



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ-  
CAMPUS ITABIRA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DE TENSÕES DE JUNÇÕES ADESIVAS ALUMÍNIO/ALUMÍNIO E  
ALUMÍNIO/COMPÓSITO BASEADO EM FIBRAS DE CARBONO**

**AUTOR:** Carlos Henrique Coelho Saunders

**ORIENTADORA:** Prof. Dra. Andreza Sousa Andrada

**COORIENTADOR:** Prof Dr. André Luís Riqueira Brandão

Itabira-MG

Junho/2018

TRABALHO FINAL DE GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DE TENSÕES DE JUNÇÕES ADESIVAS ALUMÍNIO/ALUMÍNIO E  
ALUMÍNIO/COMPÓSITO BASEADO EM FIBRAS DE CARBONO**

**AUTOR:** Carlos Henrique Coelho Saunders

**ORIENTADORA:** Prof. Dra. Andreza Sousa Andrada

**COORIENTADOR:** Prof. Dr. André Luís Riqueira Brandão

Trabalho Final de Graduação  
apresentado à Universidade Federal de Itajubá  
- Campus de Itabira, para obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Itabira-MG

Junho/2018

## **EQUIPE TÉCNICA**

**Carlos Henrique Coelho Saunders, *carloshcsaunders@gmail.com***

**Andreza Sousa Andrada, *andrezaandrada@unifei.edu.br***

**André Luís Riqueira Brandão, *andrerieira@unifei.edu.br***

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais pelo incentivo e apoio na realização do curso de Engenharia Mecânica.

Minha sincera gratidão à Prof. Dra. Andreza pela confiança e tempo dedicado na orientação deste trabalho e ao Prof. Dr. André Luís Riqueira Brandão pelo apoio e atenção como coorientador.

A equipe MountainBaja pelo crescimento profissional e pessoal, pelas amizades, conquistas e lições de vida.

Aos meus amigos e irmãos que fiz pela jornada em Itabira.

A Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira pela jornada acadêmica.

A Companhia Brasileira do Alumínio que permitiu o desenvolvimento do meu trabalho e a seus funcionários: Alexandro, Renata, Felipe e Douglas que me ajudaram na execução da parte experimental do trabalho.

A minha amiga Patrícia Najara que me ajudou com ensaios experimentais em Itabira.

## RESUMO

Indústrias com visão em tecnologia e competitividade, tais como a aeronáutica e automobilística têm constantemente buscado novos materiais estruturais que tenham alta resistência mecânica e baixo peso. Materiais como o alumínio e compósitos baseados em fibra de carbono possuem essas características e outras particularidades, e com isso ofertam soluções inteligentes de engenharia quando utilizados em conjunto. Para isso, há diversos métodos de junções estruturais capazes de unir esses dois materiais, tais como os métodos tradicionais de união por parafusos e rebites ou método de junção por adesivos estruturais. A junção de materiais por meio de adesivos apresenta vantagens em relação aos métodos tradicionais de união, pois proporciona uma distribuição mais uniforme das tensões ao longo da área ligada, fornece proteção contra corrosão, aumenta a resistência a fadiga dos componentes ligados, permite a ligação de materiais diferentes em composição e com distintos coeficientes de expansão térmica e rigidez, etc. Antes que essas uniões sejam fabricadas, é fundamental atestar a confiabilidade do componente projetado de modo a garantir a sua segurança estrutural. Para isso é essencial analisar as tensões impostas às junções adesivas e conhecer seus respectivos limites de trabalho. Neste trabalho junções adesivas de alumínio/alumínio e alumínio/compósito baseado em fibras de carbono foram fabricadas e submetidas a um ensaio de cisalhamento de acordo com a Norma ASTM D1002 (2010). Esse ensaio investigou a variação do comprimento de adesivo nas cargas de falhas de cada junção, onde observou-se que a partir de 1” de comprimento de adesivo não houve influência significativa no aumento da resistência da junção e que esse comprimento influenciava de forma não linear nas tensões de cisalhamento. Os resultados do ensaio também serviram como critério de validação dos resultados de cargas de falha obtidas pelos modelos analíticos, os quais conseguiram prever uma carga de falha menor do que a real, e, por conseguinte mostraram-se confiáveis para um projeto estrutural de junções adesivas. Os modelos analíticos também foram aplicados para mapear a distribuição de tensões ao longo da união adesiva, como resultado observou-se que o maior valor de tensão ocorre nas bordas das junções, enquanto o menor no centro. Também foi investigado o efeito da espessura do aderente na resistência da junção adesiva, onde notou-se um aumento de resistência ao cisalhamento e arrancamento com o aumento da espessura.

**Palavras-chave:** Junção Adesiva; Alumínio; Compósito; Análise estrutural.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases de um material compósito.....	20
Figura 2 - Comparação das propriedades mecânicas de diferentes materiais. ....	21
Figura 3 - Organograma de classificação dos materiais compósitos. ....	22
Figura 4 - Tipos de junções adesivas. ....	26
Figura 5 -Tipos de esforços mecânicos em junções adesivas.....	27
Figura 6 - a) Junção sem carga b) Deformação do adesivo devido a uma tensão de cisalhamento c) Distribuição das tensões ao longo da sobreposição.....	28
Figura 7 - Deformação dos aderentes. ....	28
Figura 8 - Falha coesiva em uma junção single lap. ....	29
Figura 9 - Falha adesiva em uma junção single lap. ....	30
Figura 10 - Princípio de tensão máxima nas junções.....	33
Figura 11 - Modelo de Goland & Reissner. ....	34
Figura 12 - Zonas de tensões plásticas e elásticas do modelo de Hart-Smith. ....	36
Figura 13 - Aumento progressivo de carga para obter o valor de tensão máxima de cisalhamento (a) e tensão máxima de arrancamento (b). ....	38
Figura 14 - Esquema do procedimento experimental. ....	39
Figura 15 - Esquema do processo de laminação manual com bolsa de vácuo. ....	43
Figura 16 - Fotografia do laminado no momento de aplicação do vácuo. ....	44
Figura 17 - Adesivo e pistola aplicadora. ....	45
Figura 18 – Corpos de prova AA (a) e AC (b) prontos para serem ensaiados.....	46
Figura 19 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de cisalhamento de adesivo. ....	46
Figura 20 - Fotografia da máquina utilizada nos ensaios de cisalhamento de uma junção <i>single lap</i> de alumínio/compósito baseado em fibras de carbono.....	47
Figura 21 - Tela de entrada das condições de contorno para o cálculo. ....	48
Figura 22 - Seção de cálculo do modelo analítico de Goland e Reissner. ....	48
Figura 23 - Curvas de Força (N) x deformação (mm) de junções adesivas de alumínio/alumínio para diferentes comprimentos de <i>overlap</i> .....	50
Figura 24 - Curvas de Força (N) x deformação (mm) de junções adesivas de alumínio/compósito baseado em fibras de carbono para diferentes comprimentos de <i>overlap</i> . ....	51
Figura 25 -Variação da força máxima pelo comprimento de <i>overlap</i> das junções alumínio/alumínio e alumínio/compósito baseado em fibra de carbono.....	53
Figura 26 - Fotografia dos corpos de prova das junções AA.0,25" (a), AA.0,5" (b) e AA.0,75" (c) após ensaio <i>single lap</i> mostrando a falha coesiva. ....	55
Figura 27 - Fotografia dos corpos de prova das junções AC.0,25" (a), AC.0,5" (b) e AC.0,75" (c) após ensaio de cisalhamento mostrando a falha coesiva. ....	56
Figura 28 - Fotografia dos corpos de prova das junções AC.0,75" após ensaio de cisalhamento mostrando a falha coesiva. ....	56
Figura 29 - Fotografia dos corpos de prova das junções AA.1" e AA.1,5" após ensaio <i>single lap</i> mostrando a falha nos aderentes. ....	56
Figura 30 - Carga de cisalhamento no adesivo. ....	59
Figura 31 - Tensão de cisalhamento (a) e tensão de arrancamento (b) ao longo da junção adesiva AA0.25" calculadas pelos modelos de Volkesen, Goland e Reissner e Hart-Smith.....	60
Figura 32 - Tensão de cisalhamento (a) e tensão de arrancamento (b) ao longo da junção adesiva AA0.5" calculadas pelos modelos de Volkesen, Goland e Reissner e Hart-Smith. ....	60

Figura 33 - Tensão de cisalhamento (a) e tensão de arrancamento (b) ao longo da junção adesiva AA0.75" calculadas pelos modelos de Volkesen, Goland e Reissner e Hart-Smith.....	61
Figura 34 - Tensões máximas de cisalhamento (a) e arrancamento (b) para três diferentes modelos analíticos.....	62
Figura 35 - Carga de falha pelo critério do valor máximo. ....	64
Figura 36 - Tensão de cisalhamento x comprimento de <i>overlap</i> .....	66
Figura 37 - Curvas de tensão de cisalhamento no adesivo para diferentes espessuras de adesivo. ....	67
Figura 38 - Curvas de tensão de arrancamento no adesivo para diferentes espessuras de adesivo. ....	67
Figura 39 – Influência da espessura do adesivo nas tensões de cisalhamento e arrancamento. ....	68
Figura 40 - Influência da espessura do aderente nas tensões de cisalhamento e arrancamento. ....	69
Figura 41 – Tensão x deformação do compósito fabricado. ....	79
Figura 42 - Corpos de prova sem os "tabs". ....	80
Figura 43 - Corpos de provas prontos para serem ensaiados. ....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do alumínio puro. ....	18
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos fixadores mecânicos. ....	25
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens da união adesiva. ....	25
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do alumínio 8011 H18. ....	40
Tabela 5 - Propriedades do compósito de resina epóxi com fibras de carbono. ....	40
Tabela 6 - Propriedades do adesivo utilizado. ....	41
Tabela 7 - Junções adesivas fabricadas. ....	45
Tabela 8 - Resultados do ensaio de cisalhamento das Junções de alumínio/alumínio. ....	52
Tabela 9 – Resultados do ensaio de cisalhamento das junções de alumínio/compósito baseado em fibras de carbono. ....	52
Tabela 10 – Tensão aparente de cisalhamento no adesivo e tensão sob a área transversal do aderente. ....	58
Tabela 11 - Valores de entrada das propriedades dos materiais das junções AA. ....	59
Tabela 12 - Tensões máximas obtidas por meio dos modelos analíticos. ....	62
Tabela 13 - Tensão de falha de cada modelo. ....	63

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\nu$	Coefficiente de Poisson
$w$	Coefficiente de transferência de tensão adesiva de Volkersen
$l$	Comprimento de <i>overlap</i>
$\cosh$	Cosseno hiperbólico
$\delta$	Deformação do material
$\delta_c$	Deformação na tração máxima
$\gamma(x')$	Deformação plástica por cisalhamento
$t$	Espessura do aderente
$t_b$	Espessura do aderente inferior na junção <i>single lap</i>
$t_t$	Espessura do aderente superior na junção <i>single lap</i>
$t_a$	Espessura do adesivo
$F_{\text{correção}}$	Fator de correção de quantidade de resina para laminação manual
$k$	Fator de momento de flexão
$k'$	Fator transversal de força
$P$	Força de tração
$T$	Força de tração
$\bar{P}$	Força de tração pela largura do adesivo
$b$	Largura da área do adesivo
$M_{\text{mistura}}$	Massa da mistura
$T_{\text{max}}$	Máxima força de tração
$c$	Metade do comprimento de <i>overlap</i>
$G_a$	Módulo de cisalhamento de <i>overlap</i>
$E$	Módulo de elasticidade
$N_{\text{camadas}}$	Número de camadas de um laminado
$D$	Rigidez de flexão do aderente
$\sinh$	Seno hiperbólico
$\sigma$	Tensão de arrancamento ( <i>peel</i> )
$\tau$	Tensão de cisalhamento
$t_s^0$	Tensão de cisalhamento no modelo coesivo

$\sigma_p$	Tensão plástica de arrancamento
$\tau_p$	Tensão plástica de cisalhamento
$x$	Zona colada

## LISTA DE ABRVIAÇÕES E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
MEF	Método dos Elementos Finitos
<i>Single lap</i>	Junção de sobreposição simples

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
2.1	<i>OBJETIVO GERAL</i>	16
2.1.1	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	16
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>17</b>
4.1	<i>Alumínio</i>	17
4.1.1	Propriedades do alumínio	17
4.1.2	Ligas de alumínio	19
4.2	<i>Materiais Compósitos</i>	20
4.2.1	Classificação dos materiais compósitos	21
4.3	<i>Junções Adesivas</i>	23
4.4	<i>Esforços mecânicos nos adesivos</i>	26
4.4.1	Tração e Compressão	27
4.4.2	Cisalhamento	27
4.4.3	Clivagem e arrancamento	28
4.5	<i>Modos de falha dos adesivos e aderentes</i>	29
4.5.1	Falha coesiva	29
4.5.2	Falha adesiva	29
4.5.3	Falha do substrato	30
4.6	<i>Análise de Tensões em Junções Adesivas</i>	30
4.6.1	Modelos analíticos	32
	<i>Onde,</i>	37
4.7	<i>CrITÉrios de falha de junções adesivas</i>	37
4.7.1	Máximo valor de tensão ou deformação	38
<b>5</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>39</b>
5.1	<i>Componentes das junções adesivas</i>	39
5.1.1	Liga de alumínio 8011	39
5.1.2	Compósito de resina epóxi e fibras de Carbono	40
5.1.3	Adesivo estrutural	41
5.2	<i>Experimental</i>	41
5.2.1	Fabricação dos aderentes	41
5.2.2	Fabricação dos corpos de prova de junções adesivas	44
5.2.3	Ensaio de cisalhamento	46
5.3	<i>Modelos analíticos</i>	47
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>49</b>
6.1	<i>Ensaio de cisalhamento</i>	49
6.1.1	Modos de falha	55
6.2	<i>Comparação dos Modelos analíticos</i>	58
6.3	<i>CrITÉrio do Máximo Valor de Tensão</i>	62
6.4	<i>Investigação da influência paramétrica nas tensões</i>	65

6.4.1	Influência do comprimento de <i>overlap</i> .....	65
6.4.2	Influência da espessura do adesivo .....	66
6.4.3	Influência da espessura do aderente.....	68
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>69</b>
7.1	<i>Considerações Finais</i> .....	69
7.2	<i>Sugestões para futuros trabalhos</i> .....	71
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>72</b>
	<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>76</b>
	<b>APÊNDICE B</b> .....	<b>79</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Indústrias com visão em tecnologia e competitividade, tais como a aeronáutica e automobilística, têm constantemente buscado novos materiais estruturais que tenham alta resistência mecânica específica. Nesse sentido, os materiais compósitos e o alumínio têm sido amplamente utilizados por essas indústrias devido principalmente as características mencionadas, isto é, ambos materiais alinham alta resistência com baixa densidade.

Materiais compósitos são produzidos quando dois ou mais materiais (ou fases) são utilizados juntos para resultar em uma combinação de propriedades que não podem ser obtidas de outra maneira (KAW, 2006). Esses são formados por uma matriz que envolve um material de reforço. O material da matriz geralmente é contínuo e pode ser um material polimérico, metálico ou cerâmico. Já o reforço pode estar na forma de fibra, partícula ou flocos. Em específico, os compósitos de matriz polimérica baseados em fibras de carbono têm uso difundido nas indústrias citadas, isso é explicado pelas suas propriedades: alta rigidez, alta resistência mecânica para um baixo peso, quimicamente resistente e baixo coeficiente de dilatação.

O alumínio é o metal mais abundante na crosta terrestre, e existem diversas ligas para diversas aplicações. Esse material tem baixa massa específica, é altamente condutor de eletricidade e durável, tem boa resistência mecânica e a corrosão. Além disso tem boa ductilidade sendo de fácil conformação mecânica. É um material não inflamável e não tóxico. Portanto, devido as características apresentadas, o alumínio é um material altamente requisitado para diversas aplicações industriais.

Ambos os materiais citados têm suas particularidades, vantagens e desvantagens, e quando aproveitadas podem gerar soluções inteligentes para diversos problemas de engenharia. Temos o exemplo de uma aeronave, em que em um voo supersônico há presença de calor nas bordas de ataque da asa sendo requerido um material mais resistente a temperatura, mas que necessite de rigidez transversal variável ao longo da asa, aspecto que os materiais compósitos podem fornecer. Portanto, para que a integração desses materiais seja possível, tem-se estudado como realizar esta união entre metal e compósito, e em específico como garantir sua confiabilidade estrutural.

Há diversos métodos para união estrutural, sendo que os mais conhecidos são as junções por meio de parafusos, rebites e soldas. Em destaque, uma prática talvez pouco

conhecida popularmente, mas que ganhou espaços nas indústrias citadas no primeiro parágrafo é a união por meio de adesivos estruturais.

A união de peças por meio de adesivos é capaz de substituir os métodos tradicionais de união por apresentar vantagens como redução de peso, proteção contra corrosão, por ser um processo simples, permitir a ligação de materiais diferentes em composição e com distintos coeficientes de expansão térmica e rigidez. Com a união adesiva não é necessário o processo de usinagem de furos para adição de parafusos ou rebites que são concentradores de tensão e conseqüentemente são pontos de iniciação de trincas, além disso, os adesivos conseguem distribuir a tensão de forma homogênea na união permitindo uma vida de fadiga superior.

Por outro lado, a união de materiais por meio de adesivo também apresenta desvantagens. Por ser uma união permanente, não é possível realizar a desmontagem de um componente sem causar danos em sua estrutura. Além disso, para a fabricação da junção é necessário que a superfície aderente seja bem preparada, fazendo com que haja investimento de tempo e mão de obra. Dependendo do tipo do adesivo, pode apresentar limitada resistência a condições extremas, tais como a temperatura e a umidade, devido à natureza polimérica do adesivo. Ainda fatores como o tipo do adesivo, do material aderente, processo de fabricação e dimensões geométricas da união estão intrinsecamente ligados ao comportamento estrutural da junção.

Um fator crítico na utilização de adesivos estruturais é como atestar a confiabilidade estrutural devido à complexidade de projeto, e por isso, apesar de suas vantagens esse obstáculo pode inibir projetistas a utilizarem tal método de união. Para se projetar uma estrutura é fundamental conhecer os limites dos materiais da junção, e da junção propriamente dita. Com o objetivo de conhecer esses limites, pesquisadores criaram modelos analíticos, e modelos numéricos por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF). Esses métodos de cálculos estruturais viabilizam o uso dos adesivos estruturais atestando sua confiabilidade na fase de projeto ao prever as tensões e deformações da junção, reduzindo tempo e custo de ensaios de amostras.

Tendo em vista o que foi mencionado, este trabalho tem como objetivo analisar as tensões mecânicas de junções adesivas de alumínio/alumínio e alumínio/compósito baseado em fibras de carbono através de ensaios experimentais e comparação com modelos analíticos utilizados com o auxílio do *software* MATLAB®. A união estudada será do tipo junção de

sobreposição simples (do inglês *single lap*), na qual um material aderente é sobreposto em outro por meio de uma interface adesiva.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

- Analisar as tensões mecânicas de junções adesivas de sobreposição simples de alumínio/alumínio e alumínio/compósito baseado em fibras de carbono;

#### **2.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar o ensaio de cisalhamento de junções de alumínio/alumínio e alumínio/compósito baseado em fibras de carbono;
- Caracterizar as juntas adesivas quanto a sua resistência, tensão suportada e modos de ruptura;
- Desenvolver uma rotina de cálculo para os modelos analíticos de Volkersen (1938), Goland & Reissner (1944) e Hart-Smith (1973) aplicados a uma união do tipo *single lap* de alumínio/alumínio usando o *software* MATLAB®;
- Aplicar o critério de máximo valor de tensão para comparação dos resultados dos modelos analíticos e experimentais das junções *single lap* de alumínio/alumínio;
- Investigar a influência da espessura do adesivo e aderente, e do comprimento de *overlap* (comprimento da área do adesivo) nas tensões de uma junção *single lap*;

## **3 JUSTIFICATIVA**

A utilização de materiais com alta resistência específica como o alumínio e os materiais compósitos tem se consolidado cada vez mais em mercados que buscam competitividade e desenvolvimento tecnológico. Cada um desses materiais possui particularidades, e com isso ofertam soluções inteligentes de engenharia quando integrados. Ligas de alumínio têm sido utilizadas há um bom tempo como principal material estrutural de aeronaves, porém os materiais compósitos vêm tomando o espaço dessas ligas devido suas características superiores de alta resistência e baixo peso. Com o aumento da proporção do uso de compósitos em aeronaves, o número de componentes com interface entre compósitos e metais também cresceu. Com esse crescimento a necessidade de novas tecnologias para união de materiais metálicos e compósitos se intensifica.

Uma solução eficiente de junção destes dois tipos de materiais e de alumínio com

alumínio é por meio de adesivos estruturais, que apresentam vantagens em relação a métodos tradicionais de união, como parafusos e rebites, pois, são mais leves, distribuem a tensão de forma mais homogênea e protegem os materiais unidos de corrosão galvânica.

Um passo fundamental para utilização desse tipo de união mecânica é atestar a confiabilidade estrutural por meio de análise de tensões e critérios de falhas. Essa análise é necessária para garantir que um determinado componente não falhe para suas condições de cargas de trabalho. Uma junção mal projetada compromete a segurança de estruturas, como a de aeronaves e veículos.

## **4 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **4.1 Alumínio**

Alumínio e suas ligas são reconhecidos como os materiais de engenharia mais versáteis em uma ampla gama de aplicações (CHEN et al., 1999). O alumínio está presente em muitos aspectos da nossa vida, seja no meio de transporte que utilizamos, na embalagem de produtos alimentícios, em utensílios domésticos e na construção civil. A versatilidade desse metal está relacionada com suas características físico-químicas, sendo as principais: baixo peso específico, resistência à corrosão e alta condutividade térmica e elétrica.

#### **4.1.1 Propriedades do alumínio**

A versatilidade é a característica mais importante do alumínio, a grande variedade de propriedades mecânicas e físicas que o alumínio pode adquirir comprova esse benefício. Esta característica está diretamente relacionada com diversos fatores como, por exemplo, a diversidade de ligas de alumínio que podem ser obtidas a partir deste metal, os vários processos de conformação e distintos tratamentos térmicos ao qual o alumínio pode ser submetido (DAVIS, 1993, p.6).

Apesar da variedade em suas propriedades, o alumínio de uma forma geral possui como principais características: baixa densidade relativa, elevada condutividade elétrica e térmica, resistência à corrosão e, elevada ductilidade (ABAL, 2015; DAVIS, 1993, p.6). A Tabela 1 mostra as principais propriedades físicas do alumínio, lembrando que os valores apresentados são referentes ao alumínio puro (não ligado a elementos de liga).

Tabela 1 - Propriedades do alumínio puro.

Fonte: ABAL (2015).

