UNESP

Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Guaratinguetá

2011

BRUNO DANIEL DOS SANTOS

AVALIAÇÃO DA COLAGEM DE SUPORTES UTILIZADO PARA FIXAR CABOS ELÉTRICOS EM AERONAVES

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho

Guaratinguetá

2011

Santos, Bruno Daniel dos
S237e Avaliação da colagem de suportes utilizados para fixar cabos elétricos em aeronaves / Bruno Daniel dos Santos – Guaratinguetá : [s.n], 2011.
56 f : il.
Bibliografia: f. 39-41

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.
Orientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho

1. Adesivos 2. Aeronaves I. Título

CDU 665.93

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

"ESTUDO DO COMPORTAMENTO E PROPRIEDADES DA COLAGEM DE SUPORTES EM AERONAVES PARA FIXAÇÃO DE CABOS ELÉTRICOS"

BRUNO DANIEL DOS SANTOS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE **GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. Valdir Alves Guimarães
UNESP/FEG

Ma. Maria Cândida Magalhães de Faria
USP/FAENQUIL

DADOS CURRICULARES

BRUNO DANIEL DOS SANTOS

NASCIMENTO	06.05.1988 – SÃO JOSÉ DOS CAMPOS / SP
FILIAÇÃO	Roseane de Fátima dos Santos
2006/2011	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista

de modo especial, à minha mãe e à minha noiva , que sempre me apoiaram nos momentos de dificuldade e me incentivaram a não desistir dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, que me deu saúde, sabedoria e força para lutar contra todas as adversidades encontradas ao longo do caminho trilhado.

A minha família, especialmente a minha mãe Roseane e a minha avó Neusa, que sempre me deram todo suporte para que eu tivesse o estudo como única preocupação e me apoiaram em todos os momentos de dificuldade.

A minha noiva Amanda que me acompanhou durante toda essa jornada me incentivando sempre a estudar e me confortando nos momentos de tristeza.

Aos meus amigos de faculdade e amigos de república que me auxiliaram no esclarecimento de diversas dúvidas.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho* que se mostrou prestativo e compreensivo diante das dificuldades encontradas durante a realização desse trabalho e soube me orientar para contornar os problemas e efetuar os ensaios.

A EMBRAER, em particular na pessoa do engenheiro Gustavo Garcia Costa, pelos dados utilizados no estudo e principalmente pela colaboração na solução de dúvidas pertinentes ao processo estudado.

"As pessoas que vencem neste mundo são as que procuram as circunstâncias de que precisam e, quando não as encontram, as criam."

Bernard Shaw

SANTOS, B. D. **Avaliação da colagem de suportes utilizados para fixar cabos elétricos em aeronaves**. 2011. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

O método mais convencional de fixação dos suportes que sustentam a grande maioria dos cabos elétricos em uma aeronave é efetuado por meio da cravação utilizando-se, para esta finalidade, rebites. Entretanto, este procedimento pode ocasionar algumas inconveniências como a necessidade de efetuação de furos na estrutura que se destina a fixar esses suportes, diminuindo, assim, a resistência da mesma. Visando ter uma alternativa com o intuito de buscar um aumento no desempenho de materiais estruturados, a indústria aeronáutica, assim como outros ramos industriais, veêm estudando a utilização de colagem como método de substituição a essas formas convencionais. Diante desse cenário, este trabalho objetiva a avaliar a resistência e a durabilidade de uma junta colada utilizando o adesivo EA9394, fabricado pela empresa Henkel Corporation, assim como realizar um criterioso levantamento do desempenho mecânico de estruturas rebitadas, levando-se em consideração diferentes tipos de condicionamentos ambientais e, consequentemente, criar um banco de dados que poderá ser utilizado pelo setor aeroespacial.

PALAVRAS-CHAVE: Colagem. Condicionamento Ambiental. Adesivo EA9394.

SANTOS, B. D. **Evaluation of bonding of supports used to fix cables in aircraft**. 2011. 55 pp. Final Paper (Bachelor´s Degree in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

The most usual method to fix supports that hold the vast majority of electrical cables on an aircraft is accomplished by using, for this purpose, rivets. However, this procedure may some cause some inconveniences such as the need of effecting holes in the structure that is intended to fix these supports, thus decreasing resistance of the structure. In order to have an alternative to seek an increase in the performance of structured materials, the aircraft industry, like other industries, have been studying the use of collage as a method of replacing this usual forms. Against this backdrop, this paper aims to assess the strength and durability of a joint bonded using the adhesive EA9394, manufactured by company Henkel Corporation, and perform a careful survey of the mechanical performance of riveted structures, taking into account different types of conditioning environment and thus create a database that can be used by the aerospace industry.

KEYWORDS: Bonding. Environmental Conditioning. Adhesive EA9394.

Lista de Figuras

Figura 1 – Nomenclatura de uma junta adesivada (Handbook of Adhesives, 1977) 4

Figura 2 – Esquema de molhamento de superfície (Handbook of Adhesives and Sealants, 2000) 6

Figura 3 – Ângulo de contato de uma gota líquida em uma superfície plana (Standard Terminology of Adhesives) 7

Figura 4 – Efeito da aspereza da superfície adesivada (Standard Terminology of Adhesives) 8

Figura 5 – Distribuição do esforço em uma junta rebitada (a) versus uma junta colada (b) (McGrath, 2001) 11

Figura 6 – Flexibilidade de uma junta colada (HIGGINS, 2000) 12

Figura 7 – Tipos de esforços de clivagem (TEIXEIRA, 2000) 15

Figura 8 – Tipos de esforços de peeling (TEIXEIRA, 2000) 16

Figura 9 – Configuração do ensaio de tração (TEIXEIRA, 2000) 16

Figura 10 – Aplicação do suporte 17

Figura 11 – Suporte PE29051-11 (Material padronizado, 2011) 18

Figura 12 – Componentes do adesivo EA9394 a) Base do adesivo b) Catalisador 19

Figura 13 – Materiais utilizados a) Lixa d´água n° 180 b) Solvente rhodiasolve c) Pano limpo d) Balança e) Copo f) Espátula 19

Figura 14 – Efeito do lixamento na superfície 20

Figura 15 – Corpo de prova a) Vista superior b) Vista frontal 21

Figura 16 – Câmara de névoa salina 22

Figura 17 – Disposição dos corpos de prova na câmara de névoa salina 22

Figura 18 – Imersão no combustível 23

Figura 19 – Imersão no Skydrol 24

Figura 20 – Ensaios mecânicos: a) máquina universal de ensaio; b) dispositivo de ensaio.....24

Figura 21 – Fixação do corpo de prova para ensaio de descascamento 25

Figura 22 – Região de rompimento do corpo de prova após ensaio de descascamento26

Figura 23 – Fixação do corpo de prova para ensaio de cisalhamento 27

Figura 24 – Região de rompimento do corpo de prova após ensaio de cisalhamento ..27

Figura 25 - Remoção total do Primer 28

Figura 26 – Gráfico de Comparação – Sem Primer versus Com Primer.....31

Figura 27 – Falha adesiva no Primer do suporte: a) Substrato; b) Suporte.....32

Figura 28 – Falha adesiva entre o adesivo e o metal: a) Substrato; b) Suporte 32

Figura 29 – Ocorrência de falha Adesiva. 33

Figura 30 – Ocorrência de falha Coesiva. 34

Figura 31 – Configuração rebitada após falha.....35

Figura 32 – Modo de falha sob esforço de cisalhamento do corpo de prova rebitado..36

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Vantagens e limitações dos adesivos estruturais mais empregados.....9

Tabela 1 – Vantagens e limitações dos adesivos estruturais mais empregados (continuação).....10

Tabela 2 – Matriz de ensaio.....18

Tabela 3 – Características do adesivo EA9394 (Henkel, 2011) 20

Tabela 4 – Proporção de mistura e temperatura de trabalho do adesivo EA9394.....21

Tabela 5 – Características da câmara de névoa salina.....22

Tabela 6 – Propriedades físicas e químicas do combustível JET A1 (Shell, 1996) 23

Tabela 7 – Características da máquina universal de ensaios mecânicos.....25

Tabela 8 – Análise do Peso. 29

Tabela 9 – Resultados dos Ensaios de Descascamento 30

Tabela 10 – Resultados dos Ensaios de Cisalhamento 30

Tabela 11 – Comparação – Com Primer versus Sem Primer 31

Tabela 12 – Variação da carga de ruptura após o condicionamento em Skydrol 33

Tabela 13 – Comparação – Colado versus Rebitado.....34

Tabela 14 – Comparação – Cisalhamento versus Descascamento.....35

SUMÁRIO

1. Introdução 1

2. Revisão bibliográfica 3

2.1 Colagem Estrutural 3

2.2 Teoria da Adesão 5

2.2.1 Forças de origem química 5

2.2.2 Forças de ancoramento mecânico 7

2.2.3 Forças eletrostáticas 8

2.3 Classificação dos adesivos 8

2.4 Vantagens e Desvantagens 11

2.5 Preparação da superfície 12

2.5.1 Aplicação de PRIMERS 14

2.6 Esforços mecânicos em junta adesivadas 15

2.6.1 Clivagem 15

2.6.2 Descascamento 15

2.6.3 Tração 16

2.7 Aplicação do Suporte 17

3. Metodologia 18

3.1 Materiais e Matriz de Ensaio 18

3.2 Processo de Colagem 18

3.2.1 Material utilizado na colagem 19

3.2.2 Preparo da superfície 19

3.2.3 Preparo do adesivo 20

3.2.4 Cura do adesivo 21

3.3 Condicionamento ambiental 21

3.3.1 Câmara de névoa salina 21

3.3.2 Imersão em combustível 23

3.3.3 Imersão em Skydrol 23

3.4 Ensaios Mecânicos 24

3.4.1 Ensaio de Descascamento 25

3.4.2 Ensaio de Cisalhamento 26

3.5 Influência do preparo da superfície 28

4. Resultados e Discussões 29

4.1 Análise da redução de peso 29

4.2 Resultados obtidos 30

4.3 Análise das cargas de ruptura 30

4.4 Cisalhamento versus Descascamento 35

5. Conclusão 37

6. Sugestões de Trabalhos Futuros 38

7. Referências 39

1. Introdução

A tecnologia de junta adesivada tem se tornado cada vez mais presente no ambiente industrial. A utilização de adesivos estruturais na colagem de materiais metálicos e não-metálicos, principalmente na indústria aeronáutica e automobilística, tem se mostrado uma metodologia bastante interessante, propiciando o surgimento de estudos nas mais diversas formas de aplicação desse método (TEIXEIRA, 2000).

Um dos importantes requisitos das juntas coladas é suportar as cargas estática e dinâmica, em condições de serviço, durante o seu ciclo de vida. O seu comportamento perante condições ambientais adversas e diferentes acabamentos superficiais do substrato constituem outros parâmetros importantes que merecem atenção especial e devem ser considerados para uma estimativa de durabilidade de uma configuração (TOMBLIN, 2001; TEIXEIRA, 2000).

No caso particular dos adesivos a base de epóxi, objeto de estudo desse trabalho, a exposição a condições de umidade e temperatura relativamente elevadas conduz a redução de suas propriedades físicas e mecânicas devido à formação de microcavidades e ao efeito plastificante induzido pela presença da umidade (MAYER, 2003).

A fabricação dos adesivos é feita, na maioria das vezes, a partir de produtos de origem orgânica, provenientes de fontes naturais, de origem animal, vegetal ou mineral. Entretanto, o desenvolvimento da química sintética possibilitou o surgimento de adesivos, produzidos a partir da sintetização, de acordo com o tipo de aplicação e com propriedades adequadas às condições de serviço. Esse desenvolvimento, principalmente para união de materiais metálicos, teve o seu impulso na década de 40 quando os adesivos sintéticos de alta resistência se tornaram viáveis comercialmente (TEIXEIRA, 2000).

Uma das principais vantagens oferecidas pela utilização de adesivos ao invés dos métodos convencionalmente conhecidos, como rebitagem e soldagem, por exemplo, é o fato destes permitirem a união tanto de materiais similares quanto diferentes entre si sem deixar de fornecer rigidez à junta. Entretanto, para garantir a funcionalidade da junta se faz necessário conhecer a fundo as propriedades apresentadas pelo adesivo diante da condição que a configuração será submetida (MENDES, 2005).

Diante do exposto, este trabalho aborda uma proposta de estudo para aplicação da colagem em suportes metálicos que sustentam sistemas de cablagem numa aeronave, simulando possíveis condições ambientais e tipos de esforços a que podem ser submetidos à configuração de montagem, promovendo um levantamento de dados com as cargas de ruptura

dos corpos de prova colados e comparando as mesmas com situações mais habituais, onde a fixação ocorre a partir da utilização de rebites (MAYER, 2003).

Uma preocupação com o procedimento de colagem para a aplicação estudada é tempo de cura total do adesivo, no caso o EA9394, que varia de 5 a 7 dias se deixado curar a temperatura ambiente, o que pode limitar a manuseabilidade a curto prazo possibilitando a interfência no tempo de montagem de peças subsequentes na estrutura. Até existem formas de promover a aceleração desse processo através da colocação da região colada em ambientes com temperaturas moderadamente elevadas, mas dependendo do local ou mesmo do tamanho do conjunto montado torna-se inviável essa realização (MENDES, 2005; TEIXEIRA, 2000; SANTOS, 2007).

Outro fator que pode limitar a utilização da colagem é a temperatura do ambiente no local de serviço de um determinado componente colado, pois dependendo da composição do adesivo pode haver a diminuição da resistência da união ou, em situações mais severas, a degradação do mesmo comprometendo a fixação (TEIXEIRA, 2000).

2. Revisão bibliográfica

2.1 Colagem Estrutural

O desenvolvimento de juntas realizadas por adesão vem sendo largamente empregado em substituição às peças unidas pelos métodos convencionais de fixação mecânica em diversos ramos da engenharia. Devido à enorme busca por um melhor desempenho nas indústrias aeroespaciais, a tecnologia de colagem estrutural ocupa cada vez mais espaço nesse mercado (NOU, 2011).

O peso dos componentes tem influência significativa no desempenho em voo, na capacidade de transporte e no consumo de combustível, sendo que a medida da eficiência de uma aeronave pode ser avaliada como uma relação entre a carga máxima e o peso máximo para decolagem. Portanto, uma estrutura leve tem importância relevante em sua eficiência (COSTA, 2002; MAYER, 2003; GATTI, 2009).

Nesse tipo de colagem o adesivo é utilizado para a transferência de carregamento entre superfícies aderentes em ambientes de serviço onde o conjunto é exposto a exigências ou em estruturas de engenharia onde se requer alta confiabilidade devido à responsabilidade da solicitação à qual a junta está exposta. Esses adesivos podem ser submetidos a tensões de cisalhamento muito próximas à de tensão de ruptura por longos períodos sem a efetiva falha da junta adesivada (MENDES, 2005). Em algumas aplicações aeronáuticas, os componentes estruturais podem ser submetidos tanto a esforços cíclicos mecânicos como térmicos, e eventualmente de modo simultâneo (HENAF-GARDIN; LAFARIE-FRENOT, 2002).

No entanto materiais indicados para aplicação aeronáutica devem operar em meios hostís, mantendo sua resistência a oxidação em altitude de cruzeiro e na presença da umidade relativa do solo e, também, sua integridade estrutural por 60.000 horas de vida de operação (ROBINSON; CHARETTE; LEONARD, 1991).

A maioria das aeronaves são geralmente utilizadas por um período igual ou superior a 30 anos, sob uma vasta variedade de condições ambientais, tais como ar frio e quente, atmosferas quente e úmida e sob radiação ultravioleta. Dessa forma, os materiais utilizados na construção de aeronaves devem ter o compromisso de manter suas propriedades ao longo de toda sua vida útil, mesmo nos ambientes mais severos (FARIA, 2008).

Alguns termos característicos são utilizados para denominar os componentes envolvidos no processo de colagem. Sendo assim, a ASTM D907-89 apresenta algumas definições ilustradas na Figura 1 (MENDES, 2005):

- ✓ **ADESIVO** – substância capaz de manter unidos elementos pelo contato das superfícies;
- ✓ **ADERENTE** – elemento unido a outro elemento por adesivo;
- ✓ **SUBSTRATO** – camada mais superficial do elemento, que caso seja aplicado o adesivo, possibilita sua junção a outro elemento;
- ✓ **PRIMER** – cobertura aplicada ao substrato do aderente a fim de garantir melhor aderência do adesivo;
- ✓ **JUNTA ADESIVADA** – conjunto de elementos unidos pelo adesivo;
- ✓ **ADESÃO** – fenômeno que possibilita ao adesivo transferir uma carga do substrato para a junta adesivada;
- ✓ **AB-HESÃO** – o fenômeno da antiadesão, que identifica a menor adesão possível entre os substratos ou a capacidade de deslizamento entre os substratos; TEFLON ® e silicones são materiais ab-hesivos;
- ✓ **ADESÃO PRÁTICA** - medida da força física de uma junta; as falhas numa junta adesivada são identificadas como:

Falha Adesiva – falha entre o adesivo e o substrato do aderente, ruptura entre substrato e adesivo.

Falha Coesiva – falha entre as camadas internas do adesivo, ruptura entre adesivo e adesivo.

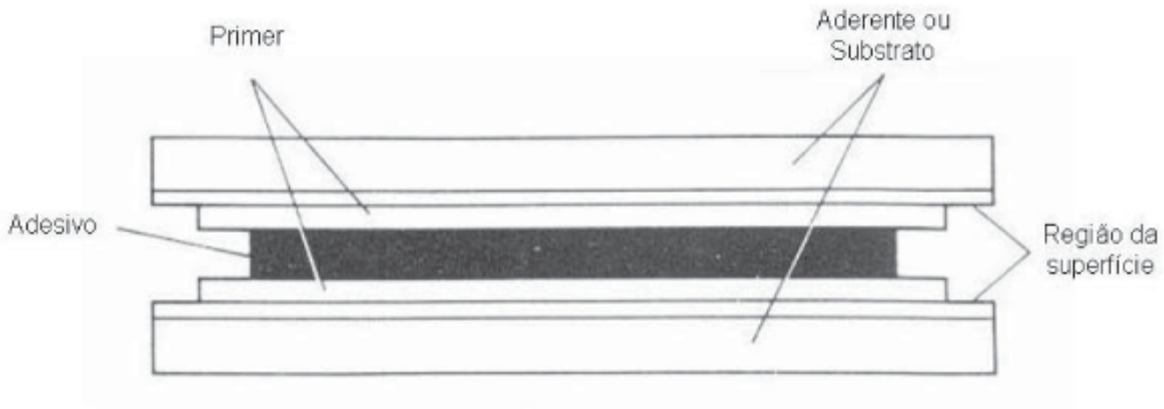

Figura 1 – Nomenclatura de uma junta adesivada (Handbook of Adhesives, 1977)

2.2 Teoria da Adesão

Não há uma teoria unificada que modela, com precisão, todas as interações que ocorrem entre o adesivo e o substrato. As teorias existentes fornecem métodos pelos quais se pode racionalizar observações práticas (PETRIE, 2000).

A ligação do adesivo a uma superfície (substrato), garantindo o molhamento, é resultado de (MENDES, 2005):

✓**Forças de origem química** – ligações químicas diretas entre as interfaces;

✓**Forças de ancoramento mecânico** – ancoramento mecânico nas rugosidades e porosidades superficiais dos componentes da junta;

✓**Forças eletrostáticas** – atração eletrostática entre as superfícies de contato;

2.2.1 Forças de origem química

2.2.1.1 Teoria da Adsorção

A Teoria de Adsorção estabelece que a adesão envolve forças de superfície que se desenvolvem entre os átomos. As forças de superfície, mais comuns, que formam a interface entre adesivo e aderente são identificadas como forças de van der Waals (PETRIE, 2000).

Para o desenvolvimento dessas interações de van der Waals é necessário o contato íntimo entre as superfícies do adesivo e do aderente (MENDES, 2005). O processo que estabelece esse contato é conhecido como molhamento. Qualquer que seja a forma física de um adesivo, líquida, pastosa, sólida, esponjosa ou filme, este deve ser capaz de molhar as superfícies a serem coladas. Um bom molhamento ocorre quando o adesivo flui para os vales e fendas na superfície do substrato; já um molhamento ruim acontece quando o adesivo não preenche todos os vales e fendas de uma superfície, desenvolvendo pequenas bolhas de ar ao longo da interface conforme ilustrado na Figura 2 (PETRIE, 2000).

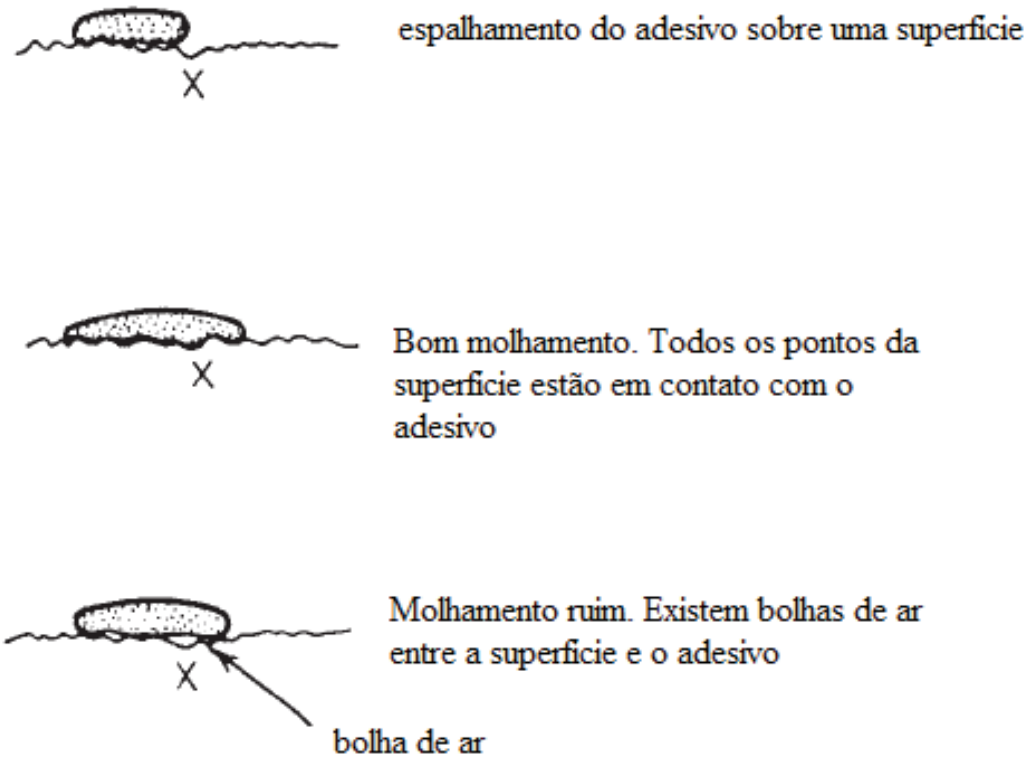

Figura 2 – Esquema de molhamento de superfície (Handbook of Adhesives and Sealants, 2000)

O molhamento pode ser determinado pela medida do ângulo de contato entre o adesivo e o substrato. De acordo com a equação de Young (equação 1), as tensões nas três fases de contato são relacionadas com o ângulo θ , conforme ilustra a Figura 3 (MENDES,2005).

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV}\cos\theta \qquad \text{Equação 1}$$

onde:

γ_{SV} : tensão superficial sólido-vapor

γ_{SL} : tensão superficial sólido-líquido

γ_{LV} : tensão superficial líquido-vapor

Outro importante fator consiste na habilidade do adesivo de se espalhar, espontaneamente, no substrato, quando a junta é formada. O molhamento espontâneo ocorre quando a tensão superficial sólido-vapor é maior ou igual a soma das tensões superficiais

sólido-líquido e líquido-vapor, como apresentado na equação 2 (SANTOS, 2007; MENDES,2005):

$$\gamma_{SV} \geq \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \qquad \text{Equação 2}$$

Para um bom molhamento, a tensão superficial do adesivo líquido deve ser menor que a tensão superficial do substrato sólido, como apresentado pela equação 3:

$$\gamma_{SV} \geq \gamma_{SL} \qquad \text{Equação 3}$$

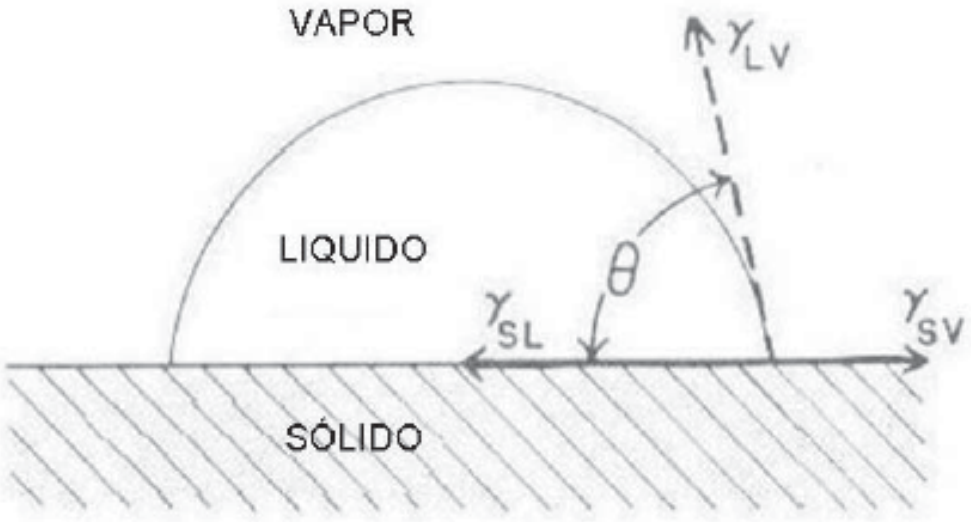

Figura 3 **– Ângulo de contato de uma gota líquida em uma superfície plana (Standard Terminology of Adhesives)**

2.2.2 Forças de ancoramento mecânico

O conceito de ancoramento mecânico ocorre, quando o adesivo penetra nos poros, fendas, aberturas ou outras irregularidades da superfície que adere ao substrato, travando-a mecanicamente. O adesivo deve molhar o substrato como também possuir propriedades reológicas específicas para penetrar nos poros e fendas num período de tempo razoável. Desde que uma boa adesão ocorra entre as superfícies lisas do aderente, o ancoramento ajuda a promover a adesão, porém, não é um mecanismo único (PETRIE, 2000).

O pré-tratamento da superfície que receberá o adesivo garante estabilidade na rugosidade, permitindo o ancoramento do adesivo de forma constante e, principalmente, de forma uniforme e conhecida. Estes pré-tratamentos resultam em micro-rugosidades na superfície do aderente, o que melhora a força de ligação e durabilidade da junta. A preparação da superfície permite uma cinética de molhamento melhorada e uma maior superfície de contato do adesivo, já que este alcançará todos os picos e vales da micro-superfície rugosa, vide Figura 4 (MENDES, 2005).

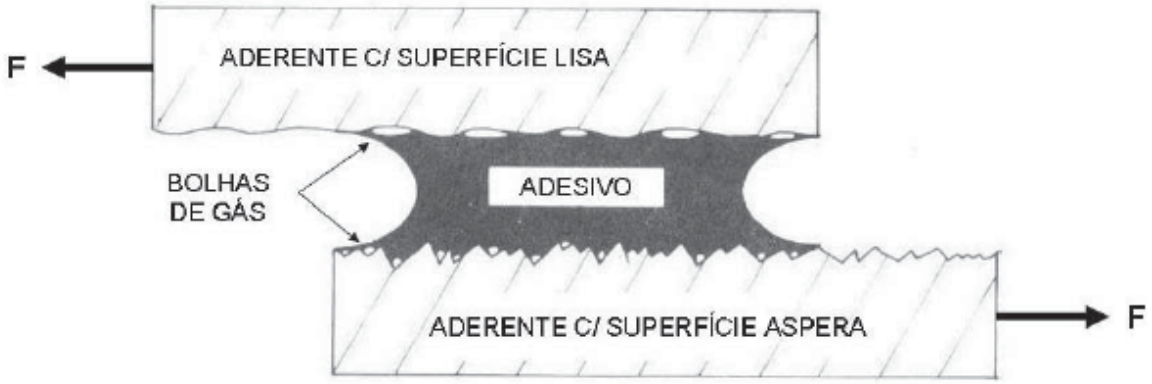

Figura 4 – Efeito da aspereza da superfície adesivada (Standard Terminology of Adhesives)

2.2.3 Forças eletrostáticas

O modelo eletrostático sugere que a adesão resulta da atração entre cargas positivas distribuídas na superfície do substrato e cargas negativas distribuídas na superfície do adesivo e vice-versa. Sabe-se que por meio do atrito entre os corpos, ou seja por fricção, pode gerar forças eletrostáticas em superfície isolada. No entanto o adesivo líquido não possue carga, não é friccionado contra o substrato e não adquire carga ao se polimerizar, desta maneira o significado prátido desse modelo revela-se limitado (SANTOS, 2007).

2.3 Classificação dos adesivos

Atualmente, existem cinco grupos clássicos em que os adesivos podem ser divididos (MENDES, 2005):

- ✓Estruturais;
- ✓Cola quente;

✓Sensíveis a pressão;
✓À base d´água;
✓Cura por ultravioleta (UV) e feixe de elétrons (FE);

Uma vez que o assunto abordado nesse trabalho é colagem estrutural, será enfatizado o grupo dos estruturais, o qual na sua maioria são polímeros termorrígidos, ou seja, substâncias sintéticas orgânicas que podem ser convertidas por reação química em permanente cura e ainda podem ser subdivididos em famílias químicas da seguinte maneira:

✓Epóxis;
✓Poliuretanos;
✓Acrílicos Modificados;
✓Cianoacrilatos;
✓Anaeróbicos;

A escolha da família a ser utilizada varia de acordo com as vantagens e limitações apresentadas para determinadas condições de aplicação. A Tabela 1 apresenta informações a esse respeito (MENDES, 2005).

Tabela 1 – Vantagens e limitações dos adesivos estruturais mais empregados

Família	Vantagens	Limitações
Epoxi	✓ Grande força de união. ✓ Boa resistência aos solventes. ✓ Alta capacidade de preencher espaços. ✓ Boa resistência nas altas temperaturas. ✓ Diversificação em formulações. ✓ Relativo baixo custo.	✓ Reação exotérmica. ✓ Sistema de dois componentes, requer cuidados na proporção e na homogeneização da mistura. ✓ Formulação com um componente requer armazenamento refrigerado e elevada temperatura de cura (ativador). ✓ Pequeno tempo de utilização para processamento. (perda material).

Tabela 2 – Vantagens e limitações dos adesivos estruturais mais empregados (continuação)

Família	Vantagens	Limitações
Poliuretanos	✓ Variação no tempo de cura ✓ Grande resistência. ✓ Excelente flexibilidade mesmo a baixas temperaturas. ✓ Um ou dois componentes, cura em diversas temperaturas. ✓ Custo razoável.	✓ Material sensível à umidade, curado ou não curado. ✓ Limitada resistência em alta temperatura com ou sem umidade. ✓ Pequeno tempo de utilização para processamento. (perda material). ✓ Requer equipamento especial para homogeneização e liberação do adesivo.
Acrílico Modificado	✓ Boa flexibilidade. ✓ Boa resistência ao cisalhamento e arrancamento. ✓ Não requer homogeneização. ✓ Age em superfície contaminada (óleo). ✓ Cura à temperatura ambiente. ✓ Custo moderado.	✓ Baixa resistência em alta temperatura. ✓ Cura mais lenta quando comparado aos anaeróbicos ou cianoacrilatos. ✓ Tóxico e inflamável, exala forte odor. ✓ Requer equipamento especial para liberação do adesivo.
Cianoacrilatos	✓ Cura rápida à temperatura ambiente. ✓ Um componente. ✓ Alta força de tração. ✓ Grande período de validade. ✓ Boa aderência ao metal. ✓ Aplicação diretamente da embalagem.	✓ Alto custo ✓ Baixa durabilidade em algumas superfícies. ✓ Resistência a solventes limitada. ✓ Baixa resistência em alta temperatura. ✓ Perigo na aplicação, cola na pele.
Anaeróbicos	✓ Cura rápida à temperatura ambiente. ✓ Boa resistência aos solventes. ✓ Não requer homogeneização. ✓ Período de validade indefinido. ✓ Alta resistência para alguns substratos. ✓ Não tóxico, custo moderado.	✓ Não recomendado para superfícies permeáveis. ✓ Não cura ao ar como um filete úmido ✓ Limitado espaçamento entre as peças (não atua em grandes espaçamentos).

2.4 Vantagens e Desvantagens

As vantagens e desvantagens podem variar dependendo da aplicação, mas é possível evidenciar alguns aspectos. Em termos de vantagens observa – se que (McGrath, 2001):

✓Materiais diferentes podem ser unidos;

✓O vínculo é contínuo;

✓Estruturas mais fortes e mais duras podem ser projetadas;

✓Melhor distribuição de esforços numa maior área de carregamento quando comparado à junta com elementos mecânicos de fixação como ilustrado na Figura 5;

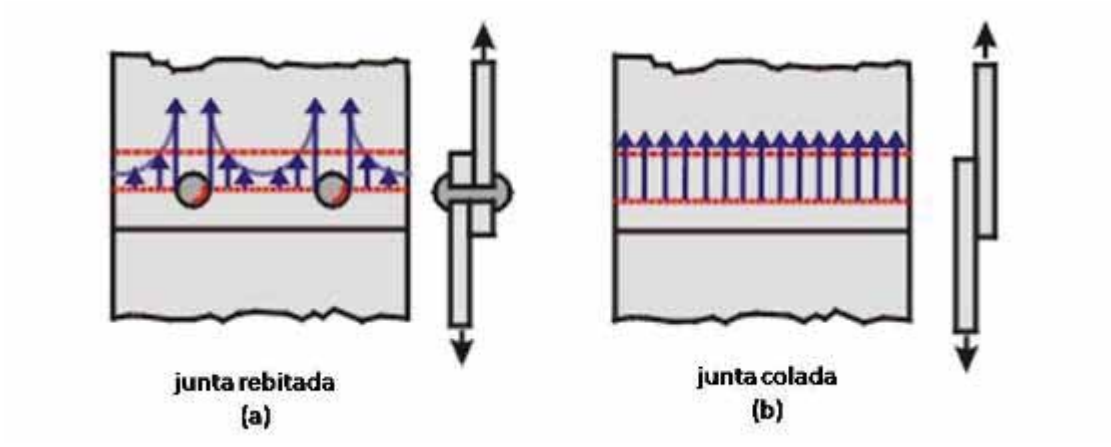

Figura 5 – Distribuição do esforço em uma junta rebitada (a) *versus* uma junta colada (b) (McGrath, 2001)

✓Possibilita a junção de materiais de diferentes espessuras em qualquer formato;

✓Materiais porosos podem ser ligados;

✓Previnem a corrosão catalítica;

✓Sem custos de acabamento;

✓Melhor resistência à fadiga;

✓Maior flexibilidade como ilustrado na Figura 6;

Figura 6 – Flexibilidade de uma junta colada (HIGGINS, 2000)

✓Anti-vibração;

✓Redução de peso e número de peças;

✓Grandes áreas podem ser coladas;

✓Pequenas áreas podem ser ligadas com precisão;

✓Fácil de combinar com outros métodos de fixação;

✓Facilmente automatizado / mecanizada.

Em contrapartida, algumas limitações também podem ser apresentadas:

✓Aumento da temperatura de serviço diminui a resistência de união;

✓Manuseabilidade em curto prazo é pobre;

✓Estruturas ligadas são normalmente difíceis de desmantelar no reparo do serviço;

✓Necessidade de preparação de superfície;

✓A resistência a fatores ambientais depende da integridade do adesivo;

✓Existe a necessidade de assegurar o umedecimento;

✓Familiarizado controles de processo.

2.5 Preparação da superfície

A preparação da superfície dos aderentes é o primeiro cuidado para obtenção de uma junta adesivada de qualidade com características controladas. O tratamento difere em função dos materiais e do grau de complexidade exigido pela junta, desde uma simples limpeza com solvente em poucos minutos até um pré-tratamento de diversos estágios e tratamento químico da superfície com duração de 30 min ou mais (MENDES, 2005).

Na escolha de um processo de limpeza superficial muitos fatores devem ser considerados, incluindo:

✓A natureza do contaminante a ser removido;

✓O substrato a ser limpo (ou seja, ferroso, não-ferroso, etc);

✓A importância da condição da superfície para o uso final da peça;

✓O grau de limpeza necessário;

✓A capacidade existente de instalações disponíveis;

✓O impacto ambiental do processo de limpeza;

✓Considerações sobre o custo;

✓Efeito de processos anteriores;

✓Requisitos de superfície para operações subsequentes, como pintura, galvanização, etc.

Muito pouco desses fatores podem ser quantificados com precisão, resultando em uma análise subjetiva e propiciando que várias operações possam ser escolhidas para produzirem juntas com um resultado final desejado (ASM HandBook Vol 05 – Surface Engineering).

É preciso considerar sempre o tratamento da superfície em conjunto com as outras propriedades dos adesivos, para definir a adesão entre os materiais. Existem alguns procedimentos para a preparação superficial anterior a junção (MENDES, 2005):

✓**nenhum tratamento (menor custo, porém, pior reprodutibilidade)** - no caso de não ser feito nenhum tratamento, a superfície continuará com toda a irregularidade. Tal processo de limpeza não é reproduzível pois cada superfície tem um grau de rugosidade e composição química diferente, causando desvios durante a adesão para várias superfícies;

✓**lavagem por solvente** - é capaz de remover a maioria dos contaminantes orgânicos, mas são necessários outros artifícios, para evitar que os contaminantes sejam depositados novamente, e boa ventilação do local onde o tratamento será realizado;

✓**lavagem por vapor de solvente –** é similar ao processo de lavagem por solvente, com a vantagem principal de não permitir a deposição do contaminante sobre a área anteriormente limpa. Neste caso, a limitação se encontra no processo que está restrito a pequenas peças (joalheria ou peças especiais de aeronáutica);

✓**abrasão mecânica –** é realizada a partir do jateamento de diversos materiais, desde os mais tradicionais, onde a areia é utilizada como material abrasivo até as esferas de vidro, aço e materiais orgânicos, como cascas de nozes. A especificação do material a ser jateado é em função do material a ser limpo e de seu grau de abrasão. É necessário que seja realizado em câmara selada para que o contato com o ar ambiente não inicie o processo de corrosão da superfície limpa;

✓**tratamento por plasma** – são utilizados principalmente para melhorar as características polares das superfícies e as propriedades mecânicas e aumentar a capacidade

de unir polímeros com baixa energia de superfícies (PE - Polietileno, PP - Polipropileno). Em uma câmara fechada a vácuo, é aplicado o plasma sobre a superfície a ser tratada; a atmosfera em que é feito o tratamento tem influência nas características finais do acabamento;

✓**ataque químico ou decapagem** – remove as camadas atômicas mais superficiais mantendo expostas as camadas atômicas mais homogêneas, porém, apresenta os mesmos inconvenientes dos processos de limpeza por solvente, onde há o risco de contaminação de uma área anteriormente limpa por uma camada não homogênea ou deposição de contaminantes. Com deposição controlada de uma camada atômica obtém-se uma superfície bem controlada e reprodutível, sendo um dos melhores processos de tratamento de superfície, apesar de excessivamente caro;

✓**deposição química** – deposição de uma nova camada atômica sobre a superfície do material, pode-se obter uma superfície bem controlada da camada final, com as características controladas para a adesão;

2.5.1 Aplicação de PRIMERS

A superfície dos materiais não é isenta de variações. Dependendo do histórico do material, esta pode sofrer ou não mudanças que devem ser contornadas de alguma forma. Neste caso, é recomendável a aplicação de primers na superfície com o intuito de modificá-la e prepará-la para melhorar o contato e aderência com o adesivo aplicado. São três as principais funções dos primers (MIL-HDBK-83377, 1997):

✓proteger o substrato de contaminações ou alterações da superfície durante o período entre a preparação da superfície e a aplicação do adesivo;

✓ penetrar nas micro-rugosidades e porosidades, nivelando a superfície;

✓ dissolver pequenas quantidades de contaminações orgânicas;

Os primers são geralmente soluções diluídas dos adesivos que serão aplicados em solventes orgânicos, o que faz com que sua viscosidade seja muito menor que a dos polímeros adesivos (MENDES, 2005).

Os primers possibilitam a existência dos polímeros em regiões nas quais não conseguiriam penetrar devido à alta viscosidade, aumentando a energia de adesão. Assim, tem-se uma camada de menor espessura, mais maleável que possibilita melhor interação com o aderente, garantindo uma região de melhor contato (MENDES, 2005).

2.6 Esforços mecânicos em junta adesivadas

2.6.1 Clivagem

Clivagem, assim como o "*peeling*", é um esforço localizado, iniciado por falha microscópica, com posterior propagação. Existem três modos possíveis nestas casos conforme ilustrado na Figura 7, sendo estes: abertura (modo I), cisalhamento de acordo com o comprimento (modo II) e ruptura por cisalhamento de acordo com a amplitude do esforço (modo III) (VILLENAVE, 2005).

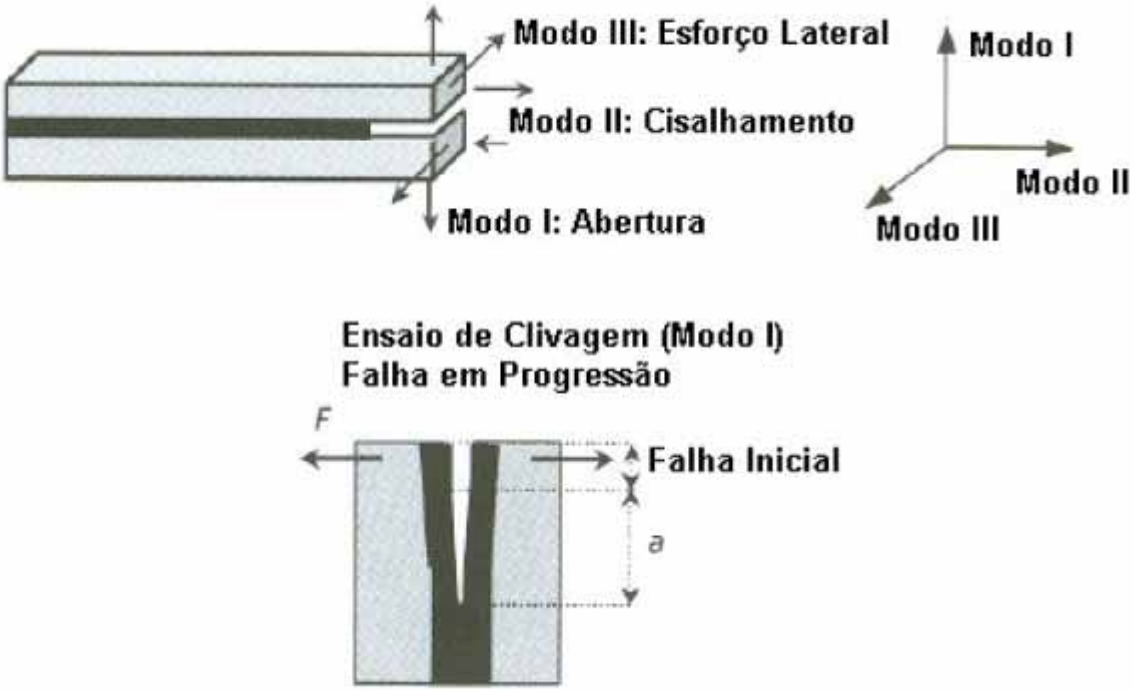

Figura 7 – Tipos de esforços de clivagem (TEIXEIRA, 2000)

2.6.2 Descascamento

O rompimento por descascamento (*peeling*) se inicia devido a falha em um dos substratos, dando continuidade ao processo de ruptura. Enquanto o esforço de clivagem é gerado com a utilização de substratos espessos e rígidos, o esforço de descascamento é

resultado da utilização de substratos flexíveis e de baixa espessura (SANTOS, 2007). Os diversos tipos de esforços por descascamento são ilustrados na Figura 8.

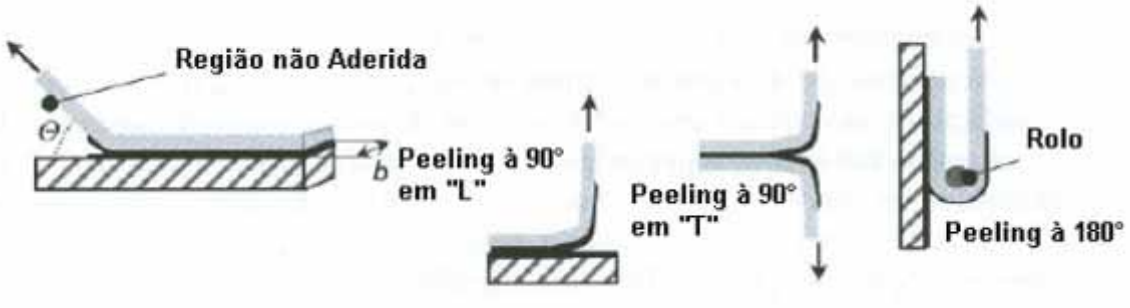

Figura 8 – Tipos de esforços de *peeling* (TEIXEIRA, 2000)

2.6.3 Tração

O ensaio de tração para a análise de resistência na região de junção, normalmente é realizado com a utilização de dois corpos de prova cilíndricos, por meio da união de suas faces perfeitamente polidas, onde um dos cilindros é tensionado enquanto o outro fica fixo na base do equipamento de tração. A finalização do ensaio se dá com a ruptura do filme de adesivo entre os corpos de prova (VILLENAVE, 2005). A Figura 9 ilustra a configuração de um ensaio de tração com esta finalidade.

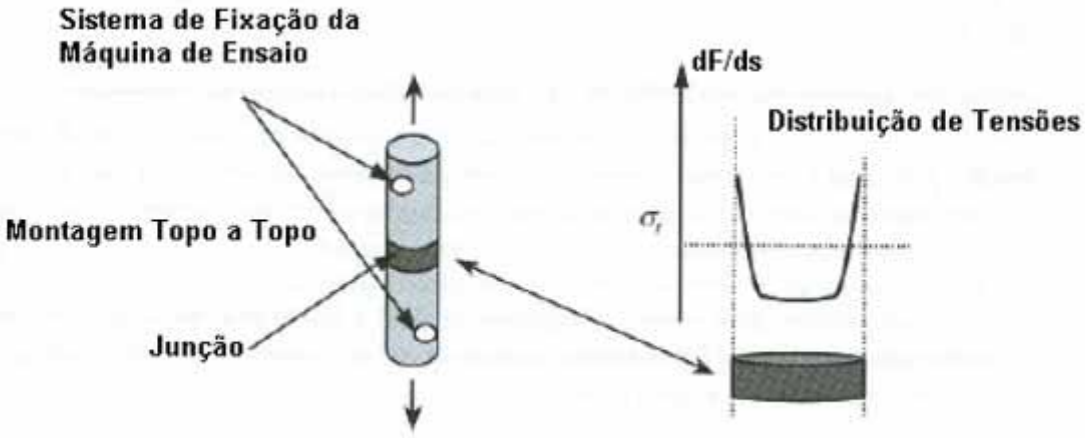

Figura 9 – Configuração do ensaio de tração (TEIXEIRA, 2000)

2.7 Aplicação do Suporte

Na indústria aeronáutica esse tipo de suporte pode ser utilizado em algumas configurações de montagem. Uma das aplicações é promover a sustentação da cablagem conforme ilustrado na Figura 10.

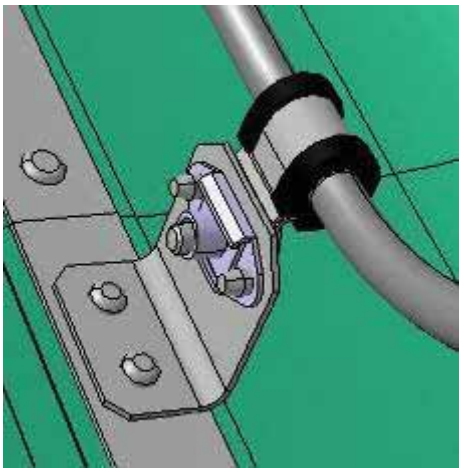

Figura 10 – Aplicação do suporte

3. Metodologia

3.1 Materiais e Matriz de Ensaio

Todos os corpos de prova analisados a partir deste trabalho foram obtidos a partir de um suporte de alumínio fabricado com a liga 6061-T6 (Figura 11), colado em um substrato fabricado a partir de uma chapa também de alumínio fabricado com a liga 2024-T3, onde a união se deu a partir da utilização do adesivo epoxy pastoso EA9394 fabricado pela empresa Henkel Corporation. A Tabela 2 apresenta os condicionamentos ambientais a que foram submetidos os corpos de prova antes de se realizar os ensaios mecânicos.

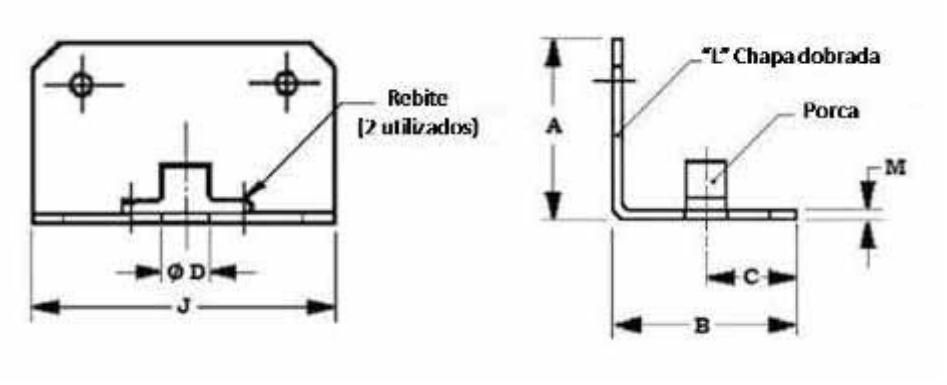

Figura 11 – Suporte PE29051-11 (Material padronizado, 2011)

Tabela 3 – Matriz de ensaio

Suporte	Tipo de Junção	Condicionamento	Tipo de Esforço
PE29051-11	Colado	Nenhum	Peel
PE29051-11	Colado	Combustível	Peel
PE29051-11	Colado	*Skydrol*	Peel
PE29051-11	Colado	Névoa salina	Peel
PE29051-11	Colado	Nenhum	Cisalhamento
PE29051-11	Rebitado	Nenhum	Peel
PE29051-11	Rebitado	Nenhum	Cisalhamento

3.2 Processo de Colagem

3.2.1 Material utilizado na colagem

Durante todas as fases do processo de colagem, foi necessário a utilização dos seguintes materiais:

✓Adesivo epóxi EA9394 bicomponente;

Figura 12 – Componentes do adesivo EA9394 a) Base do adesivo b) Catalisador

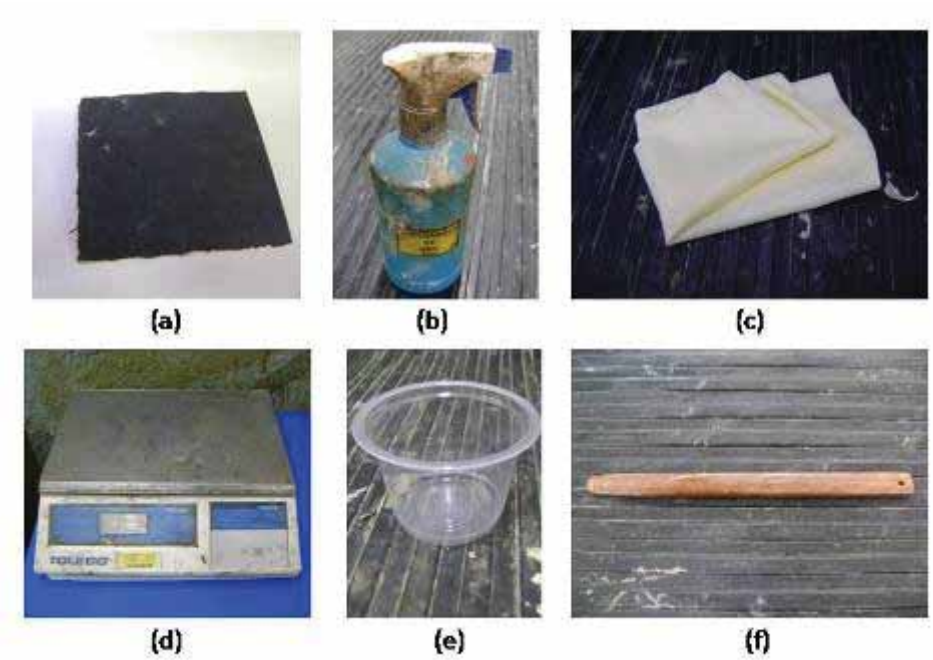

Figura 13 – Materiais utilizados a) Lixa d´água n° 180 b) Solvente rhodiasolve c) Pano limpo d) Balança e) Copo f) Espátula

3.2.2 Preparo da superfície

O procedimento de preparo superficial foi realizado de acordo com a norma NE40-218, a qual determina que as superfícies do substrato e do suporte sejam lixadas com lixa d´água n° 180, fazendo com que aumente a rugosidade e, consequentemente, melhore a ancoragem mecânica. A Figura 14 ilustra o efeito causado pelo lixamento das superfícies.

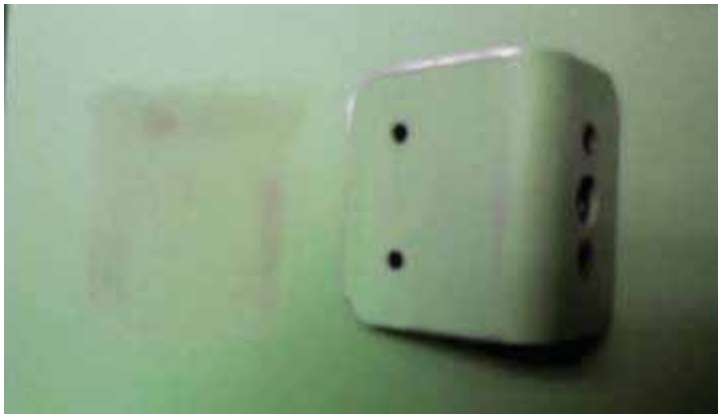

Figura 14 – Efeito do lixamento na superfície

Após a efetuação do lixamento, utilizou-se um pano limpo embebido no solvente Rodhiasolve para eliminar toda sujeira existente em ambas as superfícies. Para garantir a segurança, todo o processo foi realizado utilizando-se uma luva como forma de proteção para as mãos.

3.2.3 Preparo do adesivo

Para a obtenção dos corpos de prova a serem ensaiados utilizou-se um adesivo epóxi (EA9394) bicomponente fornecido pela empresa Henkel, com as seguintes características:

Tabela 4 – Características do adesivo EA9394 (Henkel, 2011)

Característica	Parte A	Parte B
Cor	Cinza	Preto
Viscosidade (a 25°C)	400-800 Pa.s	20-70 Pa.s
Densidade (g/ml)	1,5	1,0

Com a utilização de uma balança, do copo e da espátula (Figuras 13d, 13e e 13f) efetuou-se a mistura entre as duas partes que compõem o adesivo na seguinte proporção informada pelo fabricante:

Tabela 5 – Proporção de mistura e temperatura de trabalho do adesivo EA9394

Componente	Proporção em peso	Temperatura de trabalho
Parte A	100	-55 a 177 (°C)
Parte B	17	

Após a efetuação dessa mistura uniu-se efetivamente o suporte ao substrato resultando no corpo de prova ilustrado pela Figura 15.

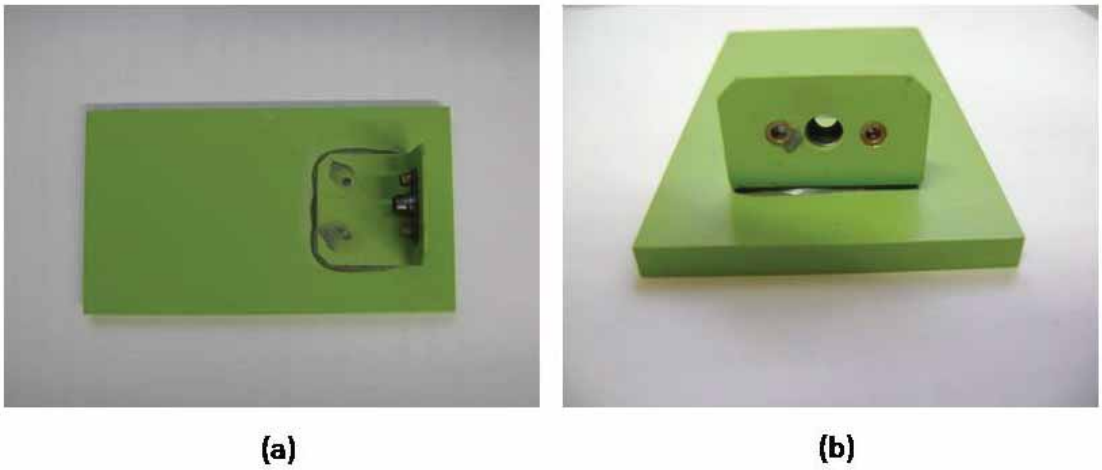

Figura 15 – Corpo de prova a) Vista superior b) Vista frontal

3.2.4 Cura do adesivo

O tempo e a temperatura são dois fatores que influenciam diretamente no processo de cura do adesivo. Para a cola utilizada o procedimento de cura ocorreu a temperatura de 25ºC por um período de 5 dias.

3.3 Condicionamento ambiental

3.3.1 Câmara de névoa salina

Alguns corpos de prova foram submetidos em câmara de névoa salina de acordo com a norma ASTM B117, ilustrada na Figura 16, cujas características são definidas na Tabela 5. Estes corpos de prova ficaram submetidos a este condicionamento por um período de 336 horas. A disposição dos mesmos na câmara pode ser visualizada na Figura 17.

Figura 16 – Câmara de névoa salina

Tabela 6 – Características da câmara de névoa salina

Marca	Modelo	Temperatura do ambiente interno
BASS	USC-ISO-PLUS-02/2010	35ºC

Figura 17 – Disposição dos corpos de prova na câmara de névoa salina

3.3.2 Imersão em combustível

O condicionamento de amostras em combustível foi realizado a partir da imersão destas no combustível JET A1 fornecido pela empresa Shell. Os corpos de prova ficaram imersos por um período de 27 dias (648 horas) e logo após a retirada foram colocados por um período de 48 horas numa estufa à 65ºC conforme norma DO-160E. A Figura 18 ilustra a maneira pela qual se deu o condicionamento e a Tabela 6 apresenta algumas características do combustível.

Figura 18 – Imersão no combustível

Tabela 7 – Propriedades físicas e químicas do combustível JET A1 (Shell, 1996)

Densidade	775-840 kg/m³ a 15°C
Pressão de vapor	<0,1 kPa a 40°C
Viscosidade cinemática	1-2 mm²/s a 40°C
Temperatura de auto-ignição	>220°C

3.3.3 Imersão em *Skydrol*

O *Skydrol* é um fluído hidráulico resistente a chama utilizado em aeronaves. De maneira semelhante ao processo de imersão no combustível JET A1, os corpos de prova ficaram imersos por um período de 21 dias (504 horas) no *Skydrol*. Após este período, as amostras

foram retiradas e colocadas em uma estufa à 65ºC por um período de 48 horas, conforme descrito pela norma DO-160E. A Figura 19 ilustra como ocorreu o condicionamento.

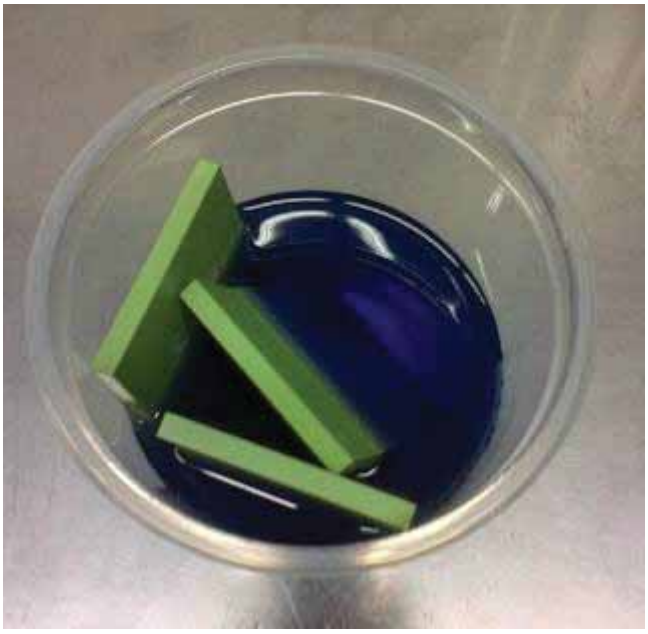

Figura 19 – Imersão no *Skydrol*

3.4 Ensaios Mecânicos

Devido às dificuldades encontradas para efetuar a fixação do corpo de prova na máquina de tração e de se realizar o ensaio foi necessário o desenvolvimento de um dispositivo para auxilar nessa fixação. A Figura 20 ilustra como foi utilizado esse dispositivo e a Tabela 7 evidencia as características da máquina universal de ensaio utilizada.

Figura 20 – Ensaios mecânicos: a) máquina universal de ensaio; b) dispositivo de ensaio

Tabela 8 – Características da máquina universal de ensaios mecânicos

Marca	Modelo	Capacidade (Tração e Compressão)
EMIC	DL3000	30 kN

3.4.1 Ensaio de Descascamento

O ensaio de descascamento ocorreu de acordo com o Mil Handbook e foi realizado da seguinte maneira: utilizou-se o dispositivo de ensaio para prender o corpo de prova na base da máquina e com o auxílio de uma garra promoveu-se uma carga para descolar o suporte do substrato como ilustra a Figura 21.

Figura 21 – Fixação do corpo de prova para ensaio de descascamento

Após a realização deste ensaio, era esperado que a separação das partes constituintes do sistema fosse na região do adesivo. No entanto, durante o desenvolvimento do ensaio constatou-se que o rompimento aconteceu, em praticamente todos os casos e independentemente do tipo de condicionamento ambiental utilizado, na região do Primer aplicado durante a confecção do suporte como está representado na Figura 22.

Figura 22 – Região de rompimento do corpo de prova após ensaio de descascamento

3.4.2 Ensaio de Cisalhamento

O ensaio de cisalhamento foi procedido de acordo com o Mil Handbook de tal maneira que o corpo de prova foi fixado na base inferior da máquina de tração utilizando-se uma garra e com o auxílio de um cabo de aço promoveu-se uma carga para separar o suporte do substrato. A Figura 23 ilustra como foi feita a fixação e a Figura 24 apresenta o corpo de prova após a ruptura, