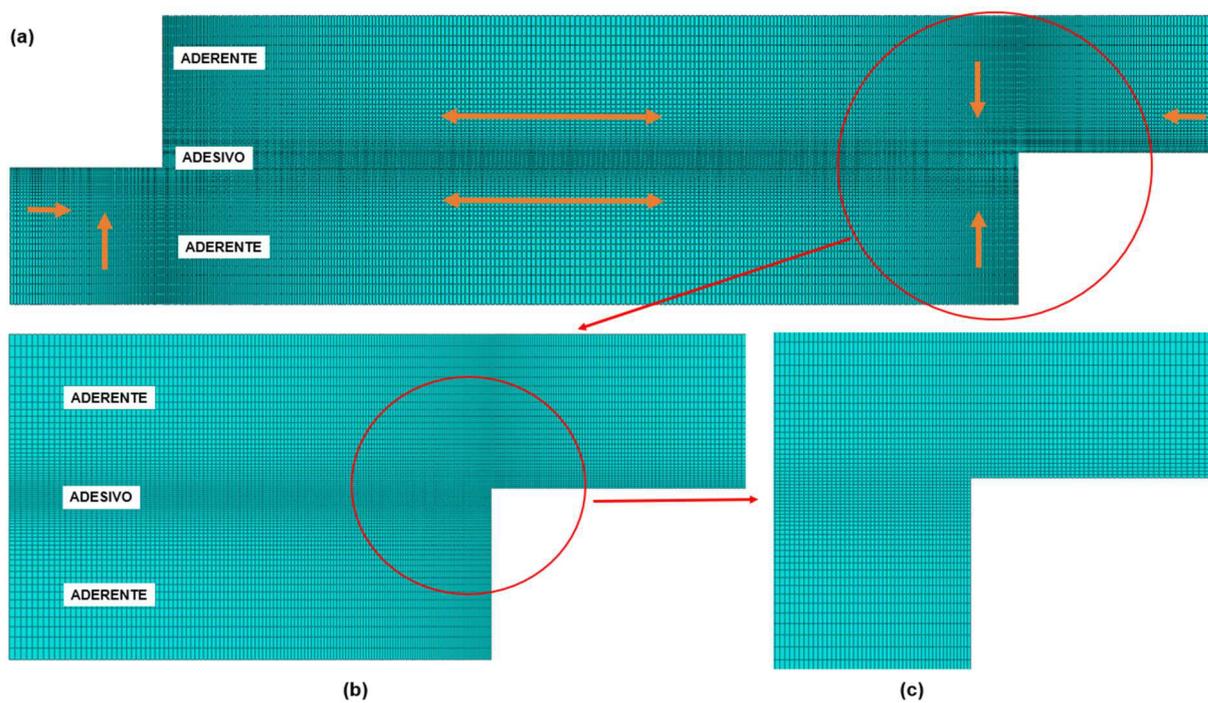
A interação entre aderentes e adesivo foi considerada nó a nó, pois as fraturas procedentes do ensaio de cisalhamento (*lap shear*) se caracterizaram pela falha coesiva do adesivo.

#### 4.4.2 GERAÇÃO DA MALHA

Na simulação de juntas contendo um adesivo dúctil submetido a grandes deformações plásticas, nas extremidades da região de sobreposição, mais especificamente numa zona de dimensão próxima a um décimo da espessura da camada adesiva, ocorrem efeitos decorrentes da singularidade. Esta, por sua vez, é ocasionada pelo ângulo reto perfeito entre a face de adesão e a face de topo do aderente. Tal efeito não é relevante durante o ensaio de corpos de prova reais [42]. Para evitar os problemas numéricos, que se traduzem em tensões e deformações extremas na região, utiliza-se o refinamento de malha localizado [6]. A Figura 42 mostra uma das malhas empregadas nas simulações, com destaque para a região com refinamento.

Como recomendado por Özer e Öz [41], foram empregados elementos com função de forma linear em estado plano de deformações com 4 nós (CPE4R), pois estes representam de forma efetiva as tensões e deformações numa junta sobreposta simples, quando esta apresenta largura da camada adesiva consideravelmente maior que sua espessura.

**Figura 42.** Refinamento de malha (a) região geral com setas indicando o sentido de diminuição do tamanho dos elementos (b) região de refinamento de malha onde ocorrem maiores concentrações de tensões e (c) aproximação da malha na extremidade da sobreposição



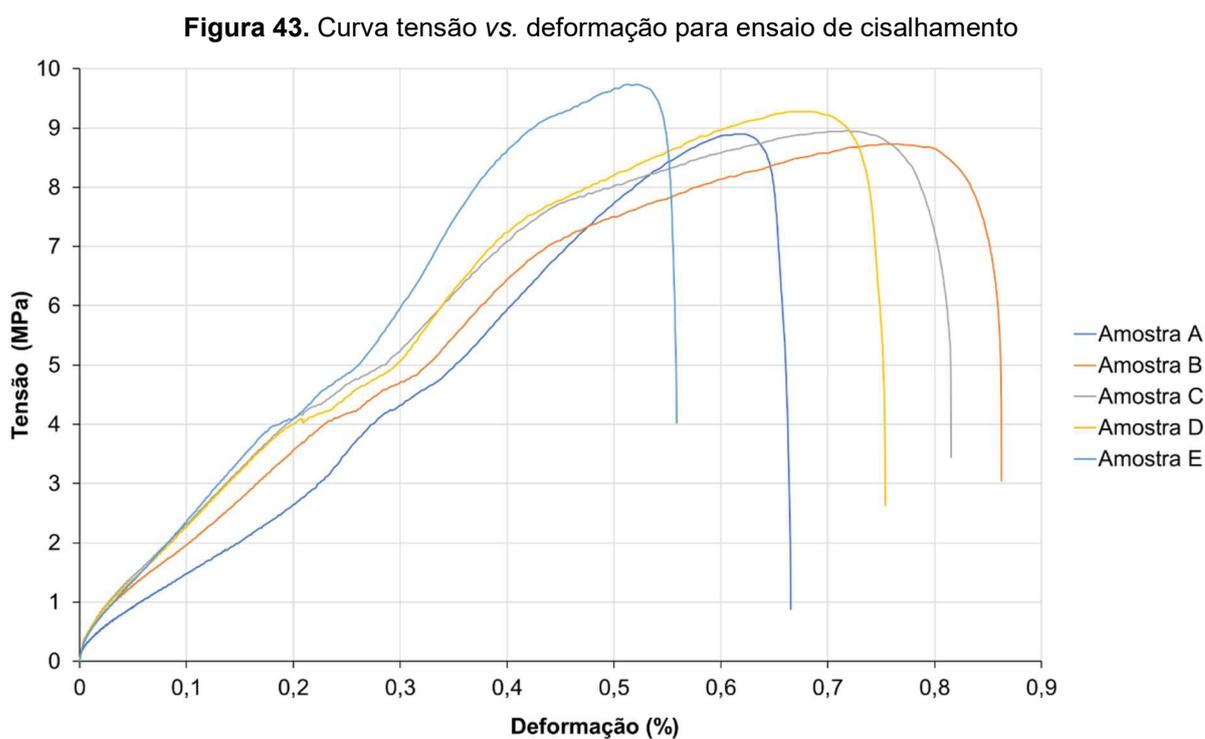
Fonte: O Autor

## 5 RESULTADOS PRELIMINARES

Nesta seção são descritos os resultados preliminares da curva tensão vs. deformação resultante do ensaio de cisalhamento. Também é explicado o uso destes resultados para a obtenção dos parâmetros necessários ao modelo numérico.

### 5.1 CURVAS TENSÃO vs. DEFORMAÇÃO EXPERIMENTAIS DE CISALHAMENTO

A Figura 43 mostra as curvas de engenharia das 5 amostras testadas no ensaio de cisalhamento da junta sobreposta simples. Os valores de tensão última de cisalhamento apresentaram certa uniformidade: média de 11,25 MPa e desvio padrão de 0,42 MPa.



As tensões e deformações verdadeiras e de engenharia estão relacionadas por meio das seguintes expressões [60]:

$$\sigma_V = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (12)$$

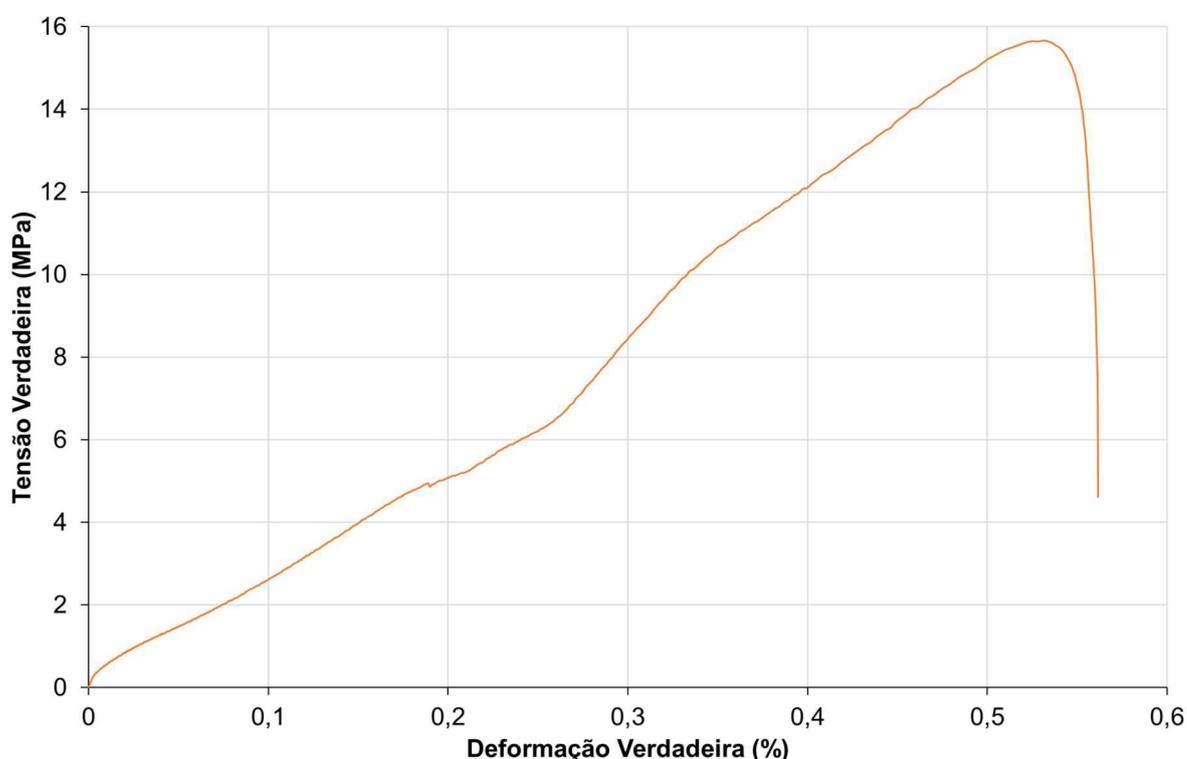
Na qual:  $\sigma_V$  representa tensão verdadeira e  $\sigma$  e  $\varepsilon$ , a tensão e a deformação de engenharia, respectivamente.

$$\varepsilon_V = \ln(1 + \varepsilon) \quad (13)$$

sendo  $\varepsilon_V$  é a deformação verdadeira.

A Figura 44 apresenta a curva média da tensão verdadeira *vs.* deformação verdadeira de cisalhamento, obtida por meio das Equações (12) e (13).

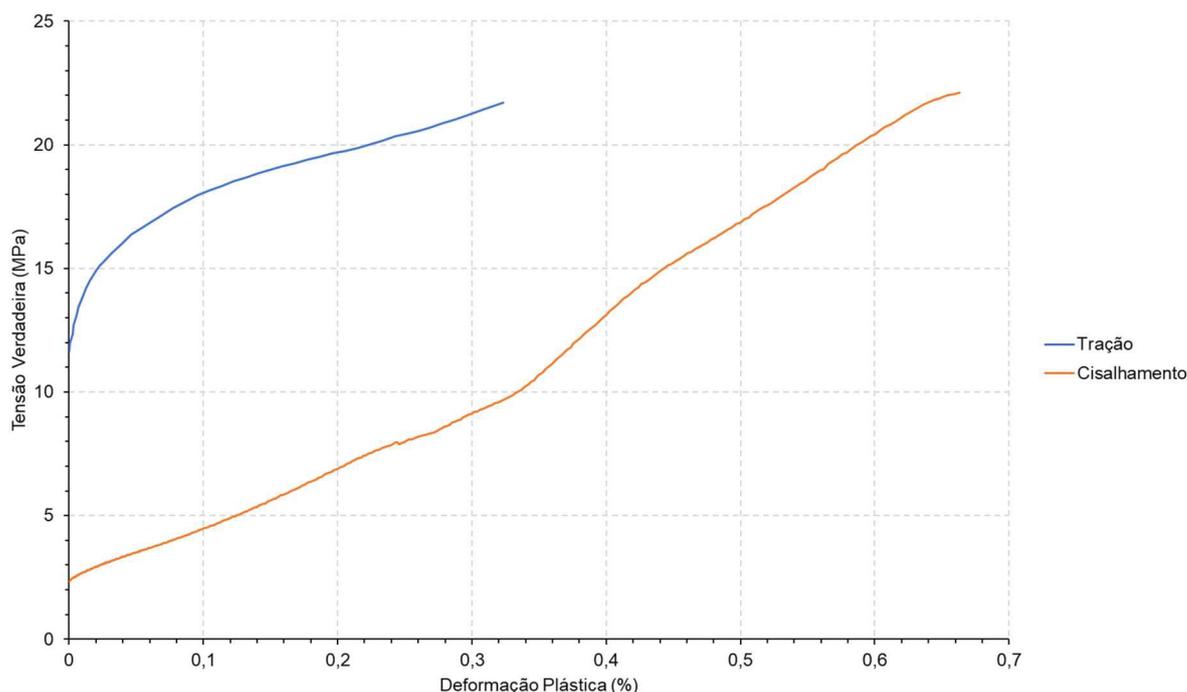
**Figura 44.** Curva tensão *vs.* deformação verdadeira de cisalhamento



Fonte: O autor

## 5.2 CÁLCULO DE PROPRIEDADES

Os parâmetros necessários à simulação devem ser obtidos a partir das curvas verdadeiras de tensão *vs.* deformação, como recomendado por Dean et al. [34] e Raghava [33]. Por esta metodologia, as curvas de tração (Fig. 40) e de cisalhamento (Fig. 44) devem ser divididas em região elástica e plástica. A parcela elástica é então subtraída, restando as respectivas curvas plásticas (verdadeiras), as quais são mostradas na Figura 45.

**Figura 45.** Parcelas plásticas da Curva Tensão vs. Deformação Verdadeira.

Fonte: O autor

Nos adesivos dúcteis, usualmente, a deformação na ruptura por cisalhamento é levemente maior do que o valor obtido em tração. O parâmetro  $\lambda$  (indicador da influência do nível de pressão hidrostática na tensão de escoamento) deve ser, portanto, determinado com base na deformação próxima à ruptura em tração ( $\varepsilon_f$ ) (e consequentemente anterior à fratura por cisalhamento) [16].

Para o cálculo da sensibilidade à pressão hidrostática  $\lambda$  foi utilizada a Equação (10), a qual requer combinação dos valores de tração e cisalhamento,  $\sigma_T$  e  $\sigma_S$ , respectivamente, na mesma faixa de deformação plástica efetiva [34].

A deformação efetiva é obtida com base na curva tensão vs. deformação plástica real, sendo calculada da seguinte forma [34]:

$$\varepsilon_e^P = \frac{2\varepsilon_e^P}{\sqrt{3}} = \frac{\gamma^P}{\sqrt{3}} = \frac{2}{3}\varepsilon_T^P(1 + \nu^P) = \frac{2}{3}\varepsilon_C^P(1 + \nu_C^P) \quad (14)$$

Na qual:  $\varepsilon_e^P$  é a deformação plástica efetiva,  $\gamma^P$  a deformação plástica de cisalhamento,  $\varepsilon_T^P$  a deformação plástica de tração,  $\nu^P$  o coeficiente plástico de Poisson,  $\varepsilon_C^P$  a deformação plástica de compressão e, por fim,  $\nu_C^P$  o coeficiente plástico de Poisson de compressão.

Uma alternativa de obtenção de  $\sigma_T$  e  $\sigma_S$  para determinação de  $\lambda$  consiste em adotar pontos ao longo das curvas de tração ( $\sigma_T, \varepsilon_T^P$ ) e cisalhamento ( $\sigma_S, \varepsilon_S^P$ ) que correspondam ao mesmo valor de trabalho plástico, ou seja:  $\sigma_T \varepsilon_T^P = \sigma_S \varepsilon_S^P$  [13]. Tal procedimento é efetivo no caso de juntas e adesivos cujas curvas tensão vs. deformação, em tração e cisalhamento, apresentam platôs relativamente paralelos na região plástica. Contudo, como pode ser observado na Figura 45, tal comportamento não condiz com o caso em estudo. Portanto há diversos valores possíveis para  $\lambda$ . Diante deste impasse foram arbitrados três conjuntos de pontos ( $\sigma_T, \varepsilon_T^P, \sigma_S, \varepsilon_S^P$ ) sobre as curvas, para os quais foi calculado o respectivo valor de sensibilidade à pressão hidrostática.

O ângulo de dilatação foi calculado por meio da Equação (11) e, para tal, foi empregado o coeficiente de Poisson plástico  $\nu^P = 0,2$ , fornecido pela empresa LORD®. Os valores encontrados para as propriedades requeridas pelo modelo Drucker-Prager Exponencial (DPE) são apresentados na Tabela 2. Os modelos M2 e M3 apresentaram grande instabilidade de convergência. Devido a isso foi utilizado o modelo M1 para as simulações.

**Tabela 2.** Propriedades para implementação do modelo de Drucker-Prager Exponencial

Modelo	$\varepsilon_e^P$	Tração (MPa)	Cisalhamento (MPa)	$a$	$b$	$\tan \psi$
M1	0,437	20,33	12,1	0,2652	2	0,75
M2	0,499	20,88	14,6	0,0345	2	0,75
M3	0,581	21,71	17	0,0182	2	0,75

Fonte: O autor

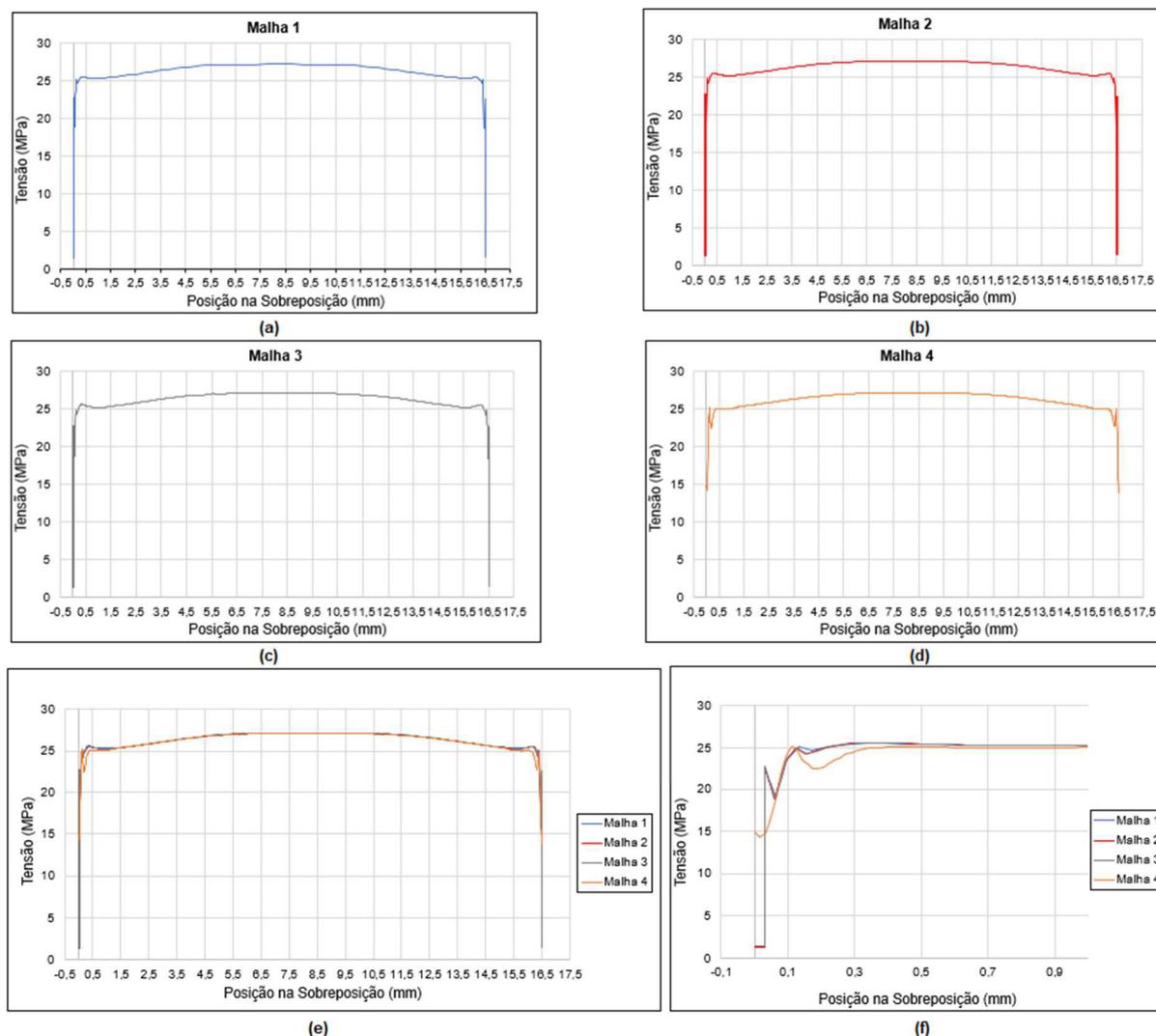
### 5.3 SENSIBILIDADE DE MALHA

O teste de sensibilidade, como o nome indica, visa avaliar o quão sensível é o modelo em relação ao nível de refinamento da malha empregada. Os resultados para curva tensão vs. deslocamento, correspondentes aos diferentes modelos de malhas especificados, possuem os mesmos valores, pois as forças de reação no ponto de referência estão correlacionadas à resistência global da junta.

A distribuição de tensões ao longo da extensão de área sobreposta é um fator de extrema importância. Para avaliação da sensibilidade foram geradas quatro malhas

diferentes, com os números de elementos descritos na Tab. 3. As distribuições obtidas, para cada malha avaliada, são mostradas na Figura 46.

**Figura 46.** Distribuição de tensões ao longo da linha central do adesivo utilizando (a) Malha 1, (b) Malha 2, (c) Malha 3, (d) Malha 4, (e) sobreposição de resultados e (f) aproximação dos resultados na extremidade da sobreposição.



Fonte: O autor

Nestas simulações foi empregada uma espessura de camada adesiva de 0,3 mm. A comparação das curvas evidencia uma pequena diferença de forma e de valores de pico de tensão nas zonas próximas às extremidades da junta. Já na região interna da camada adesiva, as tensões se mantiveram aproximadamente constantes. De acordo com Bartczak, Mucha e Trzepieciński [21], isso se deve ao pequeno comprimento de sobreposição.

Outro ponto a ser considerado na escolha da malha é o tempo de

processamento, ponderado pela exatidão obtida nos resultados. Nas simulações foi empregado um computador com a seguinte configuração: processador Ryzen 5 5600G com 6 núcleos e 12 *threads* e memória RAM de 16 GB. Os respectivos tempos de simulação, juntamente com os valores de pico de tensão na extremidade e no núcleo da região sobreposta, para cada malha estudada, estão descritos na Tab. 3.

**Tabela 3.** Resumo de resultados obtidos no teste de sensibilidade de malha.

Malha	Número de Elementos	Tempo de Processamento	Máxima Tensão (MPa)	
			Extremidade <sup>a</sup>	Centro <sup>b</sup>
MALHA 1	9380	11min	25,1919	27,1755
MALHA 2	26326	1h 16min	24,9534	27,1523
MALHA 3	40540	1h 45min	24,9383	27,1513
MALHA 4	89840	8h 20min	25,1836	27,0703

<sup>a</sup> = pico de tensão próximo a extremidade da sobreposição, Fig. 47(f)

<sup>b</sup> = pico de tensão no centro da sobreposição

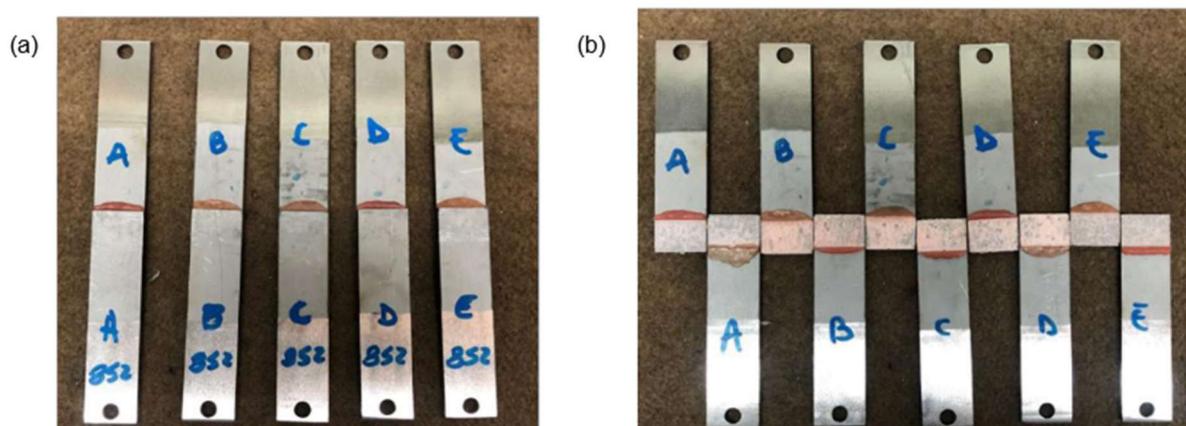
Fonte: O autor

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 ANÁLISE DE FRATURA

A Figura 47 mostra o conjunto de corpos de prova antes e após o ensaio de cisalhamento. Contata-se que as superfícies de fratura apresentadas na Fig. 47(b) têm a mesma coloração do adesivo, o que evidencia o modo de falha coesivo. Tal resultado corrobora a utilização da condição de contato nó a nó entre adesivo e aderente.

**Figura 47.** Corpos de prova utilizando adesivo 852 (a) antes do ensaio estático e (b) após ensaio estático, evidenciando fratura coesiva do adesivo.



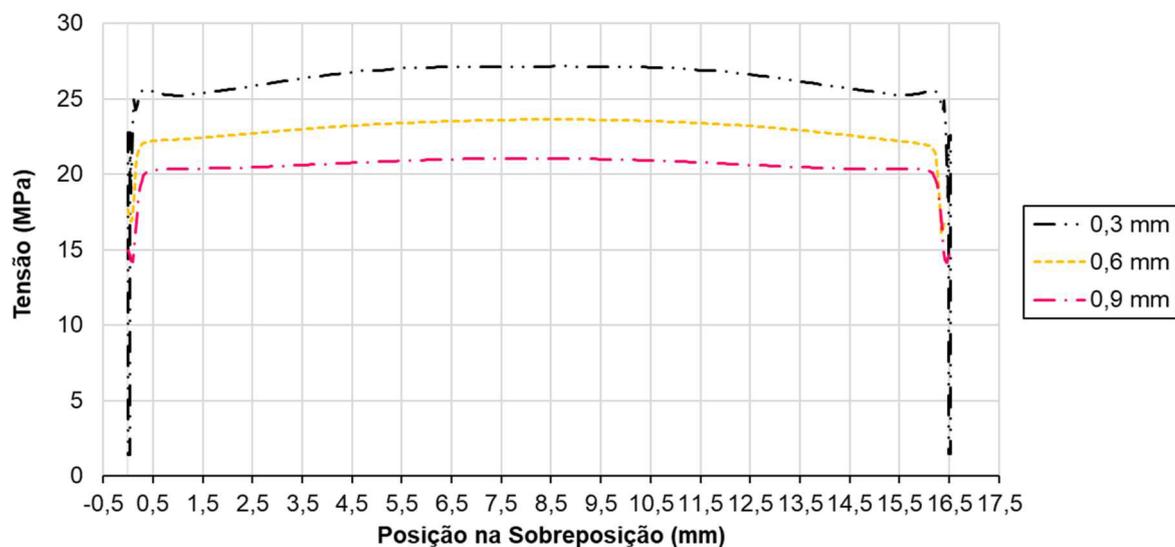
Fonte: O autor

### 6.2 ANÁLISE DE TENSÕES

Nesta etapa foram realizadas simulações, nas quais a espessura do adesivo foi alterada, mantendo-se os valores originais de distância de sobreposição e de espessura do aderente. Os novos valores de espessura da camada adesiva foram de 0,6 e de 0,9 mm.

As curvas de tensão obtidas são mostradas na Figura 48. Constatou-se decréscimo nas tensões com o aumento da espessura de camada adesiva. Além disso, assim como no caso original, as curvas apresentaram relativa uniformidade no valor da tensão ao longo do comprimento de sobreposição (porém com a característica flutuação nas regiões terminais).

**Figura 48.** Influência da espessura do adesivo na distribuição de tensões ao longo da sobreposição

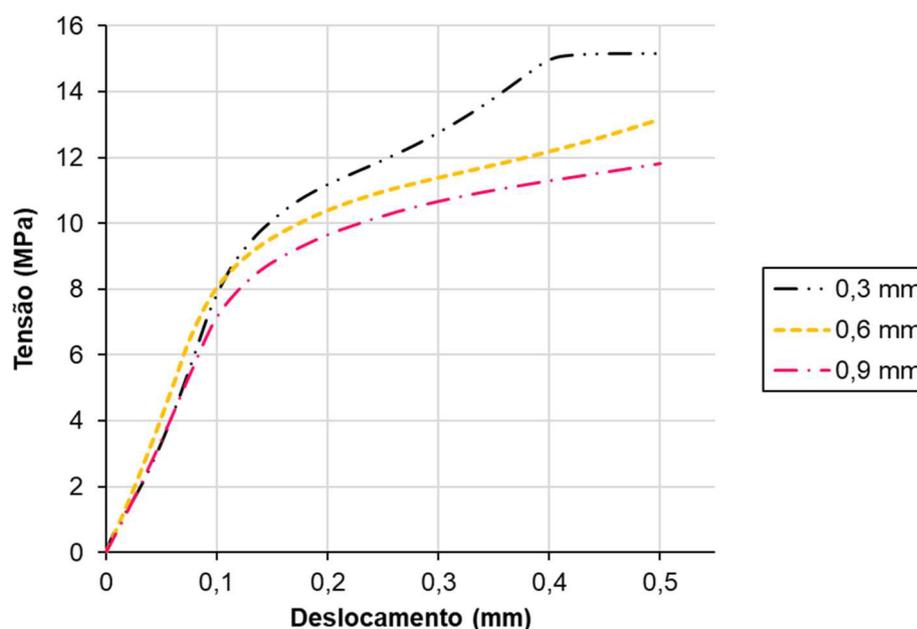


Fonte: O autor

Evidentemente, as simulações buscam obter indícios do comportamento global da junta, quando da aplicação de um deslocamento horizontal. Tal comportamento, além da distribuição das tensões no adesivo e no aderente, também envolve a rigidez global da junta.

A Figura 49 mostra as curvas tensão de cisalhamento vs. deformação para as espessuras simuladas.

**Figura 49.** Influência da espessura na curva tensão vs. deformação de junta sobreposta simples



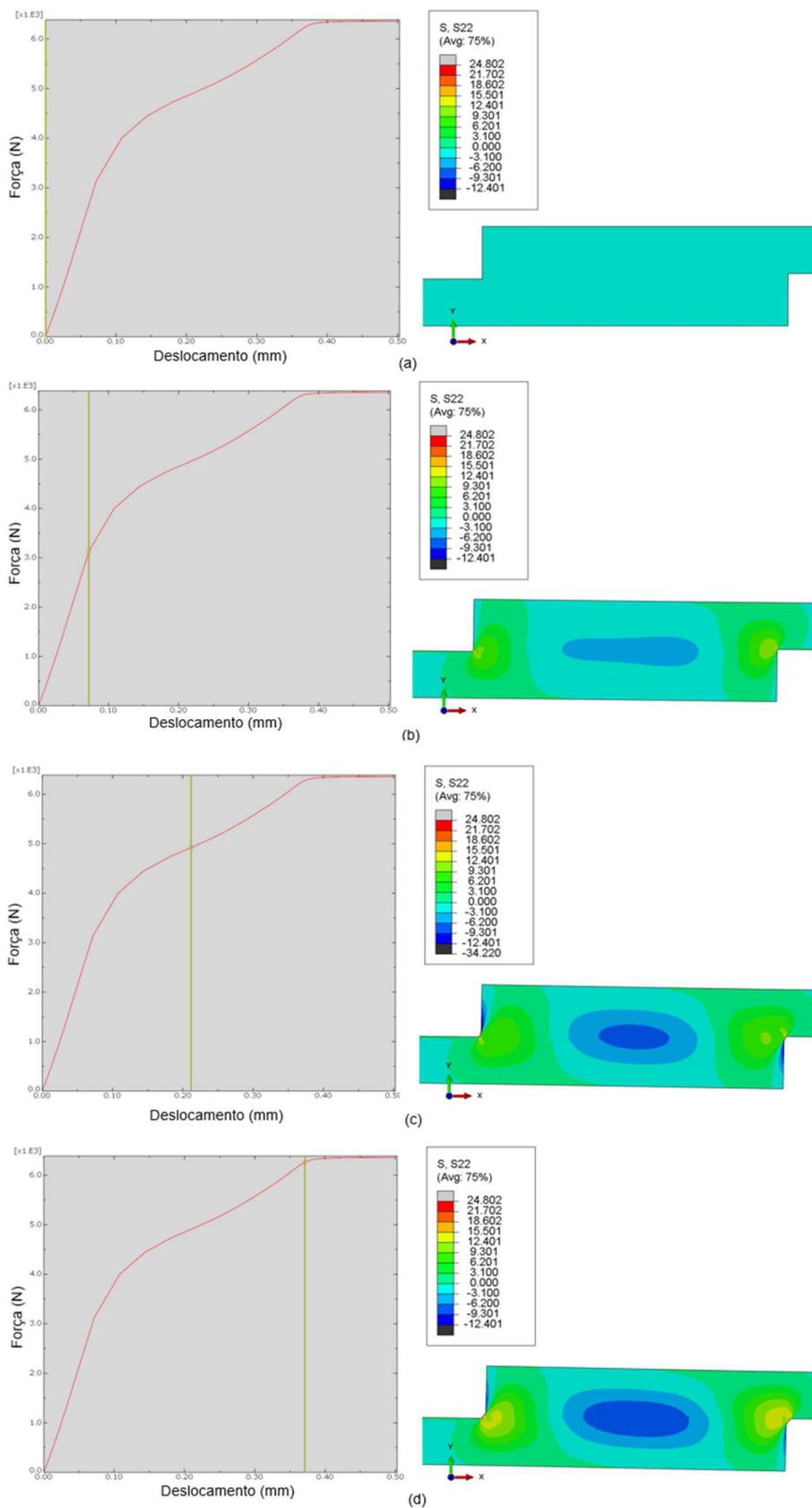
Fonte: O autor

Salienta-se que, apesar dos menores valores de tensão obtidos, o aumento de espessura não é benéfico para o desempenho global da junta, como salientado por Da Silva et al. [15]. Retornando à Fig. 49, observa-se uma sinuosidade nas curvas, ou seja, uma alteração da inclinação com o deslocamento. Tal fenômeno também é reportado por Wang et al. [27] e Sugiman, Crocombe e Aschroft [29]. Segundo os autores, a forma da curva é dependente, além da espessura de camada adesiva, da taxa de deslocamento aplicada.

Com o intuito de compreender o que ocorre na junta ao longo do carregamento, a curva de rigidez (força *vs.* deslocamento) foi plotada. Neste caso, trata-se da junta original, com 0,3 mm de espessura. A Figura 50 mostra, na coluna da direita, a junta deformada e tensões de arranque (na direção Y) em quatro valores sucessivos de deslocamento. A coluna esquerda mostra os respectivos valores de deslocamento, dispostos sobre a curva de rigidez. O primeiro ponto corresponde à condição inicial (força e deslocamento nulos). Já a Fig.51(b) corresponde ao limiar de início de rotação da junta. Até este ponto, o valor de momento secundário é pequeno e, portanto, a junta apresenta relação linear entre força e deslocamento (ou seja, rigidez constante). Por fim, os pontos correlacionados às Fig.51(c) e (d) apontam a elevação da concentração de tensão e de rotação, até o limiar de falha.

Num resumo, observando as Figuras 49 e 50 em conjunto, constata-se que uma espessura de camada adesiva maior naturalmente ocasiona aumento da excentricidade. Portanto a junta sofre maior momento secundário, bem como um decaimento em sua rigidez global.

**Figura 50.** Avaliação da rigidez global da junta.

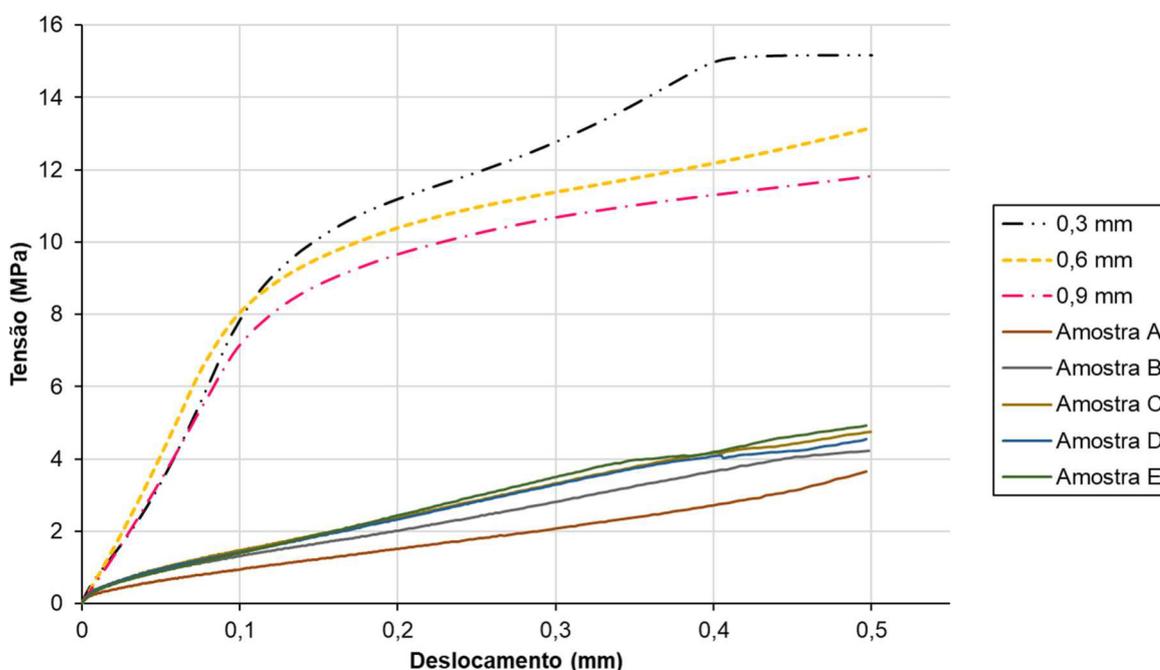


Fonte: O autor

#### 6.4 COMPARAÇÃO DE CURVAS TENSÃO *vs.* DEFORMAÇÃO

Para sabermos se o modelo é adequado na avaliação do comportamento da junta, os resultados numéricos e experimentais devem ser comparados. Os dados experimentais foram obtidos utilizando a norma ASTM D1002 e simulações para as 3 espessuras de adesivos estudadas com deslocamento aplicado de 0,5 mm. Foram plotadas as curvas tensão *vs.* deformação de engenharia para todos os ensaios experimentais, até a deformação global (junta + adesivo) aproximada de 0,5 mm. Retirou-se a continuidade da curva buscando uma melhor base de comparação de resultados. As curvas são mostradas na Figura 51.

**Figura 51.** Comparação entre curvas tensão *vs.* deslocamento de engenharia experimentais e numéricas.



Fonte: O autor

Ao relacionar resultados numéricos com experimentais, observou-se que o modelo de Drucker-Prager Exponencial apresenta característica conservadora, ou seja, para qualquer ponto específico de deslocamento, a tensão calculada numericamente é maior do que aquela obtida experimentalmente. O experimento evidenciou que a junta percorreu deslocamentos maiores que 0,5 mm até sua falha, por outro lado, a análise numérica demonstrou que, para o deslocamento de 0,5 mm, a junta estaria no limiar de falha. Tal descompasso pode estar relacionado a vários

fatores, como por exemplo, à acomodação do corpo de prova na fase inicial do ensaio experimental. Desta forma, na fase inicial de tração há uma baixa rigidez global do conjunto composto por corpo de prova e equipamento de teste. Já o modelo numérico emprega vínculos ideais, cujas restrições podem ser consideravelmente distintas daquelas que ocorrem no teste experimental.

Uma outra possível causa da diferença entre as curvas experimentais e numéricas estaria no parâmetro exponencial  $b$  adotado nas simulações [13].

## 7 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi estudado o modelo de Drucker-Prager Exponencial, tendo sido levantado o conjunto de parâmetros necessários para a avaliação numérica do comportamento mecânico de uma junta adesiva sobreposta. Foram realizados testes experimentais, cujos resultados foram comparados com os valores numéricos. Com base na análise global dos resultados, conclui-se que:

- Adesivo apresentou comportamento dúctil;
- Nos ensaios experimentais houve dominância do modo de falha coesiva;
- A avaliação da sensibilidade do modelo à malha demonstrou que o modelo de Drucker-Prager Exponencial tem baixo nível de sensibilidade;
- A distribuição das tensões obtida nas análises numéricas revelou certa uniformidade ao longo da região de sobreposição. A análise de elementos finitos revela a atuação das forças de arranque presentes nas regiões terminais da junta, as quais influenciam na resistência da junta adesiva.
- A comparação entre as espessuras de camada adesiva mostrou que, quanto menor a espessura, maior a resistência da junta. Esta diferença é resultado dos diferentes níveis de momento secundário nas juntas analisadas.
- O modelo de Drucker-Prager Exponencial utilizado mostrou-se conservador em relação ao comportamento da junta sobreposta testada. Este estudo preliminar mostrou que há necessidade de refinamento nos procedimentos experimentais, bem como do processo de determinação dos parâmetros necessários à modelagem por Elementos Finitos.

## 8 TRABALHOS FUTUROS

- O trabalho de caracterização mecânica do adesivo foi realizado utilizando ensaio mecânico segundo norma ASTM D1002, a qual apresenta tensões atuantes não puramente em cisalhamento. Sendo assim, seria produtivo utilizar outros métodos de caracterização mecânica em cisalhamento;
- Outro ponto importante para diminuição de recursos computacionais poderia ser alterados parâmetros de simulação;
- Para meios de comprovação do modelo, realização ensaios e simulações de juntas adesivas com geometrias diversas.

## 9 REFERÊNCIAS

- [1] DA SILVA, L. F. M.; ÖCHSNER, A.; ADAMS, R. D. **Handbook of Adhesion Technology**. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [2] JEN, Y. M. Fatigue life evaluation of adhesively bonded scarf joints. **International Journal of Fatigue**, v. 36, n. 1, p. 30–39, 2012.
- [3] HER, S. C. Stress analysis of adhesively-bonded lap joints. **Composite Structures**, v. 47, n. 1–4, p. 673–678, 1999.
- [4] DA SILVA, L. F. M. et al. Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 29, n. 6, p. 621–632, 2009.
- [5] ÖZER, Halil. Introductory chapter: Structural adhesive bonded joints. **Applied Adhesive Bonding in Science and Technology**, 2018.
- [6] DA SILVA, Lucas Filipe Martins et al. **Advances in numerical modelling of adhesive joints**. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [7] CAMPILHO, R. D. S. G. et al. Modelling adhesive joints with cohesive zone models: Effect of the cohesive law shape of the adhesive layer. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 44, p. 48–56, 2013.
- [8] KHORAMISHAD, H. et al. Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model. **International Journal of Fatigue**, v. 32, n. 7, p. 1146–1158, 2010.
- [9] DEAN, G. et al. Prediction of deformation and failure of rubber-toughened adhesive joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 24, n. 4, p. 295–306, 2004.
- [10] ADAMS, R. D.; WAKE, W. C. **Structural Adhesive Joints in Engineering**.

Dordrecht: Springer Netherlands, 1984. v. 13

[11] PETRIE, Edward M. **Handbook of adhesives and sealants**. McGraw-Hill Education, 2007.

[12] BALDAN, A. Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: Adhesives, adhesion theories and surface pretreatment. **Journal of Materials Science**, v. 39, n. 1, p. 1–49, 2004.

[13] GARCÍA, J. A. et al. Characterization and material model definition of toughened adhesives for finite element analysis. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 31, n. 4, p. 182–192, 2011.

[14] GUO, L. et al. Effects of loading rate, temperature, and thickness on the tensile strength of precision adhesive joints. **Polymer Testing**, v. 109, n. January, p. 107528, 2022.

[15] DA SILVA, L. F. M. et al. Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength. **Journal of Adhesion**, v. 82, n. 11, p. 1091–1115, 2006.

[16] SÁNCHEZ-ARCE, I. J. et al. Material non-linearity in the numerical analysis of SLJ bonded with ductile adhesives: A meshless approach. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 104, 2021.

[17] DA SILVA, L. F. M. et al. Analytical models of adhesively bonded joints-Part I: Literature survey. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 29, n. 3, p. 319–330, 2009.

[18] BUDYNAS, Richard G.; NISBETH, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley- 8ª Edição**. McGraw Hill Brasil, 2011.

[19] OZEL, A. et al. A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends. **Composites Part B: Engineering**, v. 62, p. 167–174, 2014.

- [20] GRANT, L. D. R.; ADAMS, R. D.; DA SILVA, L. F. M. Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 29, n. 4, p. 405–413, 2008.
- [21] BARTCZAK, B.; MUCHA, J.; TRZEPIECIŃSKI, T. Stress distribution in adhesively-bonded joints and the loading capacity of hybrid joints of car body steels for the automotive industry. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 45, p. 42–52, 2013.
- [22] MARQUES, E. A. S.; DA SILVA, L. F. M. Joint strength optimization of adhesively bonded patches. **Journal of Adhesion**, v. 84, n. 11, p. 915–934, 2008.
- [23] SILVA, M. R. G.; MARQUES, E. A. S.; DA SILVA, L. F. M. Behaviour under impact of mixed adhesive joints for the automotive industry. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 13, n. 5, p. 835–853, 2016.
- [24] SRINIVASAN, D. V.; RAVICHANDRAN, V.; IDAPALAPATI, S. Failure analysis of GFRP single lap joints tailored with a combination of tough epoxy and hyperelastic adhesives. **Composites Part B: Engineering**, v. 200, 2020.
- [25] REIS, P. N. B.; FERREIRA, J. A. M.; ANTUNES, F. Effect of adherends rigidity on the shear strength of single lap adhesive joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 31, n. 4, p. 193–201, 2011.
- [26] SAEIMI SADIGH, M. A.; MARAMI, G. Investigating the effects of reduced graphene oxide additive on the tensile strength of adhesively bonded joints at different extension rates. **Materials and Design**, v. 92, p. 36–43, 2016.
- [27] WANG, S. et al. Effects of loading rates on mechanical property and failure behavior of single-lap adhesive joints with carbon fiber reinforced plastics and aluminum alloys. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 106, n. 5–6, p. 2569–2581, 2020.
- [28] MACHADO, J. J. M. et al. Adhesive joints using aluminium and CFRP substrates

tested at low and high temperatures under quasi-static and impact conditions for the automotive industry. **Composites Part B: Engineering**, v. 158, n. May 2018, p. 102–116, 2019.

[29] SUGIMAN, S.; CROCOMBE, A. D.; ASCHROFT, I. A. Modelling the static response of unaged adhesively bonded structures. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 98, n. 1, p. 296–314, 2013.

[30] DI BELLA, G. et al. Mechanical characterization of adhesive joints with dissimilar substrates for marine applications. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 41, p. 33–40, 2013.

[31] QUAN, H.; ALDERLIESTEN, R. On the effect of plastic model on simulation of adhesive bonded joints with FM94. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 110, 2021.

[32] DRUCKER, D. C.; PRAGER, W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. **Quarterly of applied mathematics**, v. 10, p. 157–165, 1952.

[33] RAGHAVA, R.; CADDELL, R. M.; YEH, G. S. Y. The macroscopic yield behaviour of polymers. **Journal of Materials Science**, v. 8, n. 2, p. 225–232, 1973.

[34] DEAN, G.; CROCKER, L. The use of finite element methods for design with adhesives. **NPL Measurement Good Practice Guide**, n. 48, 2001.

[35] CHIMINELLI, A. et al. Experimental method for the determination of material parameters of plasticity models for toughened adhesives. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 68, p. 182–187, 2016.

[36] CHARALAMBIDES, M. N.; OLUSANYA, A. The constitutive models suitable for adhesives in some finite element codes and suggested methods of generating the appropriate materials data. **UK: Materials centre. National Physical Laboratory**, n. April, p. 1–33, 1997.

- [37] ZGOUL, M.; CROCOMBE, A. D. Numerical modelling of lap joints bonded with a rate-dependent adhesive. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 24, n. 4, p. 355–366, 2004.
- [38] MAHNKEN, R.; SCHLIMMER, M. Simulation of strength difference in elasto-plasticity for adhesive materials. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 63, n. 10, p. 1461–1477, 2005.
- [39] XU, B. **Fracture mechanisms and failure criteria of adhesive joints and toughened epoxy adhesives**. 2010. 225 f. Queen Mary, University of London. 2010.
- [40] LUO, Y.; KANG, Z. Topology optimization of continuum structures with Drucker-Prager yield stress constraints. **Computers and Structures**, v. 90–91, n. 1, p. 65–75, 2012.
- [41] ÖZER, H.; ÖZ, Ö. The use of the exponential Drucker-Prager material model for defining the failure loads of the mono and bi-adhesive joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 76, p. 17–29, 2017.
- [42] WANG, C. H.; CHALKLEY, P. Plastic yielding of a film adhesive under multiaxial stresses. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 20, n. 2, p. 155–164, 2000.
- [43] DOS SANTOS, D. J.; BATALHA, G. F. Failure criterion for adhesively bonded joints using Arcan's experimental method. **Polimeros**, v. 24, n. 4, p. 441–445, 2014.
- [44] SIMULIA, D. C. S. ABAQUS 6.11: Analysis User's Manual Volume 3: Materials. **Abaqus 6.11 Documentation**, 2011.
- [45] CANAVEROLO JR., S. V. **Ciências dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2ª ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006.
- [46] ASTM INTERNATIONAL. D 1002-10 (2019): Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading ( Metal-to-Metal).

Reaprovado 2019, 2010.

[47] ASTM INTERNATIONAL. D 3528-96 (2016) Standard Test Method for Strength Properties of Double Lap Shear Adhesive Joints by Tension Loading. v. 96, Reaprovado, 2016, 1996.

[48] ASTM INTERNATIONAL. D 5656-10 (2017) Thick-Adherend Metal Lap-Shear Joints for Determination of the Stress-Strain Behavior of Adhesives in Shear by Tension Loading. **Annual Book of ASTM Standards**, v. 10, Reaprovado 2017, 2010.

[49] ASTM INTERNATIONAL. D 0897-08 (2016) Test Method for Impact Strength of Adhesive Bonds. v. 01, Reaprovado 2016, 2003.

[50] ASTM INTERNATIONAL. D 2095-99 (2015) Tensile Strength of Adhesives by Means of Bar and Rod specimens. v. 15, Reaprovado 2015, 2002.

[51] ASTM INTERNATIONAL. D 638-14 (2022) Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Reaprovado 2022, 2014.

[52] SUWANPAKPRAEK, K.; PATAMAPROHM, B.; CHAIKITTIRATANA, A. Study of adhesive bonded joint failure in composite-metal joining. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 501, n. 1, 2019.

[53] DA SILVA, L. F. M. et al. Alternative Methods to Measure the Adhesive Shear Displacement in the Thick Adherend Shear Test. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 22, n. 1, p. 15–29, 2008.

[54] DA SILVA, L. F. M.; ADAMS, R. D.; GIBBS, M. Manufacture of adhesive joints and bulk specimens with high-temperature adhesives. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 24, n. 1, p. 69–83, 2004.

[55] DA SILVA, L. F. M.; ADAMS, R. D. Measurement of the mechanical properties of structural adhesives in tension and shear over a wide range of temperatures. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 19, n. 2, p. 109–141, 2005.

[56] JOUAN, A.; CONSTANTINESCU, A. A critical comparison of shear tests for adhesive joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 84, p. 63–79, 2018.

[57] CHOUPANI, N. Experimental and numerical investigation of the mixed-mode delamination in Arcan laminated specimens. **Materials Science and Engineering A**, v. 478, n. 1–2, p. 229–242, 2008.

[58] PINTO, D. F. **Velocidade de Trefilação e seu Efeito no Encruamento e no Acabamento Superficial de um Aço SAE 1008**. 2016.

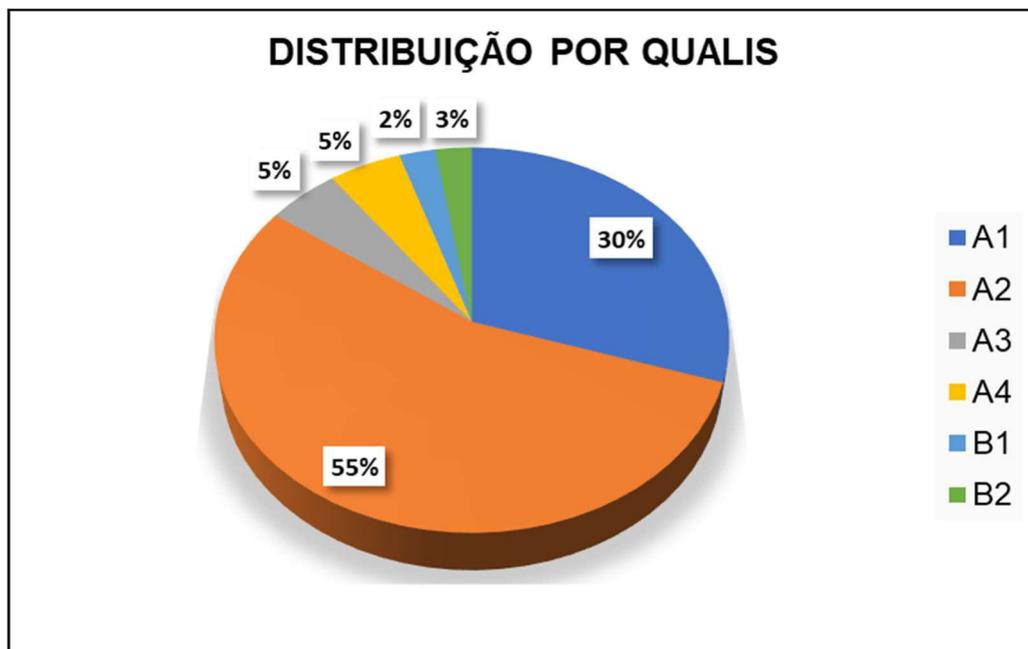
[59] HAAG, Jefferson; FERRANTI, Gabriel Oliveira. Estampabilidade de aços de baixo carbono. **Trabalho Completo. Anais do 54º Seminário de Laminação e Conformação**, v. 54, n. 1, 2017.

[60] CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. **Rio de Janeiro: LTC**, v. 589, p. 249, 2002.

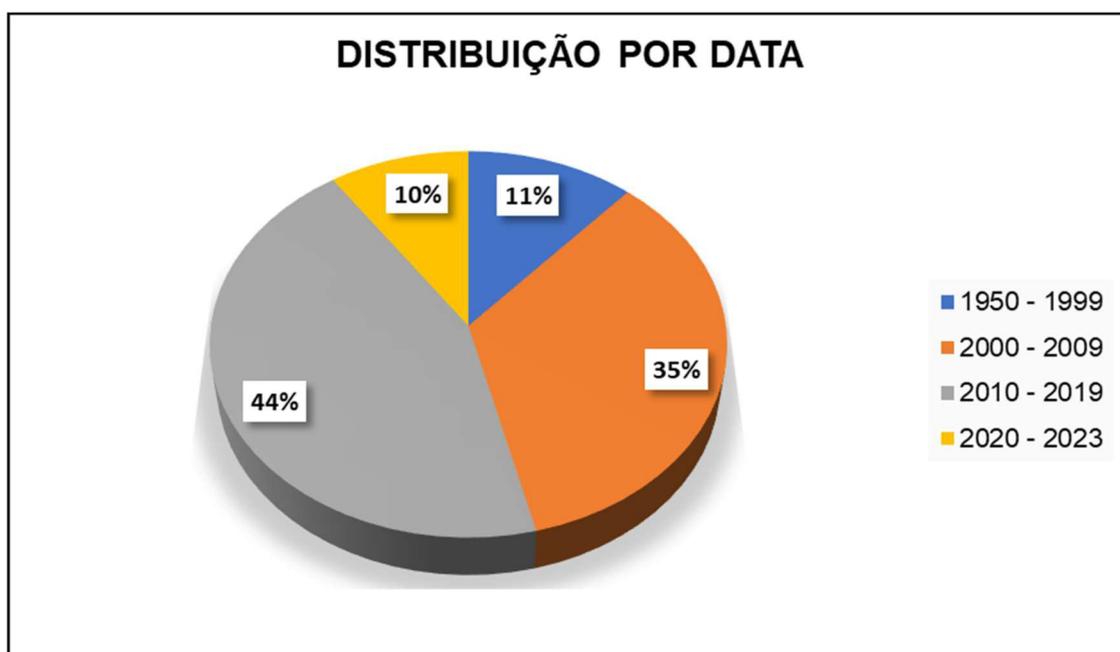
## 9.2 REFERÊNCIAS POR ESTRATO



### 9.3 REFERÊNCIAS POR QUALIS



### 9.4 REFERÊNCIAS POR DATA DOS ARTIGOS



## ANEXO A – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DO ADESIVO LORD® 852

**LORD – DADOS TÉCNICOS****LORD® 850 e 852 Adesivo Acrílico Estrutural de Alta Performance com Acelerador 25GB****Descrição**

LORD® 850 e 852 adesivo acrílico combinado com LORD Acelerador 25GB pode ser usado para substituir soldagem, brasagem, rebtagem e outros métodos de fixação mecânica. Apresenta, particularmente, bom desempenho em ambientes de baixa temperatura e em aplicações sujeitas a alto impacto, alto esforço de peel (descascamento) ou fadiga. Os adesivos LORD 850 e 852 permitem uma diversidade de tempos de trabalho para acomodar uma ampla variedade de processo de aplicação.

A combinação LORD 850 e 852 com LORD Acelerador 25GB, adere uma ampla variedade de metais submetidos à preparação ou não, bem como alguns plásticos de engenharia. Foi especificamente formulado para fornecer as maiores resistências à impacto e peel (descascamento) disponíveis em um adesivo de cura à temperatura ambiente com excepcional modo de falha coesiva.

O LORD Acelerador 25GB permite o controle preciso da espessura da linha de adesão devido à presença de microesferas de vidro.

**Características e benefícios**

**Versátil** - adere uma ampla variedade de metais com mínima preparação de substrato, bem como polímeros compostos, como FRP.

**Durável** - fornece alta resistência para aplicações de colagem estrutural de alto desempenho; 100% de alongamento melhora a resistência ao impacto e a resistência à fadiga.

**Resistente à temperatura** - funciona em temperaturas de -40°C a +149° C; tolera processos de e-coat com falha coesiva a 170 ° C.

**Resistente ao meio ambiente** - resiste a ácidos diluídos, álcalis, solventes, graxas, óleos, umidade, névoa salina e intempéries; fornece excelente resistência a exposição UV indireta.

**Não escorre** - permanece na posição quando aplicado em superfícies verticais ou suspensas, permitindo maior flexibilidade do processo.

**Aplicação**

**Preparação da superfície** – Não aplicar sobre superfície molhada, remover graxa, poeira ou pequenas oxidações aderidas a superfícies metálicas. Pequenas quantidades de óleo de usinagem ou particulados normalmente não apresentam problemas a adesão. Muitos plásticos necessitam de simples limpeza antes da colagem. Em algumas situações pode ser requerido lixar o substrato para uma ótima performance.

**Mistura** – Misture LORD® 850 ou 852 com LORD Acelerador 25GB na proporção 10:1 por volume ou 8:1 por peso. Bismas já dispensam automaticamente a proporção volumétrica correta de cada componente. Uma cor homogênea indica uma mistura completa. Uma vez misturado, o adesivo cura rapidamente.

**Aplicando** – Aplicar os adesivos utilizando as bismas ou equipamento MMD automático.

• Bismas

**Propriedades Típicas\***

	<b>850</b>	<b>852</b>	<b>Acc 25GB</b>
Aparência	Pasta Âmbar	Pasta Âmbar	Pasta Vermelha
Viscosidade, cP	150.000 – 550.000	150.000 – 550.000	100.000 – 300.000
Densidade, g/cm <sup>3</sup>	0,959 – 0,995	0,959 – 0,995	1,174 – 1,222
Ponto de Fulgor, °C	15	15	94

Embalagem fechada a partir da data de fabricação e armazenada entre 21° e 27°.

\*Os dados são típicos e não devem ser usados para fins de especificação. As faixas de especificações são experimentais e poderão sofrer alterações. Todos as propriedades típicas são medidas conforme metodologia interna da LORD.

**LORD**  
AskUsHow™

## LORD – DADOS TÉCNICOS

1. Posicione a bisnaga na pistola de aplicação e remova as tampas das extremidades.
2. Nivele os êmbolos expelindo uma pequena quantidade de adesivo para garantir que ambos os lados estejam nivelados.
3. Coloque o bico misturador e descarte um primeiro cordão de adesivo misturado de comprimento em torno de 20–30cm.
4. Aplique o adesivo ao substrato e una as peças respeitando o tempo de trabalho do adesivo. Mantenha as peças fixadas umas às outras até o adesivo obter resistência ao manuseio.

Não exponha o adesivo ao ar uma vez que as peças estejam unidas. As peças unidas devem ser reposicionadas deslizando-as para atingir o alinhamento adequado.

- Equipamento MMD

Se precisar de assistência no uso do equipamento, contate o representante LORD.

**Cura** – A cura é iniciada imediatamente assim que o adesivo e o acelerador são misturados. O tempo de resistência ao manuseio (handling time) depende do adesivo usado. A cura completa é obtida de 2 a 5 horas à temperatura ambiente. As superfícies unidas devem permanecer em contato durante todo o processo de cura.

A cura pode ser acelerada com a aplicação de calor moderado (<66 °C).

**Limpeza** – Limpar o equipamento e ferramentas antes da cura do adesivo com solventes, como álcool isopropílico, acetona ou metil-etil-cetona (MEK). Uma vez curado, aquecer a 204°C ou acima para amolecer o adesivo. Isso permite que as partes sejam separadas e o adesivo seja mais facilmente removido.

### Vida útil/armazenagem

9 meses

Garantimos esta vida útil quando armazenado em ambiente limpo e seco entre 21 e 27 °C, no recipiente original e fechado.

Temperaturas de armazenamento de 4 – 10°C são recomendadas. Se armazenado a frio, deixe o produto retornar à temperatura ambiente antes do uso. Proteja da exposição à luz solar direta.

Os adesivos LORD 850 e 852 são inflamáveis. Não armazene nem use o produto próximo a fontes de calor, faíscas ou chama aberta.

### Precauções

Aplicar em local devidamente arejado. Evite contato prolongado do produto sobre a pele, assim como a inalação dos vapores do produto ou seus solventes. Devem ser mantidos afastados de locais com calor excessivo e presença de chamas ou faíscas. Seus recipientes devem ser completamente fechados após o uso.

Lave perfeitamente as mãos e demais partes que tiverem contato com o produto, principalmente antes de comer ou beber. Para aplicação do produto é necessário utilizar equipamentos de proteção como máscaras com filtros contra gases, luvas e óculos de proteção. Em caso de contato com os olhos, lave-os repetidamente com jato de água. Na eventualidade de ser ingerido, não induzir ao vômito, chamar um médico imediatamente.

Maiores informações podem ser encontradas na Folha de Informação de Segurança do Produto Químico - FISPQ/MSDS - dos adesivos LORD® 850, 852 e Acelerador 25GB.

### Para uso exclusivamente comercial/industrial.

Somente deve ser aplicado por pessoal treinado. Não deve ser utilizado em aplicações domésticas. Não se destina ao varejo.

## LORD – DADOS TÉCNICOS

### Propriedades Típicas do Adesivo Misturado\*

	<b>850/25GB</b>	<b>852/25GB</b>
Proporção de Mistura	10:1 (volume) 8:1 (peso)	10:1 (volume) 8:1 (peso)
Teor de Sólidos, %	100	100
Tempo de Trabalho (Working Time), min (25°C)	6 – 10	20 - 25
Tempo de Manuseio (Handling Time), min (25°C)	18 – 24	50 - 70
Tempo de Cura Total, hr (25°C)	2**	5
Aparência da Mistura	Pasta Vermelha	Pasta Vermelha

### Propriedades Típicas do Adesivo Curado\*

	<b>850/25GB</b>	<b>852/25GB</b>
Dureza Shore D	66	67
Tensão de Ruptura (Tensile Strength at Break), MPa (psi) ASTM D638, modified	18,0 (2610)	18,5 (2683)
Alongamento, % ASTM D638, modified	100	100
Módulo de Young, MPa (psi), ASTM D638, modified	724 (105.000)	862 (125.000)
Temperatura de Transição Vítrea, °C ASTM E1640-99, by DMA	80	81

### Performance Adesiva\* – LORD 850/LORD Accelerator 25GB

	<b>Alumínio / Alumínio</b>	<b>EZG / EZG</b>	<b>CRS / CRS</b>
Lap Shear temp. ambiente, MPa (psi) Modo de Falha	18,1 (2617) C	14,4 (2081) C	19,9 (2885) C
Lap Shear 82°C, MPa (psi) Modo de Falha	7,2 (1044) C	7,4 (1075) C	8,0 (1157) C
Lap Shear -34°C, MPa (psi) Modo de Falha	22,0 (3183) TLC	17,7 (2568) TLC	27,7 (4017) TLC
Lap Shear após 14 dias 38°C, 95% Umidade Relativa, MPa (psi) Modo de Falha	17,8 (2584) C	14,1 (2046) C	19,2 (2790) C
Lap Shear após 500 horas Exposição à Salt Spray, MPa (psi) Modo de Falha - ASTM B117	14,9 (2157) C/A	10,2 (1482) C/A	13,2 (1908) C/A
T-Peel temp. Ambiente, pli(N/cm) Modo de Falha	46 (26) C	79 (45) C	79 (45) C

### Performance Adesiva\* – LORD 852/LORD Accelerator 25GB

	<b>Alumínio / Alumínio</b>	<b>EZG / EZG</b>	<b>CRS / CRS</b>
Lap Shear temp. ambiente, MPa (psi) Modo de Falha	19,9 (2880) C	14,6 (2115) C	20,5 (2975) C
Lap Shear 82°C, MPa (psi) Modo de Falha	7,5 (1089) C	7,5 (1090) C	9,1 (1320) C
Lap Shear -34°C, MPa (psi) Modo de Falha	23,3 (3380) TLC	18,1 (2627) TLC	29,2 (4236) TLC
Lap Shear após 14 dias 38°C, 95% Umidade Relativa, MPa (psi) Modo de Falha	19,0 (2752) C	13,9 (2016) C	19,5 (2826) C
Lap Shear após 500 horas Exposição à Salt Spray, MPa (psi) Modo de Falha - ASTM B117	13,9 (2022) C/A	12,3 (1780) C/A	12,5 (1807) C/A
T-Peel temp. Ambiente, pli(N/cm) Modo de Falha	46 (26)	82 (47)	86 (49)

\*\* Alcança 90% da força total após 1 hora

\*Os dados são típicos e não devem ser usados para fins de especificação.

## LORD – DADOS TÉCNICOS

### Substratos

Alumínio, espessura 0,032" 6061T6  
 EZG – Aço Eletro galvanizado, espessura 0,032"  
 CRS – Aço Laminado a Frio, espessura 0,032"

### Tratamento de Superfície

Limpeza com Álcool Isopropílico  
 Limpeza com Álcool Isopropílico  
 Limpeza com Álcool Isopropílico

Parâmetros de Colagem	Área Colada	Espessura do Filme	Cura	Proporção Mistura
Lap Shear Metal (ASTM D1002)	1,0" X 0,5"	0,010"	24 hrs temp. ambiente	10:1 em volume
T-Peel (ASTM D1876 modificado)	1,0" X 3,0"	0,010"	24 hrs temp. ambiente	10:1 em volume
Definição de Modo de Falha	Abreviação			
Falha Adesiva	A			
Falha Coesiva	C			
Fina Camada de Falha Coesiva	TLC			

\*Os dados são típicos e não devem ser usados para fins de especificação.

Os valores constantes nesse boletim técnico são dados típicos porque nem todo lote do material produzido passa por todos os testes. Para especificações formais do produto para finalidades específicas, entre em contato com nosso serviço de atendimento ao cliente.

A informação aqui prestada fundamenta-se em testes e cremos ser confiável. A LORD Corporation, não tendo controle sobre o uso dessa informação por terceiros, não garante os resultados que possam ser obtidos. Além disso, a LORD Corporation não garante o desempenho nem os resultados do uso do produto, ou da presente informação, se ele tiver sido embalado novamente por terceiros, incluindo, sem assim limitar, o consumidor final de qualquer de seus produtos. A empresa igualmente não fornece nenhuma garantia expressa ou implícita da adequação do produto para fins de comercialização ou para propósitos específicos referentes aos efeitos ou resultados de tal uso.

LORD e "Ask Us How" são marcas registradas da LORD Corporation ou de uma de suas subsidiárias.

A LORD oferece uma valiosa capacidade técnica e experiência em adesivos e revestimentos, controle de vibrações e movimentos e tecnologias de boa resposta magnética. Nossos funcionários trabalham em parceria com nossos clientes visando ajudá-los a valorizar mais seus produtos. Sempre inovando e reagindo às constantes mudanças do mercado, nossa preocupação maior é oferecer soluções a nossos clientes de todo o mundo. Pergunte-nos como.

**Lord Industrial Ltda.**  
 Rua Hughson, 55  
 13213-110 Jundiaí-SP / Brasil  
 Caixa Postal 531 - 13200-970  
 Tel.: (011) 2136-7755 - Fax: (011) 2136-7770  
 www.LORD.com

**LORD Corporation**  
 Sede Internacional  
 111 Lord Drive  
 Cary, NC 27511-7923 USA  
 www.lord.com

Para obter uma lista das nossas unidades em todo o mundo, visite a LORD.com.

©2016 LORD Corporation D88751P (Rev. 03 - 10/09/2016)

**LORD**  
 AskUsHow™