<i>Propriedades</i>	<i>Valores</i>	<i>Unidade de medida</i>
<i>Densidade</i>	2,698	g/m <sup>3</sup>
<i>Ponto de fusão</i>	660	°C
<i>Condutividade térmica</i>	237	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
<i>Resistividade elétrica</i>	26,548	10 <sup>-9</sup> Ω.m

A seguir, as principais propriedades físico-químicas do alumínio serão detalhadas.

- 1) **Baixa densidade:** o alumínio é um dos metais mais leves, sua densidade é aproximadamente 2,7 g/cm<sup>3</sup> sendo três vezes mais leve que o aço. Esta propriedade resulta em vantagens no transporte dos produtos, em projetos de engenharia, na transmissão de calor e eletricidade (VARGEL, 2004, p.9).
  
- 2) **Condutividade térmica e elétrica:** excelente condutividade térmica e elétrica. O alumínio possui um valor de condutividade térmica 40% menor que aquele observado para o cobre e dois terços da condutividade elétrica do mesmo, por outro lado por ser um metal mais leve que o cobre em algumas aplicações é o mais recomendado (VARGEL, 2004, p.11).
  
- 3) **Resistência à corrosão:** esta propriedade também é destacada em virtude da formação rápida e espontânea de uma fina camada de óxido de alumínio na sua superfície. Esta camada, em condições neutras, é uma barreira contra agentes externos o qual podem causar a corrosão (BIRBILIS e HINTON, 2011, p.575).
  
- 4) **Propriedades mecânicas:** o alumínio é um material extremamente dúctil, entretanto suas propriedades mecânicas podem ser modificadas por meio de processos metalúrgicos, tais como: processos de conformação, alteração da composição química da liga de alumínio e tratamentos térmicos. O alumínio no estado puro possui valores resistência mecânica muito baixa assim, na maioria dos casos este material possui uma restrita aplicação (DAVIS, 1993, p. 6).

#### 4.1.2 Ligas de alumínio

O alumínio, como citado anteriormente, possui uma vasta gama de aplicações em função da variabilidade de composição química de suas ligas. Esta variabilidade resulta em alteração nas propriedades físico-químicas e mecânicas do alumínio. Por exemplo, a resistência a tração dos materiais do alumínio e suas ligas pode variar de 50 a 700 MPa, dependendo da liga utilizada. O alumínio não ligado a elementos de liga possui valores de propriedades mecânicas muito baixas assim, restringindo suas aplicações (DAVIS, 1993).

As propriedades das ligas dependem de uma interação complexa da composição química e de características microestruturais desenvolvidas durante a solidificação, tratamento térmico e do processo de fabricação (forjamento, fundição, laminação) (SVERDLIN, 2003). As ligas de alumínio podem ser divididas em duas principais categorias, que são classificadas de acordo com o mecanismo primário de desenvolvimento de propriedades. Sendo assim, podem ser divididas em ligas fundidas e ligas trabalhadas mecanicamente (MAZZOLANI, 1995). As ligas fundidas têm no processo de fundição o mecanismo primário de desenvolvimento de propriedades e os métodos utilizados de conformação final dessas ligas são: a fundição por areia, a fundição por gravidade e a fundição sob pressão. Já as ligas trabalhadas têm no trabalho a frio ou a quente o mecanismo primário, exemplos são: as ligas conformadas na laminação, na extrusão e no forjamento (DAVIS, 1993, p.5).

Quanto a composição química, as ligas de alumínio são influenciadas pelos elementos de liga e impurezas presentes no alumínio. Essas ligas são divididas quanto ao elemento químico principal de liga, sendo divididas em séries: 1XXX, 2XXX, 3XXX, 4XXX, 5XXX, 6XXX, 7XXX e 8XXX (HANDBOOK, 1979). As ligas da série 1XXX possuem 99% de alumínio, sendo um metal mais puro. A série 2XXX a principal liga é o Cobre (Cu), na 3XXX o Manganês (Mn), na 4xxx o Silício (Si), na 5XXX o Magnésio (Mg), na 6XXX o Magnésio junto com o silício. Na liga 7XXX, o Zinco (Zn) é o elemento principal. Na liga 8XXX, o Lítio (Li) e o Estanho (Sn) são incluídos (CALVACANTE, 2016).

Em aviões, por exemplo, ligas de alumínio são muito utilizadas na construção de fuselagens, asas e outros componentes estruturais (KAUSHIK, 2015). As ligas mais utilizadas em aviões comerciais são as ligas de cobre (2XXX), zinco (7XXX) e lítio (8XXX). Destaca-se as ligas 7050 e 7045 que são utilizadas nas armações e revestimento da fuselagem (GONÇALVES, 2010).

## 4.2 Materiais Compósitos

Materiais compósitos são produzidos quando dois ou mais materiais (ou fases) são utilizados juntos para resultar em uma combinação de propriedades que não podem ser obtidas de outra maneira (KAW, 2006). Materiais compósitos podem ser selecionados para resultar em combinações incomuns de rigidez, resistência mecânica, peso, desempenho em altas temperaturas, resistência à corrosão, dureza ou condutividade. Os compósitos apresentam propriedades superiores às dos seus componentes, isto é, atuam com sinergia (ASKELAND, 2008).

Muitos materiais compósitos são constituídos por apenas duas fases. Uma é denominada matriz que envolve a outra, chamada reforço. A matriz pode ser constituída de material polimérico, metálico ou cerâmico e o reforço pode também ser polimérico, metálico ou cerâmico e pode estar na forma de fibras, de partículas, *whiskers*, etc. As fases constituintes de um material compósito estão ilustradas na Figura 1, onde a matriz envolve o reforço e a interfase é a região delimitadora das duas fases.

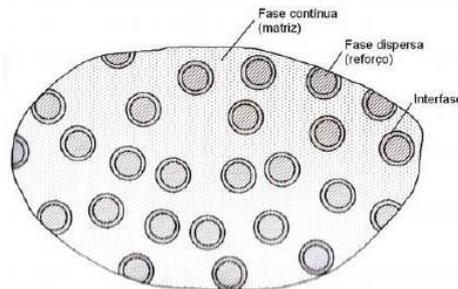


Figura 1 - Fases de um material compósito.

Fonte: (DANIEL, ISHAI, 2003).

Já o reforço é o grande responsável pela resistência e pela rigidez do material. Considerando uma estrutura sob ação de carregamentos estáticos ou dinâmicos, os seus componentes devem estar capacitados a desempenhar ações de acordo com as condições previstas ou estabelecidas em projeto. Essas condições nos compósitos são alcançadas pela capacidade do elemento de reforço, que confere à estrutura elevadas propriedades específicas de resistência e módulo de elasticidade na direção da fibra (MARINUCCI, 2011).

As propriedades dos compósitos estão associadas às propriedades de seus elementos constituintes, como concentração e frações volumétricas das fases, interface e adesão fibra/matriz, disposição e orientação das camadas, forma e tamanho (MARINUCCI, 2011).

A Figura 2 exibe uma comparação de algumas propriedades mecânicas do aço,

alumínio e dos compósitos. Segundo Campbell (2010), uma das grandes vantagens dos materiais compósitos está na relação entre resistência e rigidez combinadas com baixa densidade, o que permite redução de peso em componentes estruturais. Embora o comportamento global de um compósito esteja condicionado pelo critério de composição, pelo processo de fabricação e pelos objetivos estruturais na fase de utilização, de modo geral, os compósitos apresentam propriedades interessantes para a engenharia como as elevadas resistência e rigidez, o baixo peso específico, a excelente resistência à agressividade ambiental, o baixo coeficiente de dilatação térmica, a elevada resistência à fadiga bem como a possibilidade em admitir propriedades direcionais a nível estrutural, eléctrico e magnético, variáveis de acordo com a conveniência (HULL, 1981; EUROCOM, 1996). À partida, estas propriedades podem ser seleccionadas conforme as considerações específicas definidas no projeto de confecção do compósito, através da escolha adequada dos constituintes dentro da gama variada de materiais disponíveis no mercado (fibras e matriz).

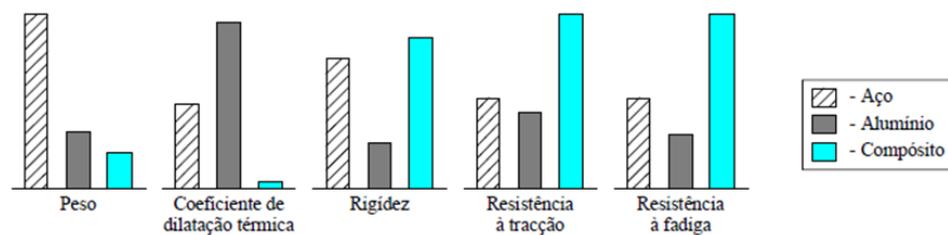


Figura 2 - Comparação das propriedades mecânicas de diferentes materiais.

Fonte: (TALY,1998).

#### 4.2.1 Classificação dos materiais compósitos

Os compósitos são classificados de acordo com a matriz constituinte em: compósitos de matriz metálica (CMM), compósitos de matriz cerâmica (CMC) e compósitos de matriz polimérica (CMP). Porém, existem ainda diversas subcategorias nas quais materiais compósitos podem ser classificados, como, por exemplo, de acordo com o tipo e a disposição dos reforços (CALLISTER, 2007). A Figura 3 mostra o organograma de classificação das subcategorias dos compósitos de acordo com as características geométricas e espaciais da fase de reforço, sendo: compósitos particulados, fibrosos e estruturais.

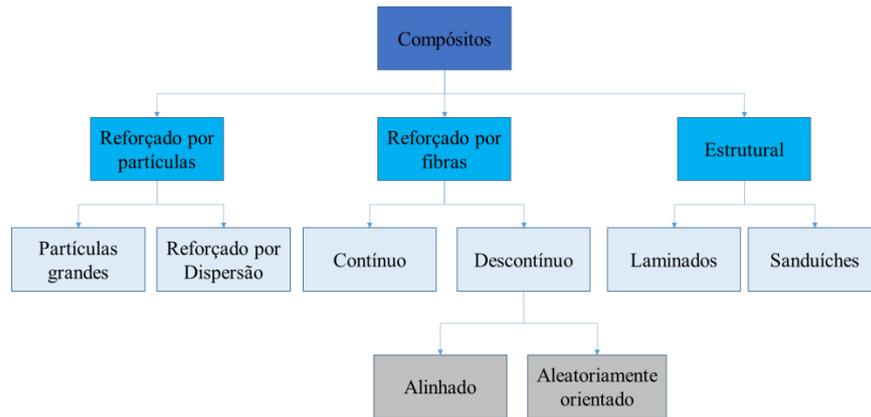


Figura 3 - Organograma de classificação dos materiais compósitos.

Fonte: adaptado de Callister (2007).

Os compósitos reforçados por partículas são constituídos por partículas de um ou mais materiais dispersos em uma matriz de outro material, podendo ser metálicos ou não-metálicos. Estes se subdividem em compósitos com partículas grandes e compósitos reforçados por dispersão, que se diferenciam pelo mecanismo de reforço ou de aumento de resistência.

O termo “grande” indica que as interações partícula-matriz não podem ser tratadas em nível atômico ou molecular. Neste caso, a fase particulada é mais dura e rígida do que a matriz. A matriz transfere parte da tensão aplicada às partículas, as quais suportam uma fração de carga. Uma ligação forte na interface matriz-partícula define o grau de reforço ou a melhoria no comportamento mecânico. Este tipo de compósito contém grandes quantidades de partículas grossas que não impedem o deslizamento de discordâncias de forma eficaz (CALLISTER, 2008).

Para os compósitos reforçados por dispersão, as interações partícula-matriz ocorrem em nível atômico ou molecular. As partículas dispersas podem ser orgânicas ou inorgânicas, tais como as ligas metálicas. O mecanismo de aumento de resistência ocorre por endurecimento ou por precipitação. As pequenas partículas dispersas impedem ou dificultam o movimento das discordâncias e a matriz suporta a maior parte da carga aplicada. Assim, a dureza, os limites de escoamento e de resistência à tração são melhorados. Estes materiais podem ser também denominados de nanocompósitos reforçados por dispersão. Em escala atômica (aproximadamente  $10^{-4}$  a  $10^{-2}$  cm), algumas ligas metálicas e alguns materiais poliméricos se encontram nesta classificação, uma vez que são formados por agrupamentos atômicos diferentes (CALLISTER, 2008).

Os compósitos reforçados com fibras são aqueles em que a fase dispersa está na forma de fibra. Conforme observado na Figura 3, os compósitos fibrosos são subclassificados de acordo com o comprimento das fibras. As fibras curtas não melhoram significativamente a resistência do compósito. Tal fato se dá, pois, um maior número de extremidades de fibras presentes no material atue como concentrador de tensão, inserindo tensões cisalhantes na interface, sendo potenciais iniciadores de trincas (SILVA, 2003). Já os compósitos com fibras longas tendem a apresentar um melhor conjunto de propriedades em relação aos compósitos fabricados com fibras curtas. Existem ainda os compósitos com fibras contínuas que são os que apresentam o melhor desempenho mecânico, muito superior aos de fibras longas, e mais ainda relativamente aos de fibras curtas. Tal fato está relacionado a capacidade de transferência de cargas da matriz para as fibras, que cresce exponencialmente com o comprimento destas (CALLISTER, 2008).

Além disso, o arranjo ou a orientação das fibras e sua distribuição influenciam significativamente na resistência e em outras propriedades dos compósitos. Quando a distribuição da fibra é uniforme obtêm-se compósitos com melhores propriedades (CALLISTER, 2008).

Os dois tipos de compósitos estruturais mais comuns são os compósitos laminados e os painéis-sanduíche. Um compósito laminado é formado por lâminas ou painéis bidimensionais que possuem uma direção preferencial de alta resistência. As camadas são empilhadas e subsequentemente unidas umas às outras, de maneira tal que a orientação da direção de alta resistência varie de acordo com cada camada sucessiva. Os painéis-sanduíche são projetados para serem vigas ou painéis de baixo peso, com rigidez e resistência relativamente elevadas. Consiste em duas lâminas externas feitas de material relativamente rígido e resistente, que são separadas e unidas por adesivo a um núcleo mais espesso, que é leve e possui normalmente baixo módulo de elasticidade (CALLISTER, 2008).

### **4.3 Junções Adesivas**

A união de materiais dissimilares é uma importante e contemporânea área de estudo que está recebendo grande atenção do mercado automobilístico e aeronáutico devido à grande quantidade de componentes estruturais que estão sendo produzidos com uma variedade de materiais, tais como: metais, compósitos reforçados com fibras e polímeros (STAPLETON, 2011).

Métodos tradicionais de junção, como o uso de fixadores mecânicos (rebites e parafusos) não são os mais adequados para a união entre compósitos reforçados com fibra, ou de compósitos com outros materiais (HART-SMITH, 1973). Por mais que o uso desses dois métodos apresentados para a união de materiais compósitos seja de simples implantação, os furos usinados diminuem a resistência mecânica do material devido à quebra da continuidade das fibras e concentração de tensões (RIBEIRO et al., 2016). Além disso, a união de outros tipos de materiais, como um parafuso ou chapa de aço unido a um compósito induz corrosão galvânica.

A partir do contexto apresentado, um método que vem sendo utilizado para a junções de materiais compósitos com metais e metais com metais é a união por adesivos. Segundo a ASTM D907 (1988), o adesivo é uma substância capaz de unir dois materiais através de uma ligação entre suas superfícies. E, uma junção adesiva é a união entre duas superfícies aderentes através de uma interface adesiva. Essa união é amplamente utilizada para a união de materiais dissimilares e também similares, como os citados no primeiro parágrafo (JUMBO et al, 2007).

Uma vantagem das uniões adesivas é a substituição de furos e rebites que são grandes concentradores de tensão e geralmente mais custosos (SEONG et al, 2008). Em uma aeronave que utiliza centenas de rebites na asa, se substituídos por adesivos que tem um acabamento mais sutil, o arrasto do ar será diminuído, e isso contribuirá para o aumento do rendimento energético da aeronave. Além disso, uma junção adesiva possui uma elevada resistência ao cisalhamento, porém, é vulnerável a tensões normais.

Ainda, segundo Tomblin et al., (2001), a união adesiva apresenta as seguintes vantagens:

- Alta relação resistência mecânica/peso;
- Não há necessidade de usinagem para aplicação de elementos de fixação, como parafusos;
- Baixo custo;
- Distribuição uniforme de tensões;
- Alta resistência a fadiga;
- Previne corrosão galvânica.

Porém, apesar das inúmeras vantagens apresentadas, como qualquer outra tecnologia,

há limitações quanto ao uso. Elevadas temperaturas e alta umidade podem resultar negativamente na resistência de alguns tipos de adesivos, especialmente quando submetido a tensões contínuas, como fluência (JANSSON, 2010). Também este tipo de junção não é recomendado quando há necessidade de desmontagem de componentes por poder causar danos as peças unidas.

Uma síntese das vantagens e desvantagens dos fixadores mecânicos e das junções adesivas são apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos fixadores mecânicos.

Fonte: adaptado de Noorman (2014).

<b>Fixadores mecânicos (parafusos e rebites)</b>	
Vantagens	Desvantagens
Não requer preparação da superfície aderente;	Enfraquecimento de aderentes compósitos devido aos furos necessários
A resistência não é afetada por ciclos térmicos ou alta umidade;	Concentração de tensões nos furos que podem iniciar trincas
União móvel que permite desmontagem e montagem sem deterioração do aderente	Maior peso comparado aos adesivos
Fácil dimensionamento	Geram arrasto quando expostos em superfície aerodinâmicas

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens da união adesiva.

Fonte: adaptado de Noorman (2014).

<b>União Adesiva</b>	
Vantagens	Desvantagens
Redução média de tensão e concentração de tensão devido a uma distribuição mais uniforme sobre uma determinada área	A resistência da junção pode ser afetada por impurezas ou não uniformidades na superfície aderente
Não requer usinagem	Dificuldade de precisão em testes não destrutivos
Menor peso que parafusos	Sensíveis a tensão de arrancamento (do inglês <i>peel</i> )
Grandes áreas unidas por adesivos são menos custosas a áreas parafusadas	Necessidade de preparação da superfície
Diminuem o arrasto em superfícies aerodinâmicas	União permanente e conseqüente difícil desmontagem
Resistência a fluência em alta temperatura	Ciclos térmicos e umidade podem diminuir a resistência
Resistente a corrosão, permite a montagem de diferentes materiais protegendo-os de corrosão galvânica	

Existem diversos tipos de junções adesivas, as quais estão representadas na Figura 4, cada uma delas possui características singulares e que devem ser escolhidas quanto as necessidades da aplicação (tipo de carregamento, montagem, entre outras) (ALVES et al., 2018). A junção de sobreposição simples (*single lap*) por exemplo, possui vantagem quanto a facilidade de produzir, inspecionar e analisar, e por esses motivos foi a junção escolhida para ser estudada neste trabalho. Já a junção de sobreposição dupla (*double lap*), que consiste na sobreposição de três superfícies com duas interfaces adesivas, é mais resistente a tensões de arrancamento do que a *single lap*. As junções de chanfro interior e degrau são particularmente interessantes pois ao contrário das junções de sobreposição simples, elas não causam flexão nos aderentes, o que afeta negativamente a resistência da junção (KIMIAEIFAR et al., 2012). A junção tubular é utilizada para conexões tubulares. As junções do tipo cobre junta podem ser utilizadas como uniões de reparos de estruturas.

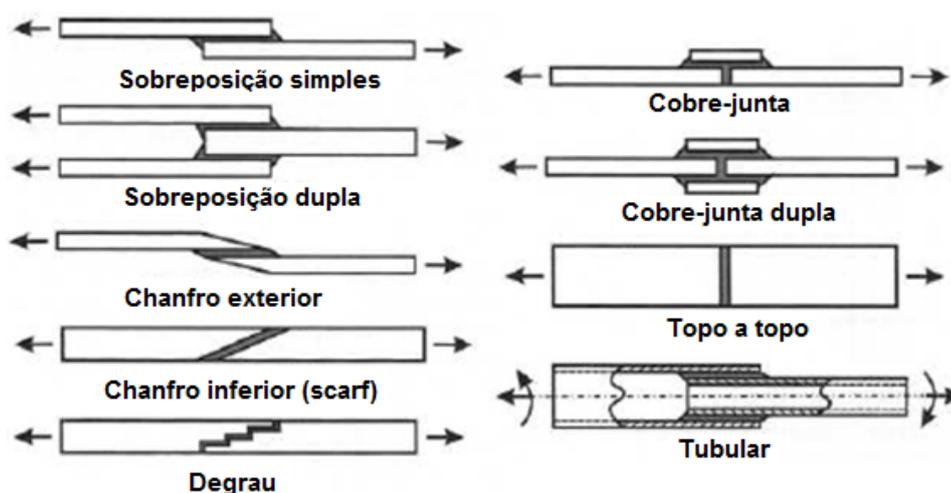


Figura 4 - Tipos de junções adesivas.

Fonte: Adaptado de Souza e Silva (2015).

#### 4.4 Esforços mecânicos nos adesivos

Nesta seção será feito um breve detalhamento sobre os principais tipos de esforços mecânicos em junções adesivas. A Figura 5 mostra os tipos de esforços: tração e compressão, cisalhamento, clivagem e arrancamento (SOUZA, G. F; SILVA, B. S., 2015). Esses esforços são explicados na seção 4.4.1 em diante.

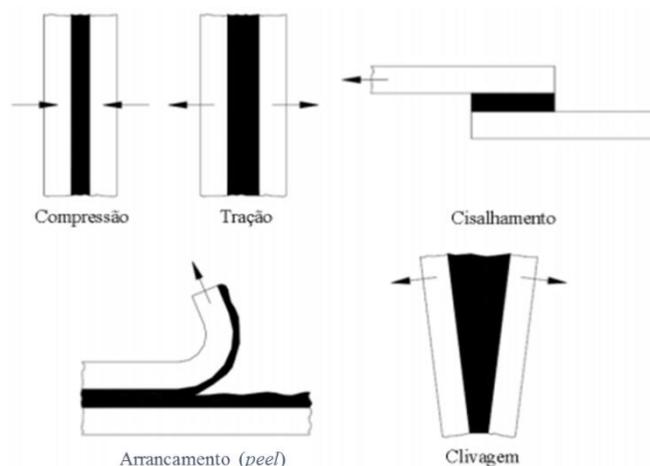


Figura 5 -Tipos de esforços mecânicos em junções adesivas.

Fonte: Bueno (2002).

#### 4.4.1 Tração e Compressão

Em junções adesivas, os esforços de tração e compressão são perpendiculares ao plano do adesivo, ambas as tensões estão representadas na Figura 5. A diferença física entre as duas é o sentido do vetor força, no qual a tração tem o sentido dirigido para o exterior do plano de tensão e a compressão para o interior. Sobre uma solicitação de tração pura, as tensões na superfície do aderente e do adesivo são uniformemente distribuídas (SILVA NETO, 2016). Porém, dificilmente haverá esse esforço de modo puro, pois com a deformação da junção há uma distribuição de tensões não lineares. Essas tensões não lineares podem ser geradas pelo difícil controle da espessura do adesivo na fabricação de junções, o que implica no não paralelismo dos aderentes e conseqüentemente a esforços não axiais que levam ao aparecimento de tensões de arrancamento ou clivagem, as quais serão apresentadas a seguir.

#### 4.4.2 Cisalhamento

A tensão de cisalhamento é gerada por forças de tração ou compressão aplicadas no mesmo sentido, mas em direções opostas a uma área transversal. No caso dos adesivos, as tensões de cisalhamento estão presentes quando forças no plano do adesivo tendem a separar os aderentes pelo deslizamento de um deles sobre o outro (FIUZA, 2016). Neste tipo de esforço, a tensão é mais elevada nas bordas da sobreposição devido ao maior grau de deformação. A Figura 6.a representa a junção sem nenhuma carga mecânica, a Figura 6.b mostra a deformação do adesivo devido a uma tensão de cisalhamento e a Figura 6.c mostra a distribuição das tensões de cisalhamento ao longo da sobreposição.

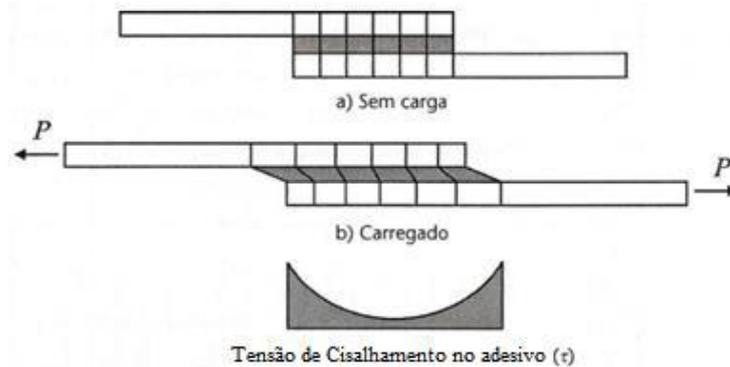


Figura 6 - a) Junção sem carga b) Deformação do adesivo devido a uma tensão de cisalhamento c) Distribuição das tensões ao longo da sobreposição.

Fonte: Silva (2007).

#### 4.4.3 Clivagem e arrancamento

Devido à dificuldade de controle da mesma espessura dos adesivos ao longo da junção em sua produção, é difícil garantir o paralelismo das superfícies unidas e por isso, as forças de tração na junção não são exclusivamente axiais, o que gera tensões de clivagem ou arrancamento.

Segundo Villenave (2005), a clivagem é uma tensão geometricamente localizada na extremidade de uma junção, esse esforço é iniciado por falhas microscópicas que se propagam e tendem a separar os materiais aderentes. Adesivos frágeis são sensíveis às forças de clivagem, enquanto os dúcteis têm uma maior resistência a ela.

Já o esforço de arrancamento (do inglês *peel*) gera a separação de dois aderentes flexíveis ou de um aderente flexível em um aderente rígido. Esse esforço é situado fora do plano da junta o qual tenta abrir a junção em uma de suas extremidades de forma não uniforme. Este tipo de esforço deve ser evitado no projeto de juntas pois produz uma elevada na borda da junção e leva a falha. A Figura 7 representa uma junção que inicialmente foi submetida a um esforço de cisalhamento, e que com a deformação do aderente por um momento fletor originado do não paralelismo dos aderentes e de suas forças gera uma tensão de arrancamento (FIUZA, 2016).

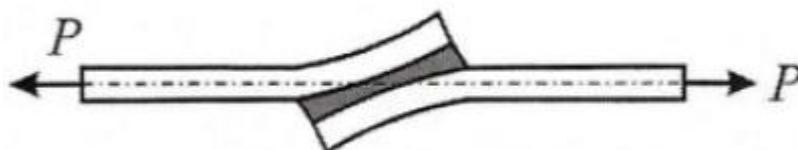


Figura 7 - Deformação dos aderentes.

Fonte: Silva (2007).

## 4.5 Modos de falha dos adesivos e aderentes

Segundo Matthews e Rawlings (1994), o termo “falha” relacionado a um elemento estrutural significa o momento em que o mesmo não pode mais desempenhar a função para qual foi projetado. Nesse âmbito, existem diferentes modos de falha de junções adesivas sujeitas a esforços mecânicos. Os modos de falha predominantes são: falha coesiva quando há a ruptura do adesivo, falha adesiva quando o adesivo é descolado da superfície aderente, e falha aderente quando há ruptura do aderente. Caso uma junção falhe é importante que seja feita uma análise da fratura a fim de compreender o seu motivo, e assim buscar novas soluções de projeto ou de fabricação a fim de garantir a confiabilidade estrutural em novas junções a serem produzidas. Portanto, nesta seção será explicado sobre os modos de falha de junções adesivas.

### 4.5.1 Falha coesiva

A falha coesiva ocorre nas camadas do adesivo. Geralmente acontece devido a tensões de cisalhamento, de arrancamento ou a combinação de ambas. Esse tipo de falha pode ser caracterizado por uma fratura que deixa a superfície do aderente com uma camada áspera de adesivo. Excessiva tensão de arrancamento, baixa área de colagem e alta porosidade são fatores que podem causar a falha coesiva (NOORMAN, 2014). A Figura 8.a representa a falha coesiva por ruptura da união adesiva na qual a separação ocorre no adesivo, e a Figura 8.b representa a falha coesiva de camada fina, que é a ruptura do adesivo próximo à interface aderente e adesivo.

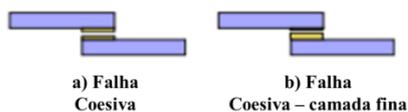


Figura 8 - Falha coesiva em uma junção single lap.

Fonte: adaptado de Noorman (2014).

### 4.5.2 Falha adesiva

A falha adesiva ocorre na interface do aderente e do adesivo, diferente da falha coesiva em que o adesivo continua na superfície aderente, essa falha é caracterizada pela ausência de adesivo em uma das superfícies após a falha, por isso, é comumente chamada de descolagem. Uniões adesivas com o alumínio geralmente falham devido a hidratação da camada de óxido metálico na sua superfície, dissociando o aderente do adesivo. Segundo

Noorman (2014), esta falha pode ser atribuída a erros de fabricação, como contaminação e má preparação da superfície, e a erros no processo de cura do adesivo. O adesivo também pode ter sido escolhido erroneamente de modo que não havia compatibilidade de adesão com o aderente. Esforços de arrancamento, fadiga e fluência contribuem para a falha adesiva. A Figura 9.a representa a falha adesiva, a 9.b mostra essa falha característica de um esforço de cisalhamento, e a 9.c está relacionada a um esforço de arrancamento.

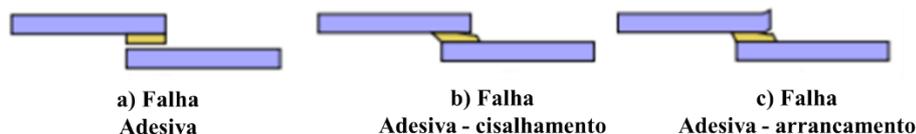


Figura 9 - Falha adesiva em uma junção single lap.

Fonte: adaptado de Noorman (2014).

#### 4.5.3 Falha do aderente

A falha no aderente ou aderente é associada ao seu rompimento, e pode acontecer em qualquer região do aderente. Geralmente, neste tipo de falha, o material aderente falha antes do adesivo por possuir resistência inferior à da união adesiva ou coesiva do adesivo.

### 4.6 Análise de Tensões em Junções Adesivas

A fim de compreender o comportamento estrutural de junções adesivas muitos pesquisadores criaram modelos e critérios de falha para analisar tensões em junções adesivas. Segundo Gustafson e Waas (2007), as tensões em junções adesivas têm sido analisadas por meio de três métodos, sendo eles: os métodos empíricos, os métodos analíticos e o método numérico por elementos finitos.

Dentre os métodos empíricos (experimental), podemos destacar os ensaios mecânicos. Existem diversos tipos de ensaios mecânicos adequados para avaliar a resistência de junções adesivas. Os ensaios mecânicos mais utilizados são os de tração, de cisalhamento, de clivagem, de fadiga e o ensaio de arrancamento (*peel*). O ensaio de cisalhamento conhecido como *lap shear* (ASTM D1002), será utilizado nesse trabalho a fim de caracterizar a tensão aparente de cisalhamento das junções adesivas estudadas.

Segundo Silva e coautores (2008), os modelos analíticos para a análise de tensões adesivas apresentam uma solução simples e de resposta rápida. Ao longo de 80 anos, o

comportamento mecânico de junções adesivas vem sido investigado e vários modelos analíticos foram propostos.

O modelo de Volkersen (1938) foi o primeiro método analítico de análise de tensões de junções adesivas apresentado na literatura. Em sua análise, Volkersen considera apenas as tensões de cisalhamento do adesivo, e despreza as tensões normais no adesivo devido à flexão dos aderentes em junções de sobreposição simples (*single lap*).

O segundo modelo apresentado na literatura, foi o de Goland e Reissner (1944), e diferencia-se do modelo de Volkersen ao considerar as tensões normais ou de arrancamento no adesivo. Posteriormente, Hanh (1960) aprimorou esse modelo ao levar em consideração a utilização de materiais aderentes diferentes em uma junção adesiva. Kuenzi e Stevens (1963) implementaram um modelo capaz de estudar as tensões em junções de sobreposição simples quando são utilizados adesivos rígidos e flexíveis em uma mesma união (RODRIGUEZ, 2011).

Em sequência, Hart Smith (1973) apresentou um modelo que leva em consideração a plasticidade do adesivo em junções de sobreposição simples. Nesse método, a tensão de arrancamento é considerada puramente elástica e a tensão de cisalhamento é tratada de forma elástica e plástica. Ojalvo e Eidinoff (1978) aprimorou o trabalho de Goland e Reissner (1944) modificando alguns dos coeficientes da equação de tensão de cisalhamento e adicionou novos termos e condições de contorno. Além dos autores citados até então, Grayley (1978), King (1978), Allman (1977), Chen e Cheng (1983), Tsai et al., (1998), Delale et al., (1981), Mortensen e Thomsen (2002), Zhang e coautores (2006) entre outros, continuaram o desenvolvimento de novas metodologias para o estudo de tensões em junções adesivas.

A partir dos fatos apresentados, fica claro que diversos autores vêm desenvolvendo modelos para a obtenção de soluções de problemas particulares, ou seja, esses modelos são limitados ao tipo de junção, tipo de material, dimensões uniformes, outros se limitam apenas ao modelo elástico do material e desconsideram sua fase plástica. Além disso, a maioria desses modelos realizam a análise apenas em duas dimensões considerando apenas o estado de tensão ou de deformação do plano perpendicular a largura do aderente, e assim, esses modelos negligenciam a tensão gerada pela variação da largura em função do comprimento do aderente (SILVA et al., 2008).

Por conseguinte, visto a existência dos diversos modelos citados, a elaboração de um modelo analítico mais geral, ou seja, que solucione problemas com diferentes parâmetros de contorno é muito complexa (XIAOCONG, 2011). Neste contexto, ferramentas com base no método de elementos finitos (MEF) são amplamente utilizadas na indústria e podem analisar as tensões de diversos tipos de junções, com geometrias, parâmetros de contorno diferentes e compensam limitações teóricas dos modelos analíticos (STAPLETON e WAAS, 2011). Tanto nos métodos analíticos quanto no método de elementos finitos, variáveis dimensionais como a espessura dos materiais aderentes, largura, espessura e comprimento da junção adesiva são consideradas.

A seguir será apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre os modelos analíticos mais comumente utilizados na literatura de junções adesivas e que serão utilizados para analisar as tensões nas junções adesivas estudadas nesse trabalho. Os modelos estudados serão os de Volkersen (1938), Goland e Reissner (1944) e de Hart Smith (1973). Em seguida, será apresentada uma revisão sobre o método de elementos finitos e um de seus modelos matemáticos utilizado para análise de tensões em adesivos (modelo de zona coesiva).

#### 4.6.1 Modelos analíticos

##### 4.6.1.1 Modelo analítico de Volkersen

O primeiro método analítico conhecido na literatura de junções adesivas é o de Volkersen (1938). O modelo proposto é a transferência de carga por cisalhamento de um aderente ao outro devido a cargas unidirecionais de tração. Neste método, tanto o efeito da flexão por cargas excêntricas, quanto a deformação dos aderentes são desconsiderados. Devido a negligência dos aspectos mecânicos citados, este modelo é a forma mais simples de analisar junções adesivas.

A distribuição da tensão ao cisalhamento ao longo da junção *single lap*,  $\tau$ , é representada a seguir:

$$\tau = \frac{P * w}{2 * b} * \frac{\cosh(wx)}{\sinh(wx)} * \frac{(t_t - t_b)}{(t_t + t_b)} * \frac{(w * l)}{2} * \frac{\sinh(wx)}{\cosh(\frac{wl}{2})} \quad (1)$$

$$w = \sqrt{\frac{G_a}{E * t_t t_a} * \left(1 + \frac{t_t}{t_b}\right)} \quad (2)$$

Onde,

$E$	Módulo de Young (MPa)
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\tau$	Tensão de cisalhamento (MPa)
$P$	Força de tração (N)
$w$	Coefficiente de transferência de tensão adesiva de Volkersen
$b$	Largura da área do adesivo (mm)
$t_t$	Espessura do aderente superior na junção <i>single lap</i> (mm)
$t_b$	Espessura do aderente inferior na junção <i>single lap</i> (mm)
$t_a$	Espessura do adesivo (mm)
$x$	Zona colada (mm)
$l$	Comprimento do adesivo ( <i>overlap</i> ) (mm)

A equação de Volkersen (1938) mostra que a tensão do adesivo é maior na borda do que no centro do adesivo, este princípio está representado na Figura 12.

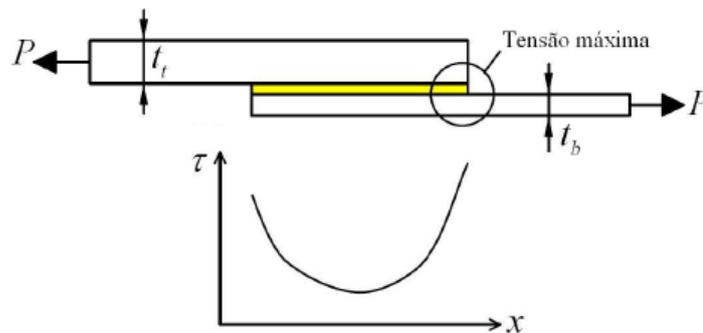


Figura 10 - Princípio de tensão máxima nas junções.

Fonte: Rodríguez (2011).

#### 4.6.1.2 Modelo analítico de Goland & Reissner

Ao contrário do modelo anterior, Goland e Reissner (1944) consideraram os efeitos de flexão, e esse efeito está representado pela Figura 11. Além disso, o alongamento e a deformação dos aderentes também são considerados. As etapas desta solução são: determinação dos carregamentos nas bordas das junções através da teoria de deflexão finita e determinação das tensões das junções em função do carregamento.

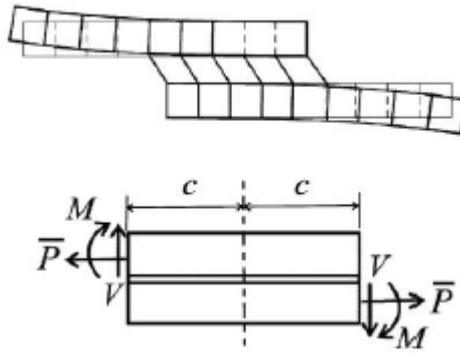


Figura 11 - Modelo de Goland & Reissner.

Fonte: Rodríguez (2011).

O modelo de cálculo da distribuição de tensão de cisalhamento está apresentado abaixo.

$$\tau = -\frac{1}{8} * \frac{\bar{P}}{c} \left\{ \frac{\beta * c}{t} * (1 + 3 * k) * \frac{\cosh\left(\frac{\beta * c * x}{t * c}\right)}{\sinh\left(\frac{\beta * c}{t}\right)} + 3(1 - k) \right\} \quad (3)$$

Onde,

$$K = \frac{\cosh(u_2 c)}{\cosh(u_2 c) + 2\sqrt{2} \sinh(u_2 c)} \quad (4)$$

$$u_2 = \frac{1}{t} \sqrt{\frac{3(1 - \nu^2)}{2}} * \sqrt{\frac{\bar{P}}{t * E}} \quad (5)$$

$$\beta^2 = 8 * \frac{G_a}{E} * \frac{t}{t_a} \quad (6)$$

Onde,

- $G_a$  Módulo de cisalhamento do adesivo (MPa)
- $\bar{P}$  Força de tração dividido pela largura da área do adesivo (N/mm)
- $c$  Metade do comprimento de *overlap* (mm)
- $t$  Espessura do aderente (mm)
- $k$  Fator de momento de flexão

A tensão de arrancamento, *peel*, é encontrada por  $\sigma$  através das formulações a seguir.

$$\sigma = \frac{1}{\Delta} * \frac{t * \bar{P}}{c^2} (A + B) \quad (7)$$

$$A = (R_2 \lambda^2 + \lambda k' \cosh(\lambda) \cos(\lambda)) \cosh\left(\frac{\lambda * x}{c}\right) \cos\left(\frac{\lambda * x}{c}\right) \quad (8)$$

$$B = (R_1 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \sinh(\lambda) \sin(\lambda)) \sinh\left(\frac{\lambda * x}{c}\right) \sin\left(\frac{\lambda * x}{c}\right) \quad (9)$$

$$k' = \frac{kc}{t} \sqrt{3(1 - \nu^2) * \frac{\bar{P}}{tE}} \quad (10)$$

$$\lambda = \gamma \frac{c}{t} \quad (11)$$

$$\lambda^4 = 6 \frac{E_a}{E} * \frac{t}{t_a} \quad (12)$$

$$\Delta = \frac{1}{2} (\sin(2\lambda) + \sinh(2\lambda)) \quad (13)$$

$$R_1 = \cosh(\lambda) \sinh(\lambda) + \sinh(\lambda) \cos(\lambda) \quad (14)$$

$$R_2 = -\cosh(\lambda) \sinh(\lambda) + \sinh(\lambda) \cos(\lambda) \quad (15)$$

Onde,

$\sigma$  Tensão de arrancamento (*peel*) (MPa)

$k'$  Fator transversal de força

#### 4.6.1.3 Modelo analítico de Hart-Smith

Ao contrário dos métodos anteriores em que o comportamento do adesivo foi admitido como elástico, Hart-Smith (1973) apresentou um modelo em que também considera sua plasticidade. Nas análises é considerado a tensão de clivagem elástica com cisalhamento plástico. A região de comprimento do adesivo é dividida em regiões de comportamento plástico e elástico, na qual a elástica fica nas bordas da junção, e a elástica no centro da junção. Essas regiões estão ilustradas na Figura 12.

O método de cálculo da tensão de cisalhamento é descrito abaixo. Para os três modelos apresentados, Volkersen (1938), Goland & Reissner (1944) e Hart-Smith (1973) as variáveis  $\bar{P}$ ,  $G_a$ ,  $t_a$ ,  $E$ ,  $E_a$ ,  $\nu$ ,  $t$  e  $c$  tem o mesmo significado.

$$\tau_{(x)} = A_2 * \cosh(2\lambda'x) + C_2 \quad (16)$$

$$\lambda' = \sqrt{\left[ \frac{1 + 3(1 - \nu^2)}{4} \right]} \frac{2G_a}{t_a E t} \quad (17)$$

$$A_2 = \frac{G_a}{t_a E t} * \left[ \bar{P} + \frac{6(1 - \nu^2)M}{t} \right] \frac{1}{2\lambda' \sinh(2\lambda' c)} \quad (18)$$

$$C_2 = \frac{1}{2c} \left[ \bar{P} - \frac{A_2}{\lambda'} \sinh(2\lambda' c) \right] \quad (19)$$

$$M = \bar{P} * \left( \frac{t + t_a}{2} \right) \frac{1}{1 + \xi c + \frac{\xi^2 c^2}{6}} \quad (20)$$

$$\xi^2 = \frac{\bar{P}}{D} \quad (21)$$

Onde D é a rigidez de flexão do material aderente,

$$D = \frac{E t^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (22)$$

Temos a tensão de arrancamento de Hart-smith:

$$\sigma_{(x)} = A \cosh(\chi x) \cos(\chi x) + B \sinh(\chi x) \sin(\chi x) \quad (23)$$

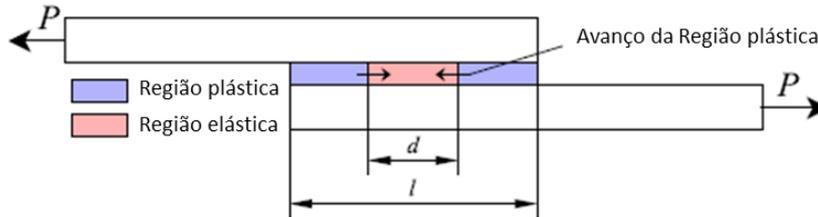


Figura 12 - Zonas de tensões plásticas e elásticas do modelo de Hart-Smith.

Fonte: adaptado Rodríguez (2011).

Temos a tensão de cisalhamento da zona elástica:

$$\tau_{(x)} = A_2 \cosh(2\lambda' x) + \tau_p (1 - K) \quad (24)$$

Também temos a deformação de cisalhamento na região plástica:

$$\gamma_{(x')} = \gamma e \{ 1 + 2K [(\lambda' x')^2 + \lambda' x' \tanh(\lambda' d)] \} \quad (25)$$

$$A_2 = \frac{k \tau_p}{\cosh(\lambda' d)} \quad (26)$$

Onde  $\tau_p$  é a tensão plástica de cisalhamento. Através de uma abordagem interativa pode-se encontrar  $A_2$ ,  $k$  e  $d$  através das equações a seguir:

$$\frac{\bar{P}}{l\tau_p}(\lambda'l) = 2\lambda' \left(\frac{l-d}{2}\right) + (1-K)(\lambda'd) + K \tanh(\lambda'd) \quad (27)$$

$$\left[1 + 3k(1-\nu^2)\left(1 + \frac{t_a}{t}\right)\right] \frac{\bar{P}}{\tau_p} \lambda^2 \left(\frac{l-d}{2}\right) = 2 \left(\frac{\gamma_p}{\gamma_e}\right) + \left[2\lambda' \left(\frac{l-d}{2}\right)\right]^2 \quad (28)$$

$$2 \left(\frac{\gamma_p}{\gamma_e}\right) = k \left\{ \left[2\lambda' \left(\frac{l-d}{2}\right) + \tanh(\lambda'd)\right]^2 - \tanh^2(\lambda'd) \right\} \quad (29)$$

Onde,

$\gamma_{(x')}$  Deformação plástica por cisalhamento

#### 4.7 Critérios de falha de junções adesivas

Critérios de falha tem o objetivo de predizer se ou até quando um determinado componente estrutural irá resistir às cargas estáticas, de impacto ou cíclicas (KOH; MADSEN, 2018). Segundo Randolph e Clifford (2004), os principais critérios de falha aplicados a uniões adesivas estão agrupados nas seguintes categorias:

- Máximo valor de tensão ou deformação;
- Tensão ou deformação máxima à uma distância ou sobre uma zona;
- Critério da zona ou estado limite;
- Critérios baseados em energia;
- Critérios baseados na mecânica da fratura;
- Critérios baseados na mecânica do dano.

Rodriguez (2011) e Moura (2016) utilizaram critérios baseados em energia em seus trabalhos tais como: critério do envelope de falha energético e densidade de energia de deformação. O critério do envelope de falha energética considera a combinação de força nos extremos das junções e o de densidade de energia de deformação considera como critério de falha a área abaixo da curva de um ensaio de cisalhamento puro. Ambos os critérios mostraram eficientes, no entanto, demandam de valores de ensaios de tensões normais (ASTM 2095) e de cisalhamento puro (ASTM D5656), as quais medem a deformação

particular do adesivo.

A literatura de critérios de falhas é extensa, por isso, neste trabalho será utilizado somente o critério de máximo valor de tensão ou deformação para comparar os resultados do ensaio de cisalhamento com os resultados de tensão de cisalhamento e arrancamento dos modelos analíticos.

#### 4.7.1 Máximo valor de tensão ou deformação

Esse critério é o mais utilizado e considerado como o mais intuitivo para analisar junções adesivas. Como o próprio nome diz, ele considera como a máxima tensão ou deformação crítica de um componente estrutural seu valor máximo de tensão ou deformação.

Para análises de junções adesivas, o método de Volkersen considera somente a deformação por cisalhamento, e, portanto, o máximo valor da deformação encontrado por esse modelo é a deformação crítica da junção. Sendo assim, é lógico considerar a máxima deformação de cisalhamento como critério de falha quando utilizado o modelo de Volkersen (RODRIQUEZ, 2011).

Com os métodos de análise de tensão adesiva é possível obter as distribuições de tensões de cisalhamento e de arrancamento. Como foi apresentado ao longo do trabalho, sabe-se que em junções adesivas, a tensão máxima de cisalhamento e de arrancamento acontece nas bordas da junção, logo estas correspondem aos os valores de tensão máxima. Com o progressivo aumento da carga na junção é possível atingir o valor máximo de tensão nessas junções e então conhecer a sua carga de falha. A Figura 13 representa esse aumento progressivo de carga até alcançar o máximo valor de tensão de cisalhamento (Figura 13.a) e de arrancamento (Figura 13.b) a partir do modelo de Goland e Reissner.

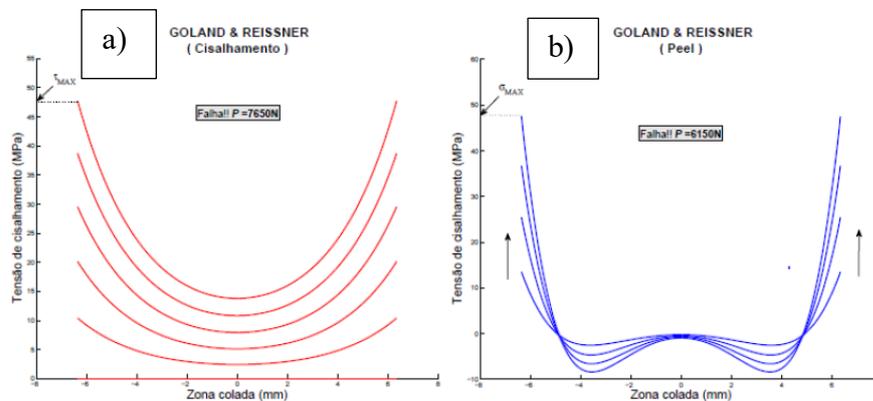


Figura 13 - Aumento progressivo de carga para obter o valor de tensão máxima de cisalhamento (a) e tensão máxima de arrancamento (b).

Fonte: Rodriguez (2011).

## 5 Materiais e Métodos

Na Figura 14 é apresentado um esquema do procedimento experimental utilizado neste trabalho. Como pode ser observado nesta Figura, o primeiro passo para a execução do trabalho foi a definição das junções adesivas, onde foram escolhidos os materiais aderentes (Alumínio 8011 e material compósito baseado em fibras de carbono) e o adesivo (LORD® 852 acrílico). Definido as junções adesivas, tais materiais foram submetidos ao Modelo Analítico e a um ensaio experimental. Posteriormente o resultado de cada estudo foi analisado.

O ensaio experimental utilizado no trabalho consistiu em realizar o ensaio de cisalhamento de junções adesivas conforme a norma ASTM D1002 (2010). Para isso, foi necessário fabricar os materiais aderentes utilizados, preparar a superfície dos aderentes e fabricar as junções adesivas por meio da aplicação do adesivo. Para a utilização do Modelo Analítico foi necessário o desenvolvimento de uma rotina de cálculo no MATLAB® com os modelos de Volkersen, Goland e Reissner e Hart-Smith. Com essa rotina de cálculo foi possível obter os resultados dos modelos analíticos.

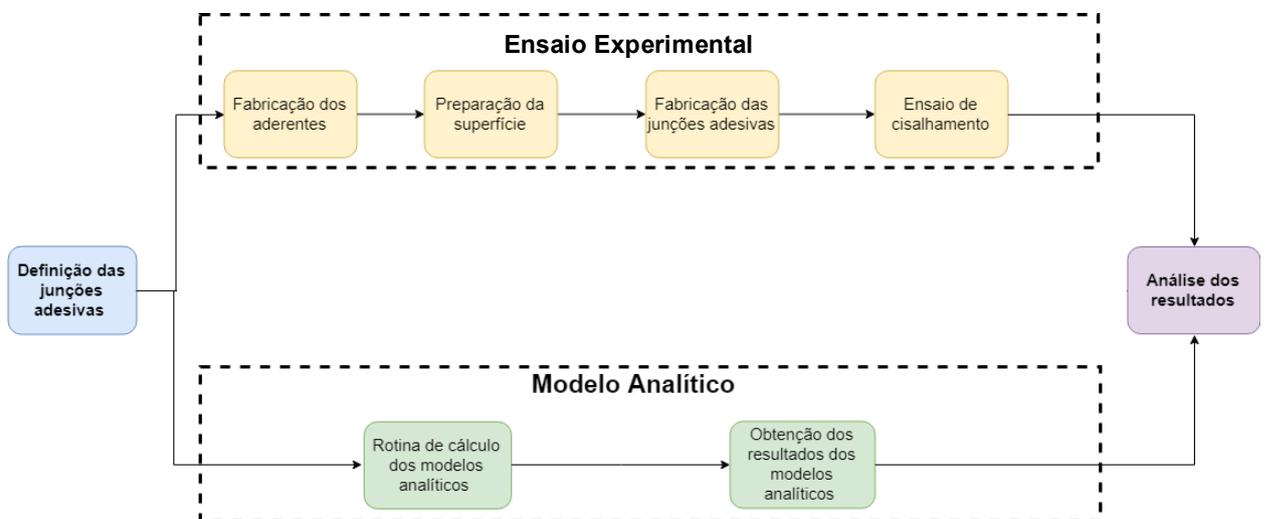


Figura 14 - Esquema do procedimento experimental.

Fonte: própria.

### 5.1 Componentes das junções adesivas

#### 5.1.1 Liga de alumínio 8011

O material metálico utilizado como aderente nas junções estudadas neste trabalho foi a liga de alumínio 8011 H18, produzida pelo processo de laminação a frio. Esta é uma liga que

possui a combinação de alta conformabilidade com elevada resistência mecânica. Segundo Lima (2005), a liga 8011 é uma das mais versáteis ligas comerciais de alumínio da atualidade e sua utilização se encontra, em grande parte na fabricação de embalagens alimentícias flexíveis, utensílios domésticos e estruturas mecânicas. As propriedades mecânicas desta liga são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do alumínio 8011 H18.

Fonte: adaptado de Lima (2005).

<b>Liga de alumínio 8011 H18</b>	
Módulo de elasticidade (MPa)	69000
Módulo de cisalhamento (MPa)	25940
Limite de escoamento (MPa)	170
Limite de resistência à tração (MPa)	180
Coefficiente de Poisson	0,33
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,61

#### 5.1.2 Compósito de resina epóxi e fibras de Carbono

Outro material utilizado como aderente nesta pesquisa, foi o compósito de resina epóxi e fibras de carbono. Este material segundo Morais e Almeida (2003), reúne alta resistência mecânica, proveniente das fibras de carbono, com a baixa densidade da matriz polimérica, resultando em um material com melhor desempenho e mais leve. Na Tabela 5 são apresentados alguns dados relevantes do compósito laminado de fibra de carbono utilizado como aderente neste trabalho. Todos estes dados foram obtidos experimentalmente e estão apresentados no Apêndice B.

Tabela 5 - Propriedades do compósito de resina epóxi com fibras de carbono.

Fonte: própria.

<b>Compósito de resina epóxi com fibras de carbono</b>	
Módulo de elasticidade (MPa)	74120 ±3520
Limite de resistência à tração (MPa)	341,1 4± 39,41
Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) (picnometria)	1,373
Fração volumétrica de fibras (Determinada por termogravimetria)	53%

### 5.1.3 Adesivo estrutural

O adesivo usado neste estudo, LORD® 852, é um adesivo acrílico bi-componente, curado por reação química entre seus dois componentes. De acordo com a especificação do fabricante, o tempo de cura do adesivo é de 24 horas em temperatura ambiente. Esse adesivo estrutural tem um desempenho particularmente bom em ambientes de baixa temperatura e em aplicações sujeitas a alto impacto, altas tensões de arrancamento ou alta fadiga. As propriedades mecânicas desse adesivo são mostradas na Tabela 6, e serão utilizadas para análise estrutural das junções estudadas neste trabalho.

Tabela 6 - Propriedades do adesivo utilizado.

Fonte: LORD® adesivos.

<b>Adesivo Acrílico Utilizado</b>	
Módulo de elasticidade (MPa)	862
Módulo de cisalhamento (MPa)	303
Coefficiente de Poisson	0,42

## 5.2 Experimental

### 5.2.1 Fabricação dos aderentes

Primeiramente foram fabricadas as chapas da liga de alumínio 8011 H19. As dimensões das chapas foram as seguintes: 100 mm de comprimento, 25 mm de largura e 1,5mm de espessura. Essa dimensão corresponde a recomendada pela norma ASTM D1002 (2010), a qual será explicada na seção de ensaio de cisalhamento. As peças de alumínio foram lixadas com uma lixa de numeração 320 para introduzir rugosidade no material.

O segundo aderente por sua vez, foi o compósito de matriz epóxi baseado em fibras de carbono. Uma placa laminada de material compósito (230 mm de largura x 230 mm de comprimento) foi manufaturada no laboratório de Processamento de Materiais da Unifei – campus Itabira. Esta placa foi fabricada para que posteriormente fossem cortados os corpos de prova necessários para a fabricação das junções adesivas alumínio-fibras de carbono. A seguir, serão apresentados os materiais e os métodos usados na fabricação desta placa laminada.

Materiais:

Balança; Breather; Bomba de vácuo; Bolsa de vácuo; Desmoldante; Filme perfurado, Fita selante de vedação - Tacky tape, Mangueira transparente; *Peel Ply*; Pincel; Placa de vidro (molde); Resina epóxi bi-componente: resina epóxi/endurecedor (E260) / E35) na proporção

de 100:45; Tecido de fibra de carbono bidirecional (0/90), gramatura = 200 g/m<sup>2</sup>;

Fabricação da placa laminada de material compósito pelo método de laminação manual com bolsa de vácuo:

Antes da confecção do material compósito o cálculo da proporção de resina e endurecedor que deveria ser utilizada foi realizado. Para a realização deste cálculo foi considerado a área a ser laminada, a gramatura do tecido de fibra de carbono, o número de camadas de tecido de fibra de carbono e um fator de correção. Este fator de correção refere-se a uma margem de segurança de 30% que foi utilizada a fim de evitar que faltasse resina durante o processo de laminação manual.

$$M_{resina+endurecedor} = \text{Área laminada (m}^2\text{)} * \text{gramatura} \left(\frac{g}{m^2}\right) * N_{camadas} * F_{correção}$$
$$M_{mistura} = 0,23^2 \text{ m}^2 * 200 \frac{g}{m^2} * 8 * 1,3 = 110,03 \text{ g}$$

A quantidade de cada componente foi calculada considerando a proporção de resina epóxi/endurecedor que deveria ser utilizada (100:45), conforme apresentado abaixo.

$$\begin{aligned} 145 \text{ gramas mistura} - 100 \text{ gramas de resina} \\ 110,03 \text{ gramas de mistura} - X \text{ gramas de resina} \end{aligned}$$

Calculando a regra de três apresentada acima, temos que a massa de resina necessária é de 75,88 gramas. Como a massa total da mistura de resina e endurecedor é de 110,03 gramas, abaixo temos a seguinte relação.

$$M_{endurecedor} = 110,03 - 75,88 = 34,15 \text{ g de endurecedor.}$$

Em seguida foi realizado o corte das camadas de tecido de fibra de carbono, *Peel ply*, *Breather* e filme perfurado que seriam utilizados para laminar a peça. O *Peel-ply* é um tecido de Nylon que deve ser usado para evitar que o laminado fique aderido à bolsa de vácuo na etapa de desmoldagem. O filme perfurado é um material plástico que possui resistência aos solventes e que possui a função de deixar passar ou bloquear a passagem de resina no laminado. Já o *Breather* é um tecido absorvente e poroso fabricado a partir de filamentos não

tramados de fibra poliéster que possuem microperfurações para passagem do ar, mantendo a pressão de vácuo constante durante o processo de laminação com bolsa de vácuo.

A fita selante de vedação foi fixada no molde e o desmoldante foi aplicado ao molde. Após a secagem do desmoldante iniciou-se a etapa de laminação.

Uma camada de resina foi pincelada sobre a área do molde. A seguir foi feita a deposição de uma camada de tecido de fibra de carbono. Camadas subsequentes foram laminadas com tecidos de fibra de carbono e resina epóxi nessa mesma sequência. No total foram utilizadas 8 camadas de fibra de carbono e resina epóxi.

Ao final da laminação da última camada, colocou-se o *Peel-ply*. Em seguida, uma camada de filme perfurado e uma de *Breather* foram posicionadas acima do *Peel-ply*. Finalmente, o laminado foi então coberto por uma bolsa de vácuo. Após o fechamento da bolsa de vácuo com a fita selante, a bomba de vácuo conectada à bolsa foi ligada a fim de auxiliar na distribuição da resina e retirar as bolhas de ar entre as camadas. O vácuo foi aplicado no compósito durante aproximadamente três horas e a cura foi feita à temperatura ambiente durante 24 horas. A Figura 15 mostra um esquema do processo de laminação manual com bolsa de vácuo e a Figura 16 apresenta uma fotografia do laminado no momento de aplicação do vácuo.

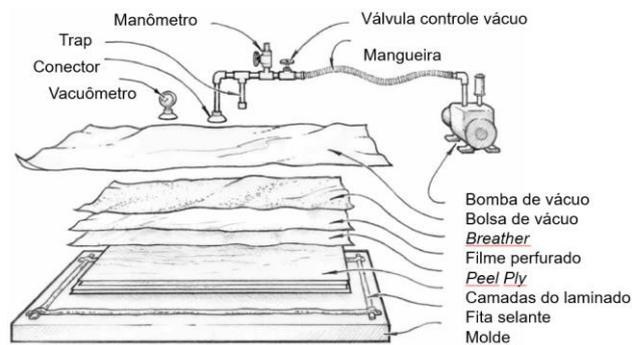


Figura 15 - Esquema do processo de laminação manual com bolsa de vácuo.

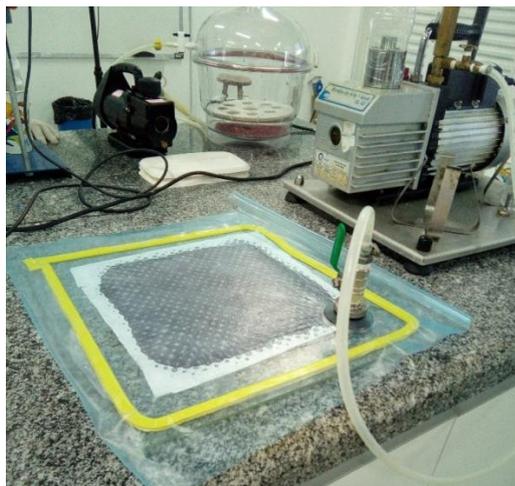


Figura 16 - Fotografia do laminado no momento de aplicação do vácuo.

Fonte: própria.

Após este intervalo de 24 horas o laminado foi desmoldado e as rebarbas foram cortadas com o auxílio de uma microretífica Dremmel 175W.

#### 5.2.2 Fabricação dos corpos de prova de junções adesivas

Os corpos de prova das junções adesivas foram preparados no laboratório de metalografia da CBA e estão representados pela Figura 19.

Para obtenção dos corpos de prova do material compósito a placa laminada foi cortada usando uma microretífica Dremmel 175W. Foram obtidos 9 corpos de prova do material compósito com as seguintes dimensões: 25 mm de largura x 100 mm de comprimento x 2,25 mm de espessura.

Para aumentar a aderência do adesivo ao aderente, a superfície dos aderentes foi limpa com álcool isopropílico, a fim de remover as impurezas provenientes do processo de fabricação (laminação e corte), oleosidade e o óxido de alumínio residual.

Após a preparação das superfícies, o comprimento de *overlap* foi demarcado nos corpos de prova. E, finalmente aplicado um adesivo acrílico por meio de uma pistola aplicadora que mistura o adesivo com o seu endurecedor (Figura 17). Após a aplicação, este adesivo requer um tempo mínimo de 24 horas de cura. Não houve controle de espessura da camada do adesivo no processo de fabricação, no entanto o adesivo utilizado possui em sua composição microesferas de vidro que garantem uma camada mínima de 0,3 mm de espessura. Essa medida foi verificada no final da fabricação das junções através de um micrometro, em que verificou a espessura da junção e espessura do aderente, onde foi encontrado a espessura do adesivo com no mínimo 0,3 mm.



Figura 17 - Adesivo e pistola aplicadora.

Fonte: própria.

Ao todo foram fabricadas 24 junções adesivas, 15 de alumínio/alumínio e 9 de alumínio/fibra de carbono. As junções de alumínio/alumínio (identificadas com o prefixo AA) foram divididas em 5 grupos de diferentes comprimentos de *overlap* de adesivo para avaliar a relação com a resistência mecânica, essas junções estão apresentadas na Tabela 7. Já as junções de alumínio/fibra de carbono (identificadas com o prefixo AC) foram divididas em 3 grupos de diferentes comprimentos de *overlap*.

Tabela 7 - Junções adesivas fabricadas.

Fonte: própria.

<b>Junções Adesivas Fabricadas</b>			
<b>Identificação</b>	<b>Comprimento de <i>Overlap</i></b>	<b>Largura do adesivo</b>	<b>Quantidade</b>
AA.0,25"	0,25"	1"	3
AA.0,5"	0,5 "	1"	3
AA.0,75"	0,75"	1"	3
AA.1"	1"	1"	3
AA.1,5"	1,5"	1"	3
AC.0,25"	0,25"	1"	3
AC.0,50"	0,5 "	1"	3
AC.0,75"	0,75"	1"	3

\*\*AA representa junções de alumínio/alumínio. AC representa junções de alumínio/compósito baseado em fibras de carbono.

Os corpos de prova prontos para serem ensaiados podem ser vistos na Figura 18(a-b), onde é mostrado em sequência os grupos: AA.0,25", AA.0,5", AA.0,75", AC.0,25", AC.0,50" e AC.0,75".

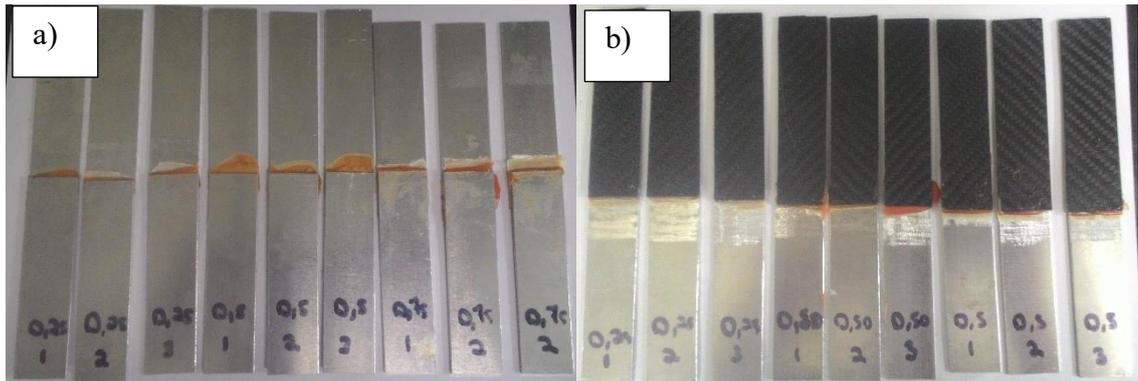


Figura 18 – Corpos de prova AA (a) e AC (b) prontos para serem ensaiados.

Fonte: própria.

### 5.2.3 Ensaio de cisalhamento

O ensaio de cisalhamento em junções adesivos é utilizado para caracterizar a tensão aparente de falha por cisalhamento. O ensaio consiste na aplicação de uma força de tração em uma junção adesiva de modo que gere uma tensão de cisalhamento no adesivo. Uma máquina de ensaio de tração convencional pode ser utilizada, e durante o ensaio é gerado um gráfico de tensão x deformação da junção. O fim do ensaio é caracterizado pela ruptura da junção.

Esse ensaio é baseado nas normas ASTM D1002 (2010) e ASTM D5868-01 (2017). A norma ASTM D1002 (2010) é aplicada a junções *single lap* de metal com metal, e a norma ASTM D5868-01 (2017) é um complemento da primeira norma e estende essa aplicação para junções *single lap* de compósito com compósito (SEONG et al., 2008). A Figura 19 mostra as dimensões básicas da junção conforme a norma ASTM D1002 (2010). Os símbolos das figuras representam: comprimento *overlap* ( $l$ ), espessura do aderente superior na junção ( $Tt$ ) e espessura do aderente superior na junção ( $Tb$ ).

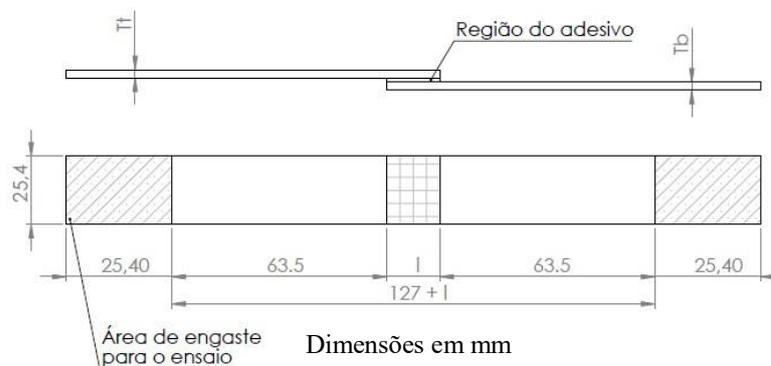


Figura 19 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de cisalhamento de adesivo.

Fonte: autoria própria adaptado de ASTM D1002.

Os ensaios de *single lap* foram realizados à temperatura ambiente utilizando uma

máquina de ensaios universal EMIC (modelo 23-100), no laboratório de ensaios mecânicos da CBA A célula de carga foi de 10 kN e a velocidade de ensaio foi de 1,5 mm/min. A área de engaste utilizada foi de 25 mm de largura x 25 mm de comprimento dos corpos de prova, conforme a Figura 19. Na Figura 20 a máquina utilizada no trabalho é mostrada durante o ensaio de uma junção *single lap* de alumínio/fibra de carbono. Não foram utilizados “tabs” para centralizar a força de tração nas junções, e essa não utilização é permitida pela norma.



Figura 20 - Fotografia da máquina utilizada nos ensaios de cisalhamento de uma junção *single lap* de alumínio/composito baseado em fibras de carbono.

Fonte: própria.

Durante o teste, um sistema de aquisição de dados monitorava o carregamento e a deformação dos corpos de prova. O carregamento de tração dividido pela área de colagem (área de cisalhamento) equivale a tensão de cisalhamento medida no ensaio, e com esses dados o sistema calculava a resposta de tensão por deformação da junção. Esses valores obtidos no ensaio serão mostrados na seção de resultados.

### 5.3 Modelos analíticos

Com o auxílio do software MATLAB®, foi implementado em uma rotina de cálculo os modelos analíticos de Volkersen, Goland e Reisner e Hart-Smith. Com essa rotina, o usuário entra com os parâmetros da junção *single lap* estudada. Essas condições de contorno estão mostradas na Figura 21, e são: o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, espessura e comprimento de *overlap* do adesivo e do aderente. Após a inserção desses dados, são obtidas as curvas de distribuição de tensão de cisalhamento e arrancamento dos modelos

analíticos.

A Figura 22 exemplifica a seção de cálculos das tensões de cisalhamento e arrancamento através do modelo de Goland e Reissner presente na rotina do MATLAB®. Após a seção de cálculos, os resultados de tensão de cisalhamento e tensão de arrancamento são plotados em função da posição do adesivo no comprimento da junção, e serão apresentados na seção 6. A rotina completa está contida no Apêndice A.

```

##### CONDIÇÕES DE CONTORNO #####

E = 69000;           % Módulo de elasticidade aderente [MPa]
P = 1000;           % Força de tração [N]
Tt = 1.5;           % Espessura do aderente superior [mm]
Tb = 1.5;           % Espessura do aderente inferior [mm]
Ta = 0.3;           % Espessura do adesivo [mm]
l = 0.5 *25.4;      % Comprimento inicial do adesivo (mm)
b = 25.4;           % Largura da junção [mm]
l1 = l/2;           % Metade do comprimento do adesivo [mm]
Xo = -l1 :0.1: l1;  % Overlap [mm];
Pb = P/b;           % Força dividida a largura [N]
c = l/2;            % metade do comprimento de overlap
t = Tt;            % espessura do aderente [mm]
poisson_a = 0.42;   % coeficiente de poisson adesivo
poisson = 0.33;     % coeficiente de poisson aderente
Ea = 862;           % Módulo de elasticidade adesivo [MPa]
Ga = Ea/(2*(1+poisson_a)); % modulo de cisalhamento do adesivo

```

Figura 21 - Tela de entrada das condições de contorno para o cálculo.

Fonte: própria.

```

##### GOLAND & REISSNER - MODELO MATEMATICO
%Tensão de cisalhamento - GOLAND & REISSNER

beta = sqrt((8*Ga*t)/(E*Ta));
u2 = 1/t*(sqrt(1.5*(1-poisson^2)))*(sqrt(Pb/(t*E)));
k = (cosh(u2*c)/(cosh(u2*c)+(2*(sqrt(2))*sinh(u2*c)))); %fator do momento de flexão
Tcis_Goland = 1/8 .* (Pb/c) .* ((beta*c/t) .* (1+3*k) ...
    .* (cosh((beta .* Xo)/(t))/(sinh((beta .*c)/t)))) + (3 .* (1-k)); % Tensão de cisalhamento de GOLAND

%Tensaob de peel - GOLAND & REISSNER
gama = (6*(Ea*t)/(E*Ta))^(0.25);
lambda = gama *c/t;
delta = 0.5*(sin(2*lambda)+sinh(2*lambda)); %coeciente delta
klinha = ((k*c/t)*sqrt((3*(1-poisson^2)*(Pb/(t*E))))); %fator transversal de foça
R1 = ( cosh(lambda)*sin(lambda) )+(sinh(lambda)*cos(lambda));
R2 = ( -cosh(lambda)*sin(lambda) )+(sinh(lambda)*cos(lambda));
GOL_A = ((R2 *lambda^2 *k *0.5)+(lambda .*klinha .*cosh(lambda) .*cos(lambda)))*...
    cosh((lambda .* Xo)/c) .*cos((lambda .* Xo)/c);
GOL_B = ((R1 *lambda^2 *k .*0.5)+(lambda .*klinha .*sinh(lambda) .*sin(lambda))*...
    sinh((lambda .*Xo /c) .*sin((lambda .*Xo /c)));
Tpeel_Goland = (1/delta).*(Pb*t/c^2).*(GOL_A+ GOL_B); % Tensão de peel de goland

```

Figura 22 - Seção de cálculo do modelo analítico de Goland e Reissner.

Fonte: própria.

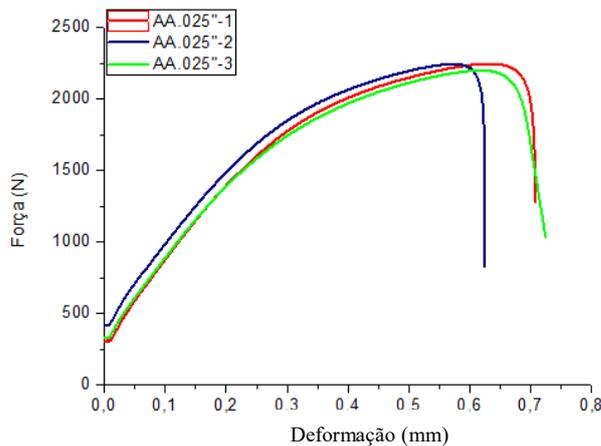
## 6 RESULTADOS

Esta seção se dedica a analisar os resultados do ensaio de cisalhamento e dos modelos analíticos desenvolvidos no trabalho.

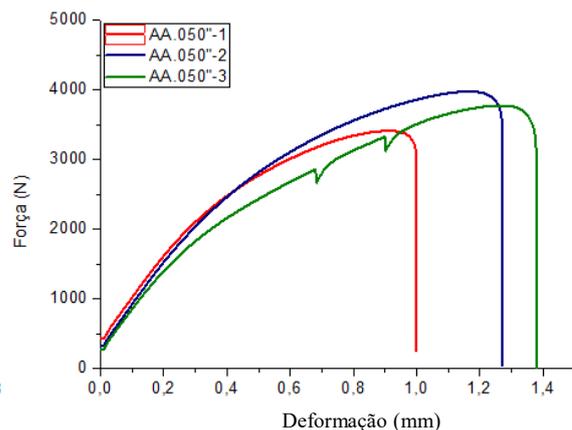
### 6.1 Ensaio de cisalhamento

Para investigar a influência do comprimento de *overlap* na resposta de Força (N) x deformação (mm) das junções *single lap* foram ensaiadas 8 configurações de junções adesivas, cada configuração continha 3 espécimes. As junções de alumínio/alumínio (identificadas com o prefixo AA) foram divididas em cinco grupos de diferentes comprimentos de *overlap* (0,25", 0,5", 0,75", 1" e 1,5"). Já as junções de alumínio/compósito baseado em fibra de carbono (identificadas com o prefixo AC) foram divididas em três grupos de diferentes comprimentos de *overlap* (0,25", 0,5" e 0,75"). Essas divisões das configurações das junções já foram mostradas na Tabela 7.

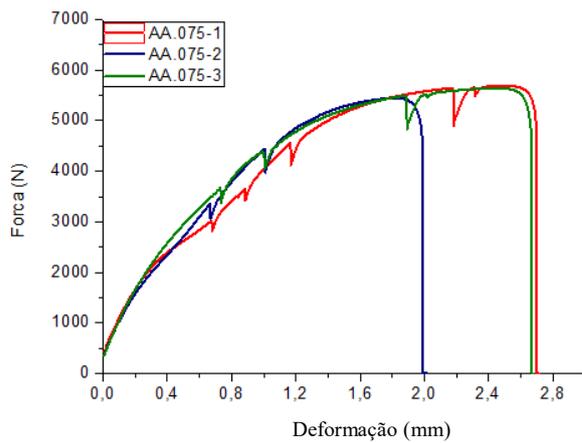
Na Figura 23 (a, b, c, d, e) são apresentadas as curvas Força x Deformação de juntas de sobreposição simples AA.0,25", AA.0,5", AA.0,75", AA.1,0" e AA.1,5". Já na Figura 24 (a, b, c) são apresentadas as curvas Força x Deformação de juntas de sobreposição simples AC.0,25", AC,05" e AA.0,75".



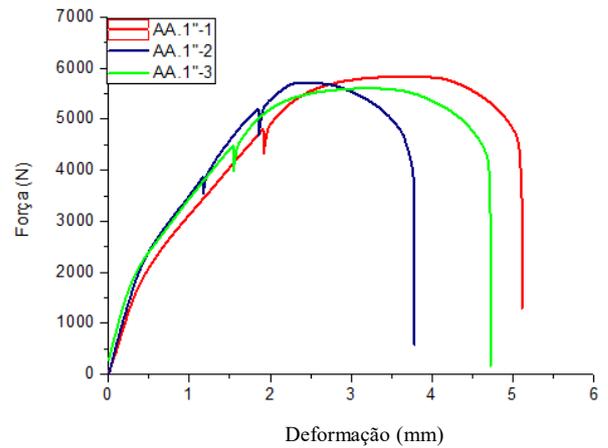
(a) Comprimento de *overlap* de 0,25".



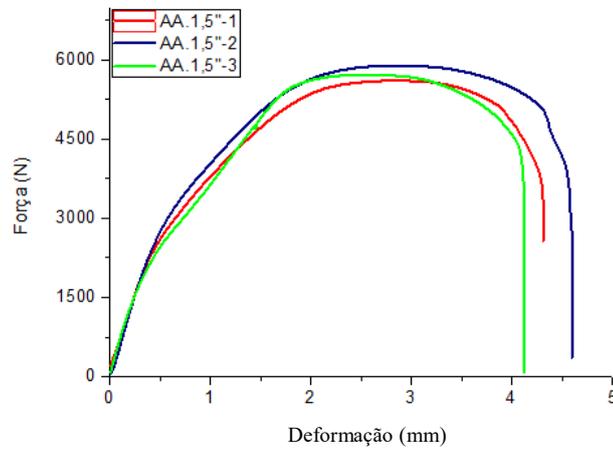
(b) Comprimento de *overlap* de 0,50".



(c) Comprimento de *overlap* de 0,75".



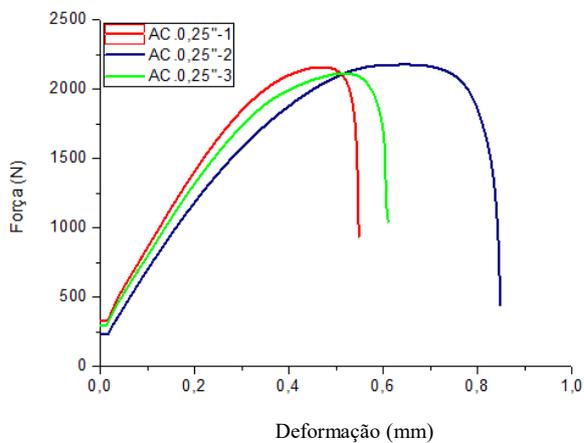
(d) Comprimento de *overlap* de 1,00".



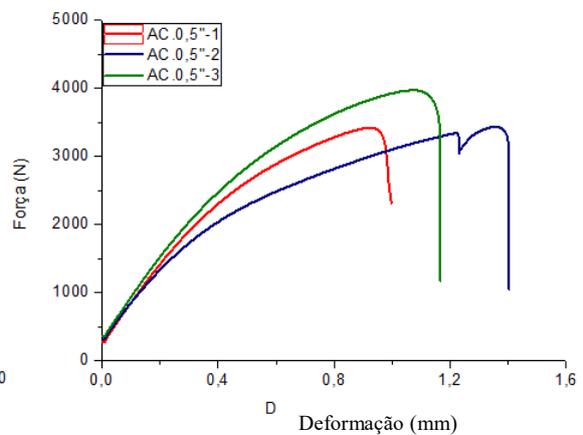
(e) Comprimento de *overlap* de 1,50".

Figura 23 - Curvas de Força (N) x deformação (mm) de junções adesivas de alumínio/alumínio para diferentes comprimentos de *overlap*.

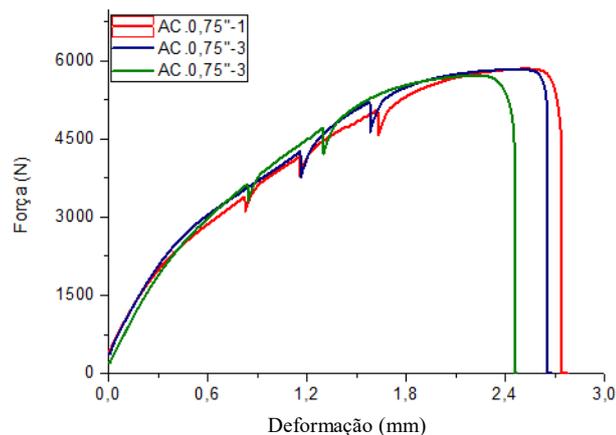
Fonte: própria (2018).



(a) Comprimento de *overlap* de 0,25".



(b) Comprimento de *overlap* de 0,50".



(c) Comprimento de *overlap* de 0,75''.

Figura 24 - Curvas de Força (N) x deformação (mm) de junções adesivas de alumínio/compósito baseado em fibras de carbono para diferentes comprimentos de overlap.

Fonte: própria.

Após analisar as Figuras 23 e 24 é possível notar que em todos os casos até um determinado valor de força o comportamento das curvas é linear, e isto significa que o comportamento mecânico da junção até essa carga é elástico. Vale lembrar que na fase elástica a deformação que um material sofre é do tipo não permanente, ou seja, nesse regime o material tem a habilidade de retornar as dimensões iniciais depois de cessado o esforço mecânico. Além disso, nesse regime há uma proporcionalidade linear entre o avanço da força e a deformação. Depois de atingido o limite elástico, nota-se que essa proporcionalidade entre a força e deformação já não existe mais. O comportamento da junção a partir do limite elástico é plástico e a deformação é permanente e não linear.

Como durante o ensaio mecânico *single lap* não foi utilizado nenhum sensor de deformação do tipo *Strain Gauge* para medir as deformações de cada um dos componentes da junção adesiva separadamente, não foi possível inferir qual o material iniciou a fase plástica primeiro ou qual foi a deformação de cada material da junção isoladamente.

A média dos valores de carga de falha e de deformação para cada tipo de configuração de junção submetidas ao ensaio de cisalhamento estão contidas nas Tabelas 9 e 10. Também é apresentado nessas tabelas o percentual de erro padrão dos valores máximos de carga de falha e deformação referentes ao resultado médio obtido para os três corpos de prova de cada configuração de junção.

Vale notar que o desvio padrão dos valores de carga de falha foram relativamente baixos (menores que 3%), para a maior parte das configurações de junção ensaiadas, exceto para as configurações de junção AA.0,5'' e AC.0,5'' que apresentaram desvio de 7,68%

(Tabela 8) e 8,76% (Tabela 9), respectivamente. Ambos os valores foram bem semelhantes, e podem estar relacionados com o fato das duas junções possuírem o mesmo comprimento de *overlap*.

Também é mostrado nas Tabelas 9 e 10 a tensão aparente de falha por cisalhamento, que corresponde a tensão de cisalhamento na camada do adesivo obtida no ensaio. Observa-se que quanto maior o tamanho do comprimento de *overlap*, menor foi o valor de tensão aparente de falha por cisalhamento. Essa tensão foi calculada a partir da razão entre a carga de ruptura e a área do adesivo, usando a equação abaixo que está de acordo com a norma ASTM D1002 (Equação 30).

Vale mencionar que a tensão aparente de falha não pode ser calculada para as junções AA.1” e AA.1,5” pois nessas junções a carga de falha não representa a ruptura do adesivo, mas sim do aderente.

$$\tau_{aparente} = \frac{P_{falha}}{b * l} \quad (30)$$

Onde  $P_{falha}$  é a tensão aparente de falha por cisalhamento (MPa),  $b$  é a largura da junção (mm) e  $l$  é o comprimento de *overlap* (mm).

Tabela 8 - Resultados do ensaio de cisalhamento das Junções de alumínio/alumínio.

Fonte: própria.

Junção Alumínio/Alumínio					
Junção	Carga Média de Falha (N)	Erro padrão (%)	Deformação média (mm)	Erro padrão (%)	Tensão aparente de falha por cisalhamento (MPa)
AA.0,25"	2229,944	1,18%	0,603	4,78%	13,83
AA.0,5"	3719,854	7,68%	1,110	16,88%	11,53
AA.0,75"	5594,381	2,29%	2,243	16,75%	11,56
AA.1"	5724,789	2,06%	3,023	21,70%	-
AA.1,5"	5784,957	2,68%	3,277	22,56%	-

Tabela 9 – Resultados do ensaio de cisalhamento das junções de alumínio/compósito baseado em fibras de carbono.

Fonte: própria.

Junção Alumínio/Compósito baseado em fibras de carbono					
Junção	Carga Média de Falha (N)	Erro padrão (%)	Deformação média (mm)	Erro padrão (%)	Tensão aparente de falha por cisalhamento (MPa)
AC.0,25"	2150,090	1,51%	0,547	17,00%	13,33
AC.0,5"	3605,273	8,76%	1,117	20,03%	11,18
AC.0,75"	5803,792	1,22%	2,403	6,97%	11,99

Com os valores apresentados nas Tabelas 8 e 9 é possível plotar o gráfico de evolução

de carga de falha e da deformação em função do comprimento de *overlap*. Estes gráficos estão representados na Figura 25.a e 25.b. É possível notar que os valores de cargas de falha e deformações das junções AA e AC foram semelhantes até o comprimento de 0,75” de adesivo. Não é possível concluir o mesmo para comprimentos a partir de 0,75” em junções de alumínio/compósito baseado em fibras de carbono pois não foi possível realizar os ensaios para os comprimentos de 1” e 1,5”.

A Figura 25.a mostra que comprimentos de *overlap* maiores que 1” não alteram significativamente a carga de falha no caso estudado, e isso significa que fabricar junções com valores maiores de comprimento de *overlap* não garantem a resistência mecânica adicional, sendo então desperdício de material e acréscimo de peso “morto” em uma estrutura.

A Figura 25.b mostra a evolução da deformação em função do comprimento de *overlap*. É notável que o comportamento de deformação das duas curvas foi semelhante até 0,75” de *overlap*.

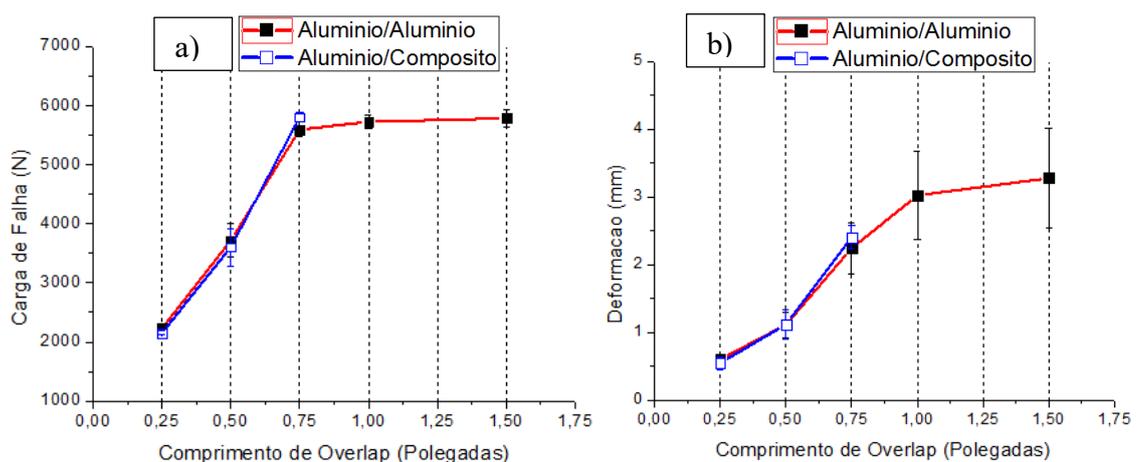


Figura 25 -Variação da força máxima pelo comprimento de *overlap* das junções alumínio/alumínio e alumínio/compósito baseado em fibra de carbono.

Fonte: própria (2018).

Pelos os resultados experimentais resultantes do ensaio de cisalhamento, observa-se que as junções estudadas mostraram que a carga de falha aumenta à medida que o comprimento de sobreposição aumenta, porém, a partir do valor de 1” não houve influência significativa no aumento da carga de falha. Um efeito contrário é observado para a tensão aparente de falha, ou seja, essa tensão diminui à medida que o comprimento de *overlap* aumenta. Por isso, temos que a carga de falha não é proporcional ao comprimento de *overlap* pois não satisfaz a linearidade da Equação (30).

Visto os modelos analíticos apresentados, temos que a área de borda das junções do tipo *single lap*, localizada nos extremos da junção, representam um papel mais importante na resistência à carga do que na área central do adesivo, pois na borda é onde há a máxima deformação do adesivo. Embora o comprimento de *overlap* aumente, essa área de borda não varia, por isso, a carga de falha não muda substancialmente com a variação desse comprimento, e por esse motivo a norma ASTM D1002 (2010) chama essa tensão de “aparente”. Como a carga de falha não varia significativamente, a tensão aparente de falha por cisalhamento tende, de acordo com a Equação (30), ser menor pois a área de cisalhamento do adesivo calculada aumenta linearmente com o aumento do comprimento, enquanto a carga de falha não. Seong et al., (2008) também relataram o aumento da carga de falha com um decréscimo da tensão aparente de falha por cisalhamento em função do comprimento de *overlap* em um estudo paramétrico de junções do tipo *single lap* de alumínio com compósito reforçado por fibras de carbono.

Dessa forma, não é necessário fabricar junções com valores de sobreposição acima deste valor para as junções estudadas, pois aumentar o comprimento de *overlap* sem que isso haja aumento na resistência mecânica da junção significa desperdiçar adesivo e acrescentar “peso morto” em uma estrutura, ou seja, peso que não contribui para resistência estrutural.

O resultado de carga de falha das junções de alumínio/alumínio e alumínio/compósito baseado em fibras de carbono foram semelhantes. Ao analisar a falha visual da junção AC.0,75”, representada pela Figura 28, mostra que houve um descolamento nas bordas das junções de alumínio (indicada pela seta vermelha), e que o material descolado ficou retido nas bordas das junções de compósito (indicada pela seta azul). Essa observação confirma o fato que os máximos valores de tensão ocorrem na borda. Além disso, como houve uma falha mais crítica no aderente de alumínio, podemos afirmar que a resistência da junção entre o alumínio estudado e o adesivo é menor do que a resistência da junção do compósito estudado e o adesivo. Portanto, os resultados das junções AA e AC foram semelhantes, pois, a falha corresponde ao local de menor resistência das junções, logo entre o alumínio e o adesivo. O motivo da resistência da junção na camada do alumínio ser menor do que a do compósito pode ser atribuído ao alumínio possuir uma rigidez menor do que a do compósito, o que contribui para tensões de cisalhamento e arrancamento maiores. Essa rigidez superior é relacionada nas equações dos modelos analíticos de Volkersen, Goland e Reissner e Hart-Smith, onde o módulo de elasticidade e espessura são maiores no compósito estudado do que no alumínio. Além disso, em razão do compósito possuir uma camada com textura devido a

utilização de *peel ply* no processo de fabricação, esse pode apresentar maior adesão ao adesivo do que ao alumínio liso.

### 6.1.1 Modos de falha

Após os ensaios de cisalhamento, os modos de ruptura foram avaliados visualmente. Das oito configurações de junções estudadas, duas delas apresentaram falha no aderente, com ruptura do material aderente, e as outras seis apresentaram de forma majoritária a falha coesiva.

As falhas coesivas ocorreram nas junções adesivas AA.0,25", AA.0,5", AA.75, AC.025", AC.0,5" e AC.0,75". Estas são caracterizadas por uma camada áspera na superfície dos aderentes e estão mostradas nas Figuras 26 (a-c) e 27 (a-c), onde a face de cada junção após ruptura foi colocada frente a frente. A Figura 28 mostra em detalhe a junção AC.075", nota-se que nas bordas dessas junções. Nesta figura observa-se no aderente de alumínio houve o descolamento da camada adesiva (indicada como seta vermelha), que ficou retida no material compósito (indicada como seta azul), o que pode evidenciar maior adesão ao adesivo. O motivo deste descolamento pode ser atribuído ao compósito possuir uma superfície texturada, devido a utilização de *peel ply* em sua fabricação, essa superfície atribui boa aderência ao adesivo.

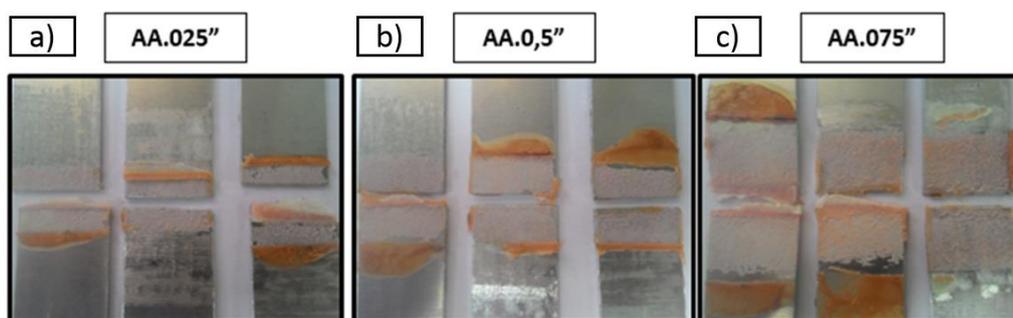


Figura 26 - Fotografia dos corpos de prova das junções AA.0,25" (a), AA.0,5" (b) e AA.0,75" (c) após ensaio *single lap* mostrando a falha coesiva.

Fonte: própria (2018).

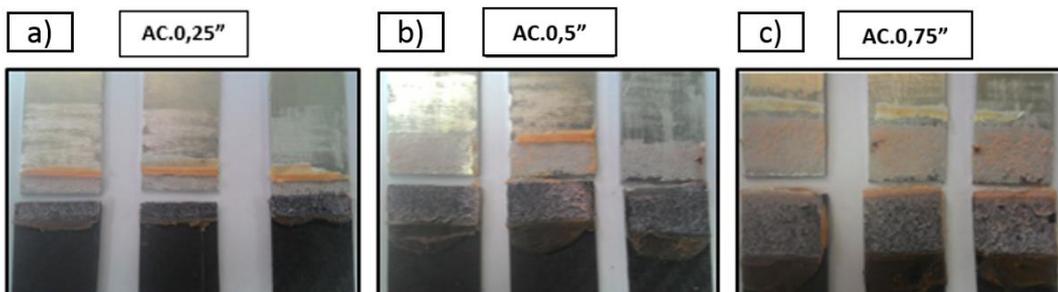


Figura 27 - Fotografia dos corpos de prova das junções AC.0,25" (a), AC.0,5" (b) e AC.0,75" (c) após ensaio de cisalhamento mostrando a falha coesiva.

Fonte: própria (2018).

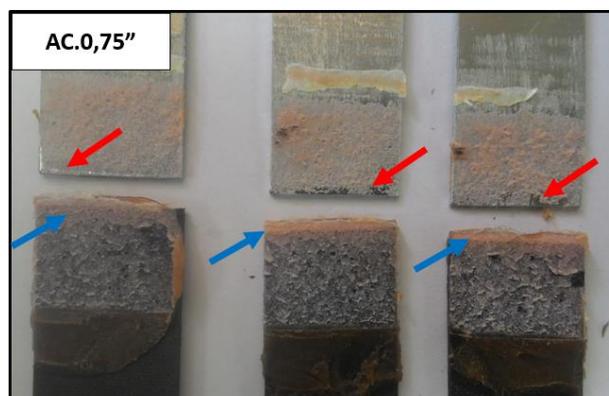


Figura 28 - Fotografia dos corpos de prova das junções AC.0,75" após ensaio de cisalhamento mostrando a falha coesiva.

Fonte: própria (2018).

A Figura 29 mostra as fotografias dos corpos de prova das junções AA.1" e AA.1,5" após ensaio *single lap*. É possível verificar que para estes corpos de prova foram observadas falhas nos aderentes. Estas falhas foram caracterizadas pela ruptura da liga de alumínio e todas apresentaram a mesma angulação de ruptura, o que pode ser explicado pelo fato desta liga ter a mesma orientação cristalina em todas as peças que foram ensaiadas.

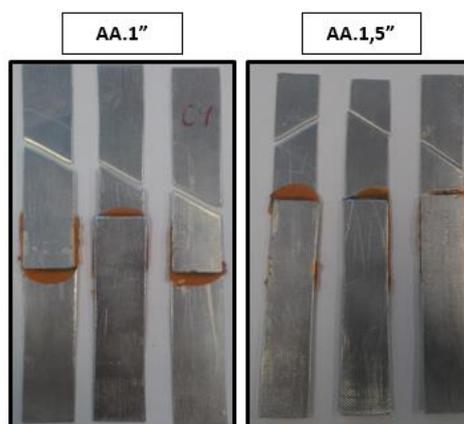


Figura 29 - Fotografia dos corpos de prova das junções AA.1" e AA.1,5" após ensaio *single lap* mostrando a falha nos aderentes.

Fonte: própria.

Com os resultados de carga de falha de cada junção podemos calcular a tensão aparente de cisalhamento no adesivo pela Equação (30) e a tensão sob a área transversal do aderente através da equação (31). Esses valores de tensões são mostrados na Tabela 10.

$$\tau_{aderente} = \frac{P_{falha}}{\text{Área transversal do aderente}} \quad (31)$$

Nota-se que as falhas das junções AA.1” e AA.1,5” ocorreram a 150,26 MPa e 151,26 MPa, respectivamente. Esses dados se mostraram contrários ao valor de limite de resistência à tração do alumínio 8011 (180 MPa), mostrado pela Tabela 4, no qual a falha deveria acontecer somente a partir deste ponto. Porém, o valor de 180 MPa foi obtido em um ensaio de tração, onde o esforço de tração acontece de modo puro, já os outros valores foram obtidos no ensaio de cisalhamento de adesivos, onde há presença de esforços de cisalhamento e arrancamento. Esse pode ser um dos motivos pelos quais os valores das Tabela 4 e Tabela 10 se diferenciam.

Apesar dos corpos de prova de alumínio terem rompido com 150,26 MPa, o mesmo não aconteceu para os mesmos corpos de prova da junção AC.0,75, a qual foi submetida a 152,33 MPa de tensão normal a área do aderente. Isso pode ser explicado por essa junção apresentar rigidez maior a esforços de arrancamento e cisalhamento do que nas junções AA. Essa rigidez já foi explicada na seção anterior. Dessa forma, os aderentes podem apresentar maior resistência a cargas do ensaio de cisalhamento (ASTM D1002) em junções de alumínio/compósito baseado e fibra de carbono.

Além dos fatos apresentados que relacionam a maior resistência da junção AC, não houve falha no compósito devido seu alto limite de resistência a tração (341 MPa) comparado a do alumínio 8011 (180 MPa) e ao maior valor que as junções AC foram submetidas (152,33 MPa). Caso as junções AC fossem ensaiadas com comprimento de *overlap* de 1” e 1,5”, a tensão sob a área transversal do aderente (tensão normal) tenderia ser maior, no entanto, da mesma forma que ocorreu falha no alumínio nas junções AA, poderia acontecer a falha no alumínio nas junções AC devido ao seu limite de tração inferior ao do compósito fabricado.

Tabela 10 – Tensão aparente de cisalhamento no adesivo e tensão sob a área transversal do aderente.

Fonte: própria.

Junção	Carga média de Falha (N)	Área de cisalhamento do adesivo (mm <sup>2</sup> )	Tensão aparente de cisalhamento no adesivo (MPa)	Área transversal do aderente (mm <sup>2</sup> )	Tensão sob a área transversal do aderente (MPa)
AA.0,25"	2229,940	161,29	13,83	38,10	58,53
AA.0,5"	3719,854	322,58	11,53	38,10	97,63
AA.0,75"	5594,381	483,87	11,56	38,10	146,83
AA.1"	5724,790	645,16	8,87	38,10	150,26
AA.1,5"	5784,960	967,74	5,98	38,10	151,84
AC.0,25"	2150,090	161,29	13,33	38,10	56,43
AC.0,5"	3605,270	322,58	11,18	38,10	94,63
AC.0,75"	5803,790	483,87	11,99	38,10	152,33

## 6.2 Comparação dos Modelos analíticos

Nesta seção serão apresentados os resultados dos cálculos de tensão de cisalhamento e arrancamento efetuados usando os modelos analíticos de Volkersen, Goland e Reisner e Hart-Smith em uma junção *single lap* de alumínio/alumínio. Não serão apresentados os modelos analíticos para junções de alumínio/compósito baseado em fibras de carbono devido ao fato de que estes métodos analíticos estudados não consideram junções com materiais aderentes dissimilares. Os modelos analíticos estudados não consideram materiais de diferentes propriedades mecânicas, muito menos matérias ortotrópicos como os compósitos. A análise estrutural de junções de alumínio/compósito baseado em fibras de carbono pode ser feita através do Método de Elementos Finitos, autores como Noorman (2014), Mortensen (2002) e Alves (2018) relataram em suas pesquisas a utilização do uso dessa ferramenta.

Noorman (2014), Mortensen (2002) e Alves (2018) analisaram para obtenção dos valores de tensão de cisalhamento e arrancamento foram utilizadas as mesmas dimensões dos corpos de prova AA.0,25", AA.0,5" e AA.0,75". As propriedades dos materiais dessas junções estão apresentadas na Tabela 11 e servem como parâmetros de entrada para os cálculos de tensões. Foi utilizada uma carga (P) de 2500 N para a obtenção dos resultados desta seção. Esta carga está representada na Figura 30 e foi escolhida como valor de referência para obter e comparar os resultados de distribuição de tensões nas junções adesivas para os três modelos analíticos estudados.

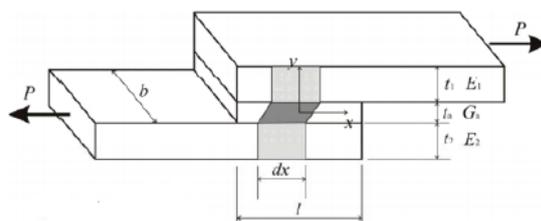


Figura 30 - Carga de cisalhamento no adesivo.

Fonte: Souza (2012).

Tabela 11 - Valores de entrada das propriedades dos materiais das junções AA.

Fonte: própria (2018).

<b>Propriedades dos materiais da Junção AA</b>	
Adesivo LORD® 852	
Módulo de elasticidade (MPa)	862
Coefficiente de Poisson	0,42
Espessura do adesivo (mm)	0,3
Alumínio 8011	
Módulo de elasticidade (MPa)	69000
Coefficiente de Poisson	0,33
Espessura do aderente (mm)	1,5

As Figuras 31, 32 e 33, apresentam as curvas para as tensões de cisalhamento e de arrancamento ao longo do comprimento de *overlap* das junções AA.025”, AA.0,5” e AA.0,75”. As curvas de tensão de cisalhamento foram obtidas usando as equações (1), (3) e (16), dos modelos analíticos de Volkersen, Goland e Reissner e Hart-Smith, respectivamente. E as curvas de tensão de arrancamento foram obtidas usando as equações (3) e (7) dos modelos de Goland e Reissner e Hart-Smith, respectivamente.

Nessas Figuras, no eixo das abscissas, tem-se o comprimento da região de sobreposição da junta colada. O ponto em que o eixo x é igual a zero representa o centro da junção, e a partir deste ponto as tensões ao longo do eixo positivo são simétricas com relação às tensões ao longo do eixo negativo.

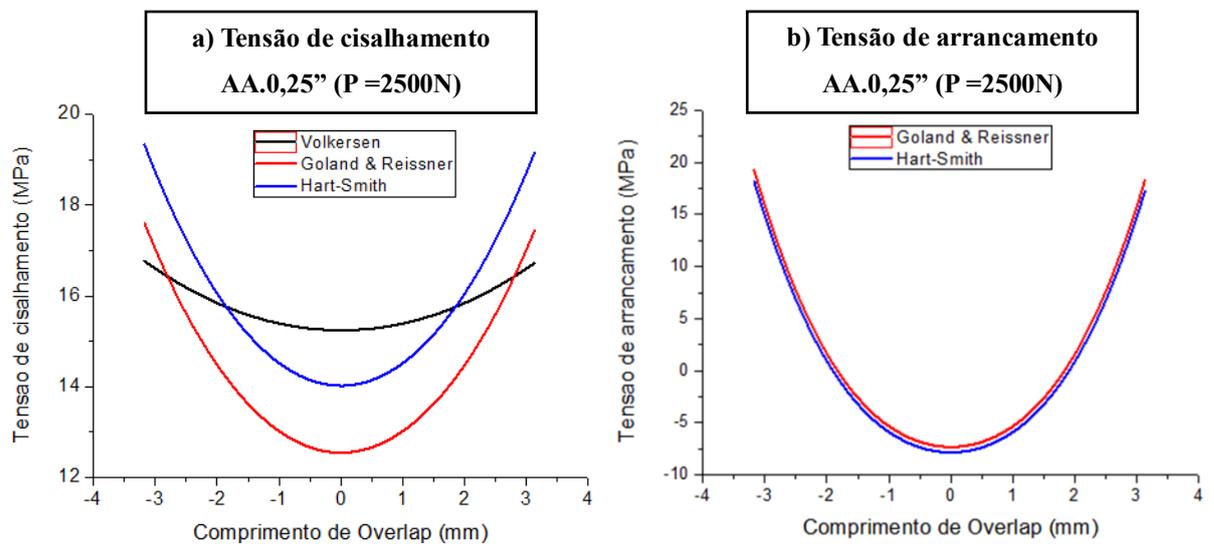


Figura 31 - Tensão de cisalhamento (a) e tensão de arrancamento (b) ao longo da junção adesiva AA0.25" calculadas pelos modelos de Volkesen, Goland e Reissner e Hart-Smith.

Fonte: própria (2018).

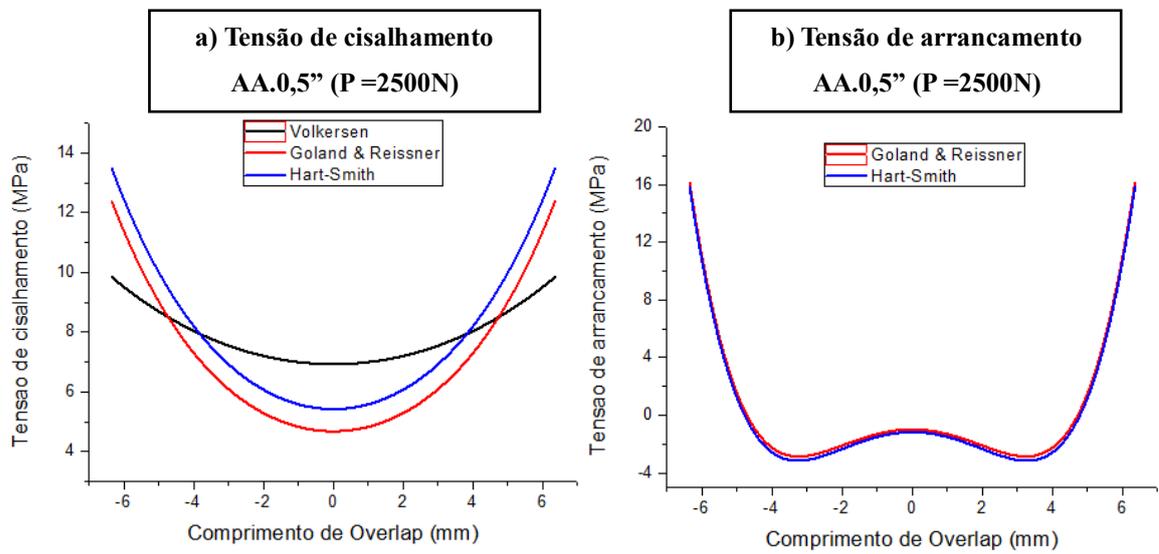


Figura 32 - Tensão de cisalhamento (a) e tensão de arrancamento (b) ao longo da junção adesiva AA0.5" calculadas pelos modelos de Volkesen, Goland e Reissner e Hart-Smith.

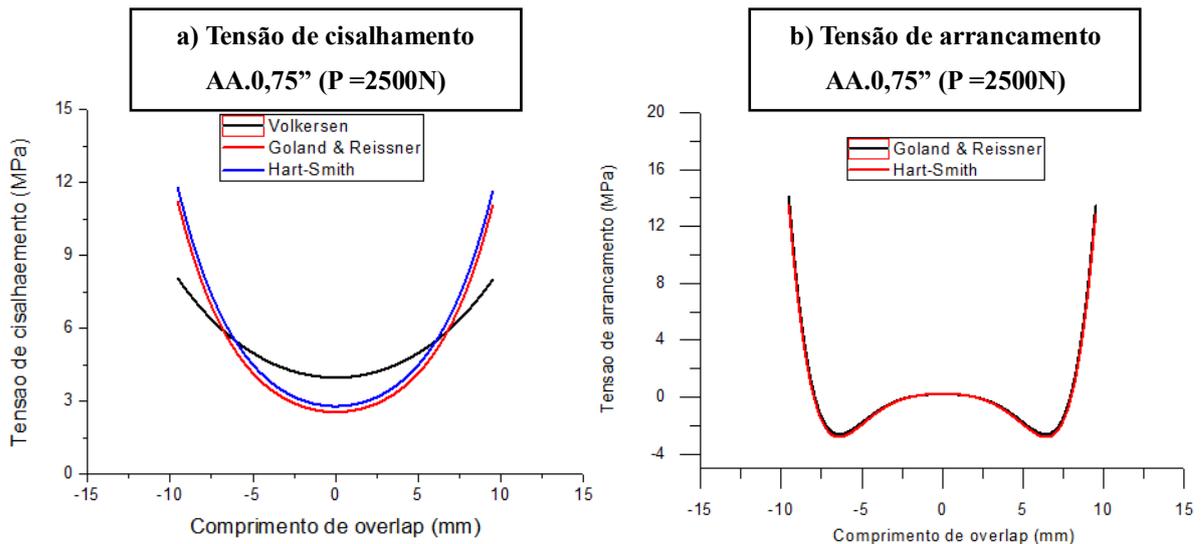


Figura 33 - Tensão de cisalhamento (a) e tensão de arrancamento (b) ao longo da junção adesiva AA0.75" calculadas pelos modelos de Volkesen, Goland e Reissner e Hart-Smith.

Analisando as curvas, pode-se notar uma boa concordância entre as curvas tensão de cisalhamento e arrancamento, principalmente entre modelos de Goland e Reissner e de Hart-Smith, fato que pode ser explicado devido os dois modelos considerarem esforços de flexões e formulações semelhantes. Nota-se que no modelo de Volkersen as tensões são distribuídas de forma mais homogênea ao longo da junção, enquanto nos outros dois métodos mostram as tensões mais concentradas na borda dos adesivos. E isso também pode ser explicado pelo modelo de Volkersen não prever cargas de flexão na junção, correspondendo então a tensões menores e mais distribuídas.

É possível verificar também que com o aumento do comprimento de *overlap*, a tensão máxima que ocorre na borda da junção é menor do que em junções com comprimentos de adesivo menores. Fato semelhante foi observado por Seong e coautores (2018) em que constataram que o comprimento do *overlap* influencia de forma não linear na tensão de falha e que junções com comprimentos de adesivo menores apresentam altas tensões nas bordas.

Os valores máximos das tensões obtidas na Figuras 31, 32 e 33 estão mostrados na Tabela 12. A Figura 34 compara esses resultados em forma de gráfico de barra.

Tabela 12 - Tensões máximas obtidas por meio dos modelos analíticos.

Fonte: própria.

Modelos analíticos			
Junção	Método analítico	Tensão máxima de cisalhamento (MPa)	Tensão máxima de arrancamento (MPa)
AA.0,25"	Volkersen	16,77	-
	Goland & Reissner	17,60	19,28
	Hart-Smith	19,33	18,21
AA.0,5"	Volkersen	9,84	-
	Goland & Reissner	12,38	16,14
	Hart-Smith	13,48	15,84
AA.0,75"	Volkersen	8,04	-
	Goland & Reissner	11,17	14,11
	Hart-Smith	11,75	13,48

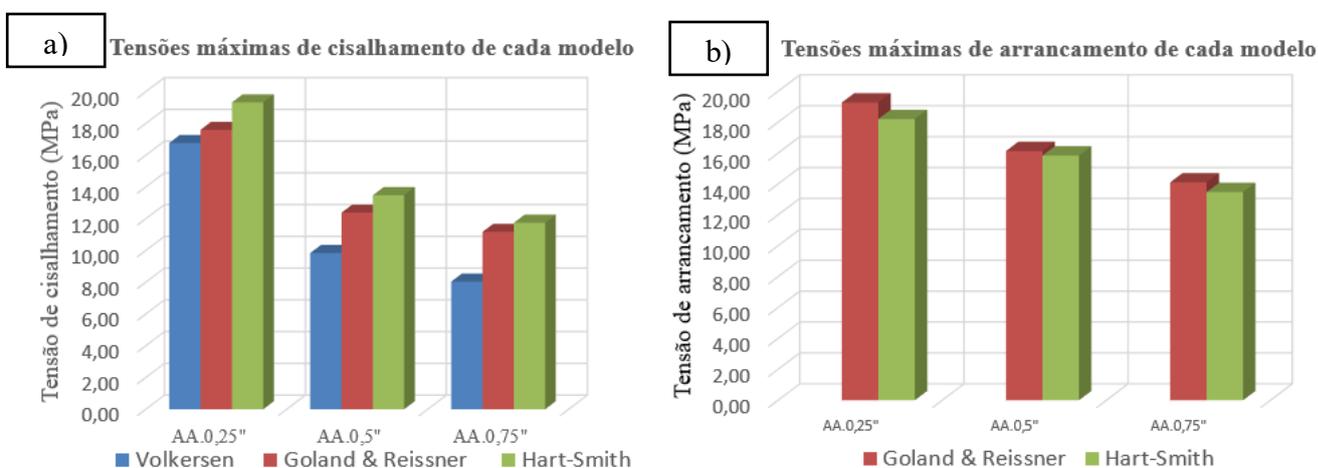


Figura 34 - Tensões máximas de cisalhamento (a) e arrancamento (b) para três diferentes modelos analíticos.

Analisando estes resultados obtidos fica claro que o modelo de Volkersen apresentou-se foi o que mais se diferenciou em relação aos modelos de Goland e Reissner e Hart-Smith. Isso pode ser explicado devido ao fato deste modelo ser o mais simples dentre os estudados, uma vez que desconsidera os efeitos de flexão e considera o esforço como sendo de cisalhamento puro, desconsiderando esforços de flexão. Os resultados obtidos usando os modelos de Hart-Smith e Goland e Reissner foram semelhantes em função das semelhanças em suas formulações e considerações físicas.

No entanto, para analisar de forma mais assertiva a eficiência dos três modelos, ou seja, com valores reais, a seção a seguir se dedica em comparar os resultados do ensaio de cisalhamento com os obtidos nos modelos analíticos através do critério de falha de máximo valor de tensão.

### 6.3 Critério do Máximo Valor de Tensão

Quando aplicado à análise de adesivos, o critério do máximo valor de tensão considera

o valor da tensão aparente de cisalhamento obtida no ensaio realizado e a respectiva carga de falha como o máximo valor de tensão para falha. Para obter o valor de carga de falha a partir dos modelos, o valor de força ( $P$ ) foi testado em cada modelo até obter o valor correspondente de tensão aparente de cisalhamento para as tensões de cisalhamento e arrancamento, esse procedimento foi ilustrado na Figura 13 (a-b).

A Tabela 10 compara através do critério do máximo valor de tensão as cargas de falha obtidas no ensaio de cisalhamento e nos modelos analíticos. Também é mostrado a porcentagem de erro dos modelos em relação a carga real de falha, a carga real de falha representa a máxima carga obtida no ensaio de cisalhamento.

Foram obtidas as cargas de falhas por cisalhamento e arrancamento a partir dos modelos analíticos, uma delas considera a tensão de cisalhamento máxima e a outra considera a tensão de arrancamento máxima. Desses dois tipos de carga calculadas, foi considerada a menor carga de falha atingida para cada modelo analítico. Os valores de carga máxima de cada modelo foram calculados considerando como referência a tensão aparente do ensaio de cisalhamento.

Vale lembrar que o modelo de Volkersen não considera as cargas de arrancamento, e por isso não são mostradas na Tabela 13. Também não serão apresentados os modelos analíticos para junções de alumínio/compósito baseado em fibras de carbono devido os métodos estudados não considerarem junções com materiais aderentes dissimilares. As junções AA.1” e AA.1,5” não foram investigadas através dos modelos analíticos pois nas mesmas ocorreram falha do aderente, e esses modelos estudam somente as tensões nos adesivos

Tabela 13 - Tensão de falha de cada modelo.

Fonte: própria.

Critério do valor máximo					
Junção	Carga real de falha (N)	Método analítico	Carga máxima de cisalhamento (N) - (%Erro)	Carga máxima de Arrancamento (N) - (%Erro)	Carga de falha (N) - (%Erro)
AA.0,25"	2229,94	Volkersen	2062,50 - (8%)	-	2062,50 - (8%)
		Goland & Reismner	1925,5 - (14%)	1773,25 - (20%)	1773,25 - (20%)
		Hart-Smith	1782,5 - (20%)	1849,25 - (17%)	1782,5 - (20%)
AA.0,5"	3719,85	Volkersen	2928,75 - (21%)	-	2928,75 - (21%)
		Goland & Reismner	2301,00 - (38%)	1731,25 - (53%)	1731,25 - (53%)
		Hart-Smith	2121,75 - (43%)	1715,50 - (54%)	1715,50 - (54%)
AA.0,75"	5594,38	Volkersen	3595,00 - (36%)	-	3595,00 - (36%)
		Goland & Reismner	2606,50 - (53%)	1989,75 - (64%)	1989,75 - (64%)
		Hart-Smith	2457,00 - (56%)	2052,75 - (63%)	2052,75 - (63%)

A partir dos resultados mostrados na Tabela 10, é apresentado um gráfico de barras (Figura 35) que mostra a comparação dos valores do ensaio de cisalhamento (carga real de falha) com os de tensão de falha de cada modelo.

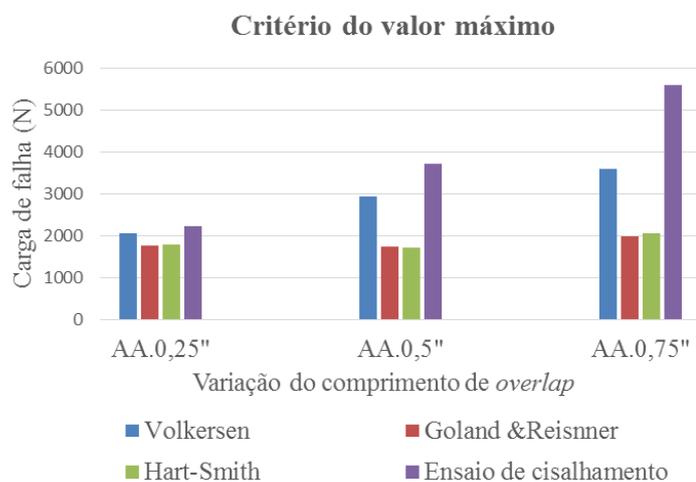


Figura 35 - Carga de falha pelo critério do valor máximo.

O modelo analítico que apresentou o resultado com maior precisão, ou seja, apresentou-se mais semelhante ao resultado do ensaio de cisalhamento nos adesivos foi o de Volkersen, com 8%, 21% e 35% de erro para as junções AA.0,25'', AA.0,5'' e AA.75'', respectivamente.

Porém, este método não é muito confiável, devido ao fato de não considerar as tensões normais no adesivo, sendo o menos conservativo deste grupo de critérios de falha (Rodríguez, 2011). No geral, os modelos apresentaram um erro muito grande, sendo que o maior foi o de Goland e Reissner para a junção AA.0,75'', no qual apresentou um valor de 64%. Apesar do alto valor da porcentagem de erro, outros autores como da Silva e coautores (2006) e Rodríguez (2011) obtiveram resultados semelhantes. Além disso, o critério do máximo valor de tensão não considera as interações das tensões de cisalhamento e arrancamento e por isso podem não representar com precisão as reais cargas de falha.

Por mais que os modelos não se apresentaram precisos para o caso estudado, todos os resultados de cargas de falha obtidos pelos modelos foram inferiores aos do ensaio de cisalhamento. Isso mostra que esses modelos podem ser utilizados em projetos de estrutura pois preveem uma carga menor de falha do que a real, e com isso garantem que uma estrutura seja dimensionada com uma resistência maior do que a necessária. No entanto, ainda é necessário que metodologias com mais precisão sejam estudadas, seja em novos modelos analíticos e critérios de falhas, ou em modelos numéricos como o de elementos finitos pois

super dimensionar uma estrutura significa acrescentar o peso da mesma e desperdiçar material adesivo, por exemplo.

#### **6.4 Investigação da influência paramétrica nas tensões**

Como apresentado na revisão bibliográfica, há diversos parâmetros que influenciam na resistência de uma junção adesiva, e conhecer a influência de cada parâmetro é fundamental para o projeto destas junções. Portanto, essa seção tem como objetivo realizar um estudo da influência dos parâmetros da junção adesiva nos valores de tensão destas junções. Este trabalho se limitou a estudar a influência do comprimento de *overlap*, espessura do aderente e espessura do adesivo nos valores de tensão das junções adesivas. Somente foram estudadas junções alumínio/alumínio pois não foram estudados modelos analíticos aplicados a junções de alumínio/compósito baseado em fibras de carbono. Esses modelos não foram estudados devido a uma dificuldade em encontrar referências coerentes sobre modelos analíticos de junções adesivas aplicado a compósitos.

##### 6.4.1 Influência do comprimento de *overlap*

Com auxílio da rotina de cálculo no MATLAB® foi investigado a influência do comprimento de *overlap* na tensão de cisalhamento de uma junção *single lap*. Foram obtidos os resultados de tensão máxima de cisalhamento para os comprimentos de *overlap* de 0,25” até 2”, os quais estão representados pela Figura 36. Os parâmetros de contorno utilizados foram os mesmos da seção de comparação dos modelos analíticos, no entanto a carga utilizada foi de 1000 N e o comprimento de *overlap* variado de 0,25” até 2”.

Observando os resultados obtidos (Figura 36), é possível verificar que quando o comprimento de *overlap* é maior que 1” a inclinação da curva de tensão de cisalhamento tende a 0, ou seja, acima desse comprimento na junção estudada os valores de tensão de cisalhamento não apresentam diferenças significativas. Este resultado corrobora com o resultado obtido por Seong e coautores (2008) que constataram que o comprimento do *overlap* tem influência não linear na tensão de falha. Além disso, no final da pesquisa, esses autores verificaram que quando o comprimento do *overlap* é maior que 1” e a relação comprimento/largura de *overlap* for maior que 1, a tensão de falha não aumenta substancialmente. Portanto, relações maiores que 1 não garantem o aumento da resistência. Por isso, vale lembrar que a largura do adesivo utilizada é de 1”.

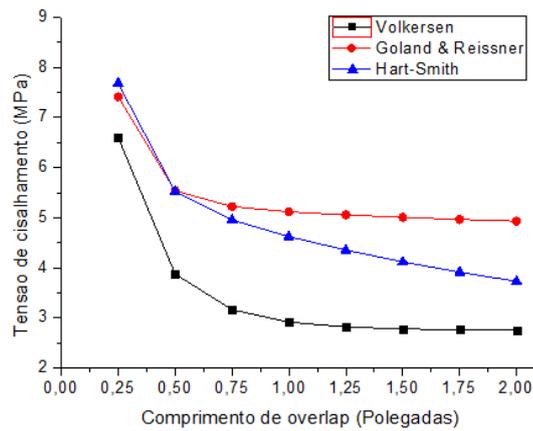


Figura 36 - Tensão de cisalhamento x comprimento de *overlap*.

Fonte: própria.

#### 6.4.2 Influência da espessura do adesivo

Esta seção se dedica a estudar a influência da espessura do adesivo e do aderente na resistência mecânica da junção adesiva. Para estudar a influência da espessura foram gerados gráficos de distribuição de tensão de cisalhamento (Figura 37) e arrancamento (Figura 38) em junções adesivas para diferentes condições de espessura de adesivo, sendo elas: 0,1 mm, 0,3 mm, 0,5 mm, 0,7 mm e 0,9 mm. O modelo utilizado para obtenção dos resultados foi o de Hart-Smith e a carga em que a junção foi submetida é de 1000 N, a qual foi utilizada como um valor de referência para comparação dos resultados.

Observando o a Figura 37, é possível notar que com o aumento da espessura do adesivo as tensões de cisalhamento nas bordas são menores e no centro são maiores e que junções com uma camada fina de adesivo tem maior concentração de tensões nas bordas. A Figura 38 mostra que com o aumento da espessura do adesivo as tensões de arrancamento tendem a ser menores na borda, porém essas tensões aumentam no centro da junção e são distribuídas de forma mais homogênea. Sendo assim, o escoamento ocorre mais rapidamente em uma junção com baixa espessura de adesivo. No entanto, quando o escoamento ocorre em uma junção com a camada de adesivo mais espessa há uma menor reserva elástica para sustentar o incremento da carga, o que faz com que o escoamento aconteça mais rapidamente (RODRÍGUEZ, 2011).

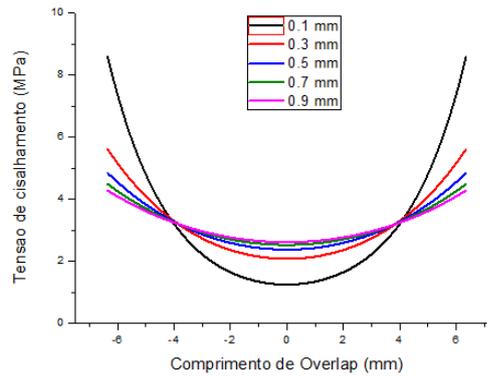


Figura 37 - Curvas de tensão de cisalhamento no adesivo para diferentes espessuras de adesivo.

Fonte: própria.

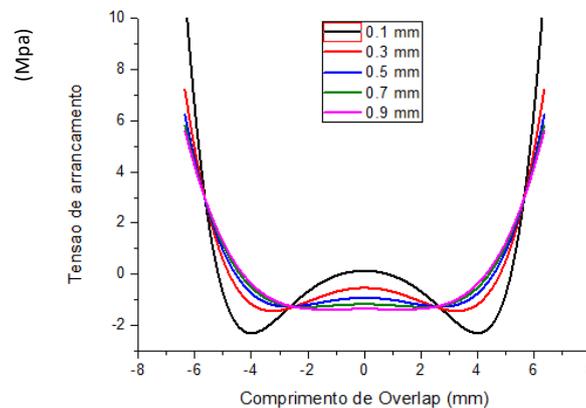


Figura 38 - Curvas de tensão de arrancamento no adesivo para diferentes espessuras de adesivo.

Fonte: própria.

A Figura 39 mostra a variação das tensões de cisalhamento e arrancamento nas junções estudadas nesta seção em função da espessura do aderente. Os valores também foram obtidos usando o software MATLAB® através do modelo analítico de Hart-Smith. Ao analisar o gráfico, observa-se que a relação entre a espessura e as tensões é não linear e que com o aumento da espessura há uma diminuição das tensões máximas da junção. Ainda, para o caso estudado as tensões de arrancamento sempre foram maiores que as de cisalhamento.

Apesar dos resultados obtidos por Seong e co-autores (2008) através da variação da espessura em junções submetidas a ensaios de cisalhamento mostrarem que a carga de falha diminui com o aumento da espessura do adesivo. Visto essa afirmação, temos que o modelo analítico de Hart-Smith utilizado nessa seção mostrou o contrário ao esperado. Por isso, os modelos analíticos não se mostram eficientes para estudar a variação da espessura do adesivo.

Apesar dos resultados, resultados obtidos por Seong e coautores (2008) através da

variação da espessura em junções submetidas a ensaios de cisalhamento mostraram que a carga de falha diminui com o aumento da espessura do adesivo. Visto essa afirmação, temos que o modelo analítico de Hart-Smith utilizado nessa seção mostrou o contrário ao esperado. Por isso, os modelos analíticos não se mostraram eficientes para estudar a variação da espessura do adesivo.

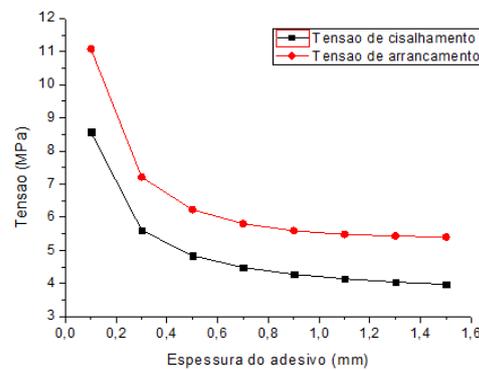


Figura 39 – Influência da espessura do adesivo nas tensões de cisalhamento e arrancamento.

Fonte: própria (2018).

#### 6.4.3 Influência da espessura do aderente

A fim de estudar a influência do aderente na resistência da junção, foram calculadas as tensões máximas de arrancamento para aderentes de 1 até 4 mm, as quais estão representadas pela Figura 40. Para esse cálculo a espessura do adesivo foi considerada como 0,3 mm, assim como na seção de comparação dos modelos analíticos.

Ao analisar os gráficos, conclui-se que as mudanças nas curvas são semelhantes as das curvas de variação de espessura do adesivo. Porém essas mudanças são menos sensíveis às variações do aderente do que àquelas na espessura do adesivo. Também foi observado que com a medida que a espessura do aderente aumenta as tensões de cisalhamento diminuem, ou seja, uma junção mais espessa tem uma distribuição mais uniforme de tensões (MOURA, 2016). Nota-se que a curva de tensão de arrancamento é mais acentuada do que a de cisalhamento, isso acontece devido ao aumento da espessura que torna a junção mais rígida a flexão e consequentemente a tensão de arrancamento. Esse aumento da rigidez a flexão já foi descrito pela Equação (22).

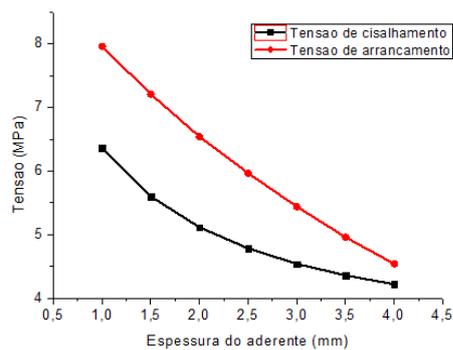


Figura 40 - Influência da espessura do aderente nas tensões de cisalhamento e arrancamento.

Fonte: própria (2018).

## 7 CONCLUSÕES

### 7.1 Considerações Finais

Neste trabalho foram utilizados ensaios experimentais e analíticos os para análise de tensões mecânicas de junções adesivas do tipo *single lap* de alumínio/alumínio e alumínio/compósito baseado em fibra de carbono.

Nos ensaios realizados, foi realizado o ensaio de cisalhamento de adesivo (ASTM D1002) para 5 configurações de junções de alumínio/alumínio (AA) e 3 de alumínio/compósito baseado em fibra de carbono (AC). A diferença dessas configurações era o comprimento de *overlap*. O objetivo desses ensaios foi de caracterizar as cargas de falha das junções estudadas. Foi notado que as cargas de falha das junções AA e AC para o mesmo comprimento de *overlap* foram semelhantes, e não demonstraram diferença de resistência mecânica. Com esse estudo também foi visto que comprimentos de *overlap* maiores que 1” não alteram significativamente a carga de falha no caso estudado, e isso significa que fabricar junções com valores maiores de comprimento de *overlap* não garantem a resistência mecânica, sendo então desperdício de material e acréscimo de peso “morto” em uma estrutura.

Na análise visual dos modos de falha das junções submetidas ao ensaio de cisalhamento foi verificado que das oito configurações de junções estudadas, duas delas apresentaram falha no aderente (AA.1” e AA.1,5”), com ruptura do material aderente, e as outras seis apresentaram falha coesiva (AA.0,25”, AA.0,5”, AA.75, AC.025”, AC.0,5” e AC.0,75”). Observando a falha na junção AC.075”, nota-se que nas bordas dessas junções, no aderente de alumínio houve um descolamento da camada adesiva, a qual ficou retida no material compósito, o que pode evidenciar maior adesão do adesivo ao compósito. As junções AA.1” e AA.1,5” comprovaram a vantagem de elevada resistência mecânica das

junções adesivas, pois a resistência da união foi maior que o próprio material aderente.

Na parte analítica do trabalho, foram implementados os modelos de Volkersen, Goland e Reissner e de Hart-Smith através do desenvolvimento de uma rotina de cálculo no MATLAB®. Com essa ferramenta foi possível mapear as tensões ao longo da zona do adesivo, onde foi evidenciado que as tensões máximas ocorrem na borda da junção e as mínimas no centro. Analisando as curvas, notou-se uma boa concordância entre as curvas tensão de cisalhamento e arrancamento, principalmente entre modelos de Goland e Reissner e de Hart-Smith, fato que pode ser explicado devido os dois modelos considerarem esforços de flexões e formulações semelhantes. Nota-se que no modelo de Volkersen as tensões são distribuídas de forma mais homogênea ao longo da junção, enquanto nos outros dois métodos mostram as tensões mais concentradas na borda dos adesivos. E isso também pode ser explicado pelo modelo de Volkersen não prever cargas de flexão na junção, correspondendo então a tensões menores e mais distribuídas.

A fim de se comparar a precisão dos modelos para obter as tensões foi aplicado o critério de máximo valor de tensão. Os valores utilizados como critérios de falha foram os obtidos no ensaio de cisalhamento das junções adesivas AA.0,25”, AA.0,5” e AA.0,75”. Dos modelos analíticos implementados no estudo, o de Volkersen foi o que apresentou o resultado mais semelhante ao do ensaio de cisalhamento, com 8%, 21% e 35% de erro para as cargas de falha das junções AA.0,25”, AA.0,5” e AA.0,75”, respectivamente. Porém, o fato desse método não considerar as tensões de arrancamento no adesivo o torna não muito confiável, sendo o menos conservativo deste grupo de critérios de falha. No geral, os modelos apresentaram um erro muito grande, sendo que o maior foi o de Goland e Reissner para a junção AA.0,75”, no qual apresentou um valor de 64%. Apesar do alto valor da porcentagem de erro, outros autores como da Silva e coautores (2006) e Rodriguez (2011) obtiveram resultados semelhantes. Além disso, o critério da máxima tensão não considera as interações das tensões de cisalhamento e arrancamento e por isso podem não representar com precisão as reais cargas de falha.

Por mais que os modelos não se apresentaram precisos para o caso estudado, todos os resultados de cargas de falha obtidos pelos modelos foram inferiores aos do ensaio de cisalhamento. Isso mostra que esses modelos podem ser utilizados em projetos de estrutura pois preveem uma carga menor de falha do que a real, e com isso garantem que uma estrutura seja dimensionada com uma resistência maior do que a necessária.

Ao avaliar a influência da variação do comprimento de *overlap* na influência da tensão

de cisalhamento, notou-se que quando o comprimento de *overlap* é maior que 1” não há mais contribuição significativa para a diminuição da tensão de cisalhamento. Resultado semelhante foi obtido por Seong et al., (2008), em que constataram que o comprimento do *overlap* influencia de forma não linear na tensão de falha. No estudo da variação da espessura do adesivo observou-se que as tensões obtidas foram maiores para espessuras menores, fato que destoa com a literatura de estudos experimentais de Seong et al., (2008), onde mostraram que as tensões de falha são menores em junções com camadas de adesivos mais espessas. Por fim, estudou-se a variação da espessura do aderente, onde ficou claro que com o aumento da espessura há uma diminuição das tensões de cisalhamento e arrancamento. Notou-se que a curva de tensão de arrancamento foi mais acentuada do que a de cisalhamento, isso aconteceu devido ao aumento da espessura que torna a junção mais rígida a flexão e conseqüentemente a tensão de arrancamento.

Além dos resultados apresentados, uma das contribuições desse trabalho foi o desenvolvimento de uma rotina de cálculo com os três modelos analíticos estudados. Essa poderá ser utilizada em futuras pesquisas na área de adesivos e no auxílio de projetos de junções.

## **7.2 Sugestões para futuros trabalhos**

As principais sugestões de continuação e melhoria do trabalho apresentado estão apresentadas a seguir:

- Implementar modelos analíticos capazes de estudar tensões em junções de metal/comósito;
- Analisar tensões em junções adesivas através do Método de Elementos Finitos;
- Estudar critérios de falhas mais robustos, que considerem a influência das tensões de cisalhamento e arrancamento de forma conjunta.

## 8 REFERÊNCIAS

ALLMAN, R. D.; **A theory for the elastic stresses in adhesive bonded lap joints.** Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, pp. 39-199, 1977.

ALVES, D.I. *et al.* **Experimental and numerical analysis of hybrid adhesively-bonded scarf joints.** International Journal of Adhesion And Adhesives, [s.l.], v. 83, p.87-95, Elsevier BV, jun. 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D1002: Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal).** 10 ed. West Conshohocken: Astm, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3039: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.** 17 ed. West Conshohocken: Astm, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5868: Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding.** 1 ed. West Conshohocken: Astm, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D907: Standard Terminology of Adhesives.** 15 ed. West Conshohocken: Astm, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E9- 89a00 (2000). **Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature.** In: Annual Book of ASTM, 2000.

ASKELAND, D. R., PHULÉ, P.P. **Ciência e Engenharia dos Materiais.** 1º Ed. São Paulo: Cengage Learning. 2008.

BIRBILIS, N.; HINTON, B.; **The corrosion inhibition of aluminium alloy 7075-T651 with cerium and Mischmetal di phenyl phosphate,** Proceedings of the 18th International Corrosion Congress, Australasian Corrosion Association, p.575, 2011.

BUENO, P. O. **Análise Comparativa entre Juntas “Single-lap” e “Wavy-lap” de Compósitos Unidas por Adesivos.** 136 f. Universidade Federal de Minas Gerais, 2002

CALLISTER, W.D. **Materials Science and Engineering: An Introduction.** ed.7ª, 705 p. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares, 2008.

CAMPBELL, F.c. **Introduction to Composite Materials.** In: Structural Composite Materials, ASM International, 3ed, 2010.

CAVALCANTE, F. F.; **Comportamento Mecânico e Tenacidade à fratura de ligas de alumínio 2024 e 7075 submetidas a diferentes tempos de envelhecimento.** 2016. f.138 Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

CHEN, L., MYUNG, N., SUMODJO, P.T.A., NOBE, K., **A comparative electro dissolution and localized corrosion study of 2024 Al in halide media.** Electrochimica Acta, 1999. 44: p. 2751-2764.

CHEN, D.; CHENG, S., 1983. **An analysis of adhesive-bonded single-lap joints.** Journal of

Applied Mechanics 50, 109, 1983.

SVERDLIN, A.; Handbook of aluminium: physical metallurgy and processes Alloy production and materials manufacturing ed. G.E. Totten, and Mackenzie, D.S. Vol. 1. 2003: Marcel Dekker, Inc. p. 33-79.

DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials**. New York: Oxford University Press, 1994.

DAVIS, M.; E BOND, D.; **Principles and practice of adhesive bonded structural joints and repairs**. International Journal of Adhesion e Adhesives, Elsevier, p.91-105, 1993.

DELALE, F.; ERDOGAN, F.; AYDINOGLU, M. N.; **Stresses in Adhesively Bonded Joints: A Closed-Form Solution**, Journal of Composite Materials, v. 15, n. 3, p. 249–271, 1981.

FIUZA, G. C. C.; **Análise de comportamento mecânico de juntas coladas multimateriais**. – Trabalho Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Mecânica, Cefet, p.87, Rio de Janeiro, 2016.

GOLAND, M.; REISSNER, E.; **The Stresses in Cemented Joints**, Journal of Applied Mechanics, v. 11, n.1, p. A17–A27, 1944.

GONÇALVES, M.; **Desenvolvimentos recentes no segmento de ligas de alumínio aeronáuticas**. In: ABAL. IV Congresso Internacional do Alumínio. São Paulo, 2010.

GRAYLEY, M.; **Shear stresses in the adhesives in bonded joints: single step double lap joints loaded in tension**. Tech. Rep. 78042, ESDU. 1978.

GUSTAFSON, P. A.; WAAS, T. A.; **A Macroscopic Finite Element for a Symmetric Double-Lap Joint Subjected to Mechanical and Thermal Loading**. AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC 48th SDM Conference, AIAA Paper 2007-2308, Honolulu, HI, p. 23–26 Abril, 2007.

HAHN, K.; Photostress investigation of bonded lap joints, Theoretical analysis, Douglas Aircraft. 1960.

HANDBOOK, M. **Properties and selection: nonferrous alloys and pure metals**. American Society for Metals, 9ed. Metals Park, Ohio, 1979.

HART-SMITH, L. J.; **Adhesive-bonded single-lap joints**. Tech. rep., NASA CR-112236, 1973.

HULL, A. P.; **The Limits of the Peer Review Process**. vol. 1, Risk Analysis, Set. 1981.

JANSSON, N.; **Method for Estimation of Ultimate Strength of Adhesive Joints**. VOLS:10097121, Volvo Aero Corporation, Trollhättan, 2010.

JUMBO, F.S; ASHCROFT, I.A .; CROCOMBE, A.D, WAHAB, M.A. **Thermal residual stress analysis of epoxy bi-material laminates and bonded joints**. Int J Adhes Adhes. 30 523-538, 2010.

KAUSHIK, Y.; **A Review on use of Aluminium Alloys in Aircraft Components**. Journal On Material Science, v. 3, n. 3, p.1-7, Chandigarh, dez. 2015.

KAW, A. K.; **Mechanics of composite materials**. v. 29, 2ed. CRC, 2005.

KIMIAEIFAR, A. *et al.* **Reliability analysis of adhesive bonded scarf joints**. Engineering Structures,

[s.l.], v. 35, p.281-287, Elsevier BV, fev. 2012.

KING, C.; **Inelastic shear stresses and strains in the adhesives bonding lap joints loaded in tension or shear.** ESDU 79016. 1978.

KOH, R.; MADSEN, B.; **Strength Failure Criteria Analysis for a Flax Fibre Reinforced Composite.** Mechanics Of Materials, p.1-20, Elsevier, mai. 2018.

KUENZI, E.; STEVENS, G.; Determination of mechanical properties of adhesives for use in the design of bonded joints. Research, U. S. Forest Service, Set. 1963.

LIMA, H.G.; **Estudo do comportamento mecânico da liga de alumínio AA8011 em diferentes sequências termomecânicas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, p. 2-11 Recife,2005.

MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos: fundamentos e tecnologia.** Artliber, 333p., São Paulo, 2011.

MATTEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. **Composite materials: engineering and science.** New York: Chapman-Hall, 1994.

MAZZOLANI, F.M., **Aluminium alloy structures. 2 ed. 1995:** E & FN Spon, London. p. 1-26.

MORAIS, W.A.; ALMEIDA, J.R.M. **Comparação do comportamento à flexão com restrições à deflexão de placas de compósitos de matriz polimérica epoxídica em função do tipo de fibra de reforço.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 13, p. 181-187, 2003.

MORTENSEN, F.; THOMSEN, O. T.; **Analysis of Adhesive Bonded Joints: A Unified Approach,** Composites Science and Technology, v. 62, n. 7–8, p. 1011–1031, 2002.

MOURA, L. S.; **COLAGEM DE ESTRUTURAS METÁLICAS.** Monografia (Especialização em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

NOORMAN, D.C.; **Cohesive Zone Modelling in Adhesively Bonded Joints: analysis on crack propagation in adhesives and adherends.** 2014, 172 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Delft University Of Technology, Leiden, 2014.

OJALVO, I. U.; EIDINOFF, H. L.; **Bond Thickness Effects upon Stresses in Single Lap Adhesive Joints,** AIAA Journal, v. 16, No. 3, p. 204–211, 1978.

RANDOLPH, A.; CLIFFORD, M., 2004. **Improved 2d model for bonded composite joints.** International Journal of Adhesion and Adhesives v. 24, p. 389-405, out. 2004.

RIBEIRO, T.; *et al.*; **Damage analysis of composite–aluminium adhesively-bonded single-lap joints.** Composite Structures, v. 136, p.25-33, Elsevier, fev. 2016.

RODRIGUEZ, R.Q.; **Análise de Tensões e Critérios de Falha para juntas de estruturas aeronáuticas metálicas coladas.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas

SEONG, M.S.; KIM T.H.; NGUYEN K.H.; KWEON J.H.; CHOI J.H.; **A parametric study on the failure of bonded single-lap joints of carbon composite and aluminum.** Composite Structures, [s.l.], v. 86, n. 1-3, p.135-145, Elsevier, nov. 2008.

SILVA, R. V.; Compósito de resina de poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais. 157 p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

SILVA NETO, ALMIR. **Estudo de tensões e modos de falha no desen-volvimento de adesivos nanomodificados e jun-tas coladas**.2016. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Ufmg, Belo Horizonte, 2016

SOUZA, C. A. O.; **Análise de Tensões e Vida em Fadiga de Juntas Coladas em Estruturas Aeronáuticas Metálicas**, Campinas, SP, 2012.

SOUZA, G. F.; DA SILVA, B. S. **Efeito do adesivo e do comprimento de sobreposição em juntas coladas, Rio de Janeiro**, CEFET, Rio de Janeiro, 2015.

STAPLETON, S. E.; WAAS, A. M.; BEDNARCYK, B. A.; **Modeling Progressive Failure of Bonded Joints Using a Single Joint Finite Element**. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). Aiaa Journal, [s.l.], v. 49, n. 8, p.1740-1749, ago. 2011.

TALY, N.; Design of modern highway bridges.; editado por Narenda Taly, Department of Civil Engineering, Univerisade do Estado da California – Estados Unidos, 1998.

TOMBLIN, J. S.; YANG C.; HARTNER P.; **Investigation of Thick Bondline Adhesive Joints**.DOT/FAA/AR-01/33, U.S. Department of Transportation, Washington, 2001.

VARGEL, C.; **Corrosion of Aluminium**, ed.1, p. 9, In. Elsevier, 2004.

VILLENAVE, J. – **Assemblage par college** – Paris: DUNOD, 319 p., Paris, 2005.

VOLKERSEN, O.; **Die Nietkraftverteilung in Zugbeanspruchten mit Konstanten Laschenquerschriften**, Luftfahrtforschung,. 15, p. 41–47, 1938.

XIACONG, H.; **Coefficient of variation and its application to strength prediction of self-piercing riveted joints**. University of Science and Technnology, China, 2011.

ZHANG, J.; BEDNARCYK, B. A.; COLLIER, C.; YARRINGTON, P.; BANSAL, Y.; PINDER, M. J.; **Analysis Tools for Adhesively Bonded Composite Joints Part 2: Unified Analytical Theory**, AIAA Journal, v. 44, No. 8, p. 1709–1719, 2006.

## APÊNDICE A

### Rotina de cálculo de modelos analíticos de junções adesivas

```
%%%%%%%% Modelos analíticos - Junções adesivas%%%%%%%%
% AUTOR: Carlos Henrique Coelho Saunders %
% ORIENTADORA: Prof. Dra. Andreza Sousa Andrada %
% CO-ORIENTADOR: Prof Dr. André Luis Riqueira Brandão%
%
% Data de criação: 16.04.2018 %
% Graduando de Engenharia Mecânica %
% Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% MODELO PARA UNIÃO DO MESMO MATERIAL %
% TIPO DE JUNCÃO:SINGLE LAP %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%% VARIÁVEIS DE ENTRADA %%%

E = 69000; % Módulo de elasticidade aderente [MPa]
P = 1000; % Força de tração [N]
Tt = 1.5; % Espessura do aderente superior [mm]
Tb = 1.5; % Espessura do aderente inferior [mm]
Ta = 0.3; % Espessura do adesivo [mm]
l = 0.5 *25.4; % Comprimento inicial do adesivo (mm)
b = 25; % Largura da junção [mm]
l1 = l/2; %
Xo = -l1 :0.1: l1; % Zona colada [mm];
Pb = P/b;
c = l/2; % metade do comprimento de overlap
t = Tt; % espessura do aderente [mm]
poisson_a = 0.42; % coeficiente de poisson adesivo
poisson = 0.33; % coeficiente de poisson aderente
Ea = 862; % Módulo de elasticidade adesivo [MPa]
Ga = Ea/(2*(1+poisson_a)); % modulo de cisalhamento do adesivo

%%%%%%%% MODELOS MATEMATICOS %%%%%%%%%

% VOLKERSEN - MODELO MATEMATICO

w = sqrt ((Ga./(E*Tt.*Ta))* (1 + (Tt/Tb)));

Volk_A = (((P * w)./(2*b)) .* (cosh(w .*Xo)./sinh(w .*l.*0.5))); % Primeiro
termo de Volkersen

Volk_B =(((Tt - Tb)/(Tt + Tb)) * (w*l*0.5) * (sinh(w
.*Xo)/cosh(w.*l*0.5)));% Segundo termo de Volkersen

Tcis_Volk = Volk_A + Volk_B; % Tensão de cisalhamento de Volkersen

%%% GOLAND & REISSNER - MODELO MATEMATICO

%Tensão de cisalhamento - GOLAND & REISSNER

beta = sqrt((8*Ga*t)/(E*Ta));
```

```

u2 = 1/t*(sqrt(1.5*(1-poisson^2)))*(sqrt(Pb/(t*E)));
k = (cosh(u2*c)/(cosh(u2*c)+(2*(sqrt(2))*sinh(u2*c)))); %fator do momento
de flexão

Tcis_Goland = 1/8 *(Pb/c).*((beta*c/t).*(1+3*k)...
.*(cosh((beta .* Xo)/(t))/(sinh((beta .*c)/t)))) + (3 .* (1-k)); %
Tensão de cisalhamento de GOLAND

%Tensaob de peel - GOLAND & REISSNER

gama = (6*(Ea*t)/(E*Ta))^(0.25);
lambda = gama *c/t;
delta = 0.5*(sin(2*lambda)+sinh(2*lambda)); %coeciente delta
klinha = ((k*c/t)*sqrt((3*(1-poisson^2)*(Pb/(t*E))))); %fator transversal
de foça

R1 = ( cosh(lambda)*sin(lambda )+(sinh(lambda)*cos(lambda));
R2 = ( -cosh(lambda)*sin(lambda )+(sinh(lambda)*cos(lambda));

GOL_A = ((R2 *lambda^2 *k *0.5)+(lambda .*klinha .*cosh(lambda)
.*cos(lambda)))*...
cosh((lambda .* Xo)/c) .*cos((lambda .* Xo)/c);

GOL_B = ((R1 *lambda^2 *k .*0.5)+(lambda .*klinha .*sinh(lambda)
.*sin(lambda))*...
sinh((lambda .*Xo /c)) .*sin((lambda .*Xo /c));

Tpeel_Goland = (1/delta).*(Pb*t/c^2).*(GOL_A+ GOL_B); % Tensão de peel de
goland

%%% HART SMITH - MODELO MATEMATICO

% Tensão de cisalhamento - Região elástica - Hart Smith

D=(E*t^3)/(12*(1-poisson^2));
ee=sqrt(Pb/D);
c1=sqrt((1+3*(1-poisson^2))*Ga/(2*Ta*E*t));
M=Pb/2*(t+Ta)*(1/(1+ee*c+(ee^2*c^2/6)));
A2=(Ga/Ta/E/t)*(Pb+6*(1-poisson^2)*M/t)*(1/(2*c1*sinh(2*c1*c)));
c2=(1/2/c)*(Pb-A2*sinh(2*c1*c)/c1);
Tcis_Hart=A2*cosh(2*c1.*Xo)+c2; % Tensão de cisalhamento de Hart Smith

% % Tensão de peel - Hart Smith

c3=sqrt(sqrt(Ea/(2*D*Ta)));
A= -(Ea *M*(sin(c3*c) - cos(c3*c)))/(Ta *D* c3^2 *exp(c3*c));
B= (Ea *M*(sin(c3*c) + cos(c3*c)))/(Ta *D* c3^2 *exp(c3*c));
Tpeel_Hart = A *cosh(c3*Xo).*cos(c3*Xo)+B*sinh(c3*Xo).*sin(c3*Xo);

%%% Maximos e minimos de cada tensão %%%%%%%%%%

% ex MCV - Max cisalhamento Volk
% ex mph - Min peel Hart-Smith

%Tensao de cislhamento
MCV = max(Tcis_Volk);
MCG = max(Tcis_Goland);
MCH = max(Tcis_Hart);

```

```

mcv = min(Tcis_Volk);
mcg = min(Tcis_Goland);
mch = min(Tcis_Hart);

%Tensao de peel

MPG = max(Tpeel_Goland);
MPH = max(Tpeel_Hart);
mpg = min(Tpeel_Goland);
mph = min(Tpeel_Hart);

table (MCV, MCG, MCH)
table (MPG, MPH)

%Grafico de barra com a tensao maior

%%%%%%%% PLOTAGEM DE GRAFICOS %%%%%%%%%

figure(1)
plot(Xo, Tcis_Volk,'g', Xo, Tcis_Goland,'r', Xo, Tcis_Hart,'b'),
xlabel('Comprimento de Overlap (mm)'), ...
    ylabel('Tensão de cisalhamento (MPa)'), legend('Volkersen', 'Goland &
Reissner', 'Hart-Smith', 'Ojalvo & Eidino'),...
    title ('Tensão de cisalhamento ao longo da junção adesiva'), grid

figure(2)
plot(Xo, Tpeel_Goland,'r', Xo, Tpeel_Hart, 'b'), xlabel('Comprimento de
Overlap (mm)'), ylabel('Tensão de arrancamento (MPa)'),...
    legend('Goland & Reissner', 'Hart-Smith', 'Ojalvo & Eidino'), ...
    title ('Tensão de arrancamento ao longo da junção adesiva'), grid

figure (3)
maxmin_cis = [ mcv, MCV; mcg, MCG; mch, MCH; mco, MCO];

%maxmin_cis = [MCV, MCG, MCH, MCO];
% titulo_cis = categorical({'Volkersen', 'Goland & Reissner', 'Hart-Smith',
'Ojalvo & Eidino'});

bar(maxmin_cis), xlabel('Método analítico'), ylabel('Tensão de
Cisalhamento (MPa)'),...
    legend ('Tensão Mínima', 'Tensão Máxima'), colorbar

```

## APÊNDICE B

Para obter as propriedades mecânicas do compósito fabricado, 7 corpos de prova desse compósito foram submetidos a um ensaio de tração conforme a norma ASTM D 3039. Os corpos de prova foram fabricados seguindo o mesmo procedimento da seção 5.2, e em formato retangular com 100 mm de comprimento x 20,2 mm de largura e  $2,19 \pm 10$  mm de espessura. A Figura 42 apresenta uma fotografia destes corpos de prova e a Figura 43 apresenta a fotografia dos corpos de prova após colagem dos “tabs”. Os tabs neste caso, foram confeccionados em fibra de vidro e resina epóxi e devem ser colados nos extremos dos corpos de prova para que as tensões sejam transmitidas das garras da máquina sem danificar os corpos de prova. Os ensaios de tração longitudinal foram realizados em uma máquina de ensaio universal da EMIC modelo 23-100 a uma velocidade de 1,5 mm/min.

O resultado do ensaio de tração é mostrado a seguir em forma do gráfico de tensão x deformação (Figura 41), onde a média do limite de tração foi  $341,14 \text{ MPa} \pm 39,41 \text{ MPa}$  e a média do módulo de elasticidade foi de  $74,12 \text{ GPa} \pm 3,52 \text{ GPa}$ .

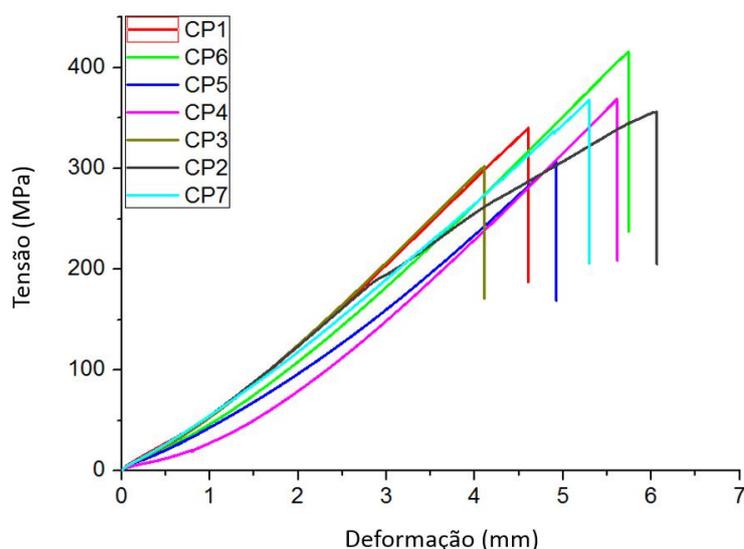


Figura 41 – Tensão x deformação do compósito fabricado.

Fonte: própria.



Figura 42 - Corpos de prova sem os "tabs".

Fonte: Propria.



Figura 43 - Corpos de provas prontos para serem ensaiados.

Fonte: própria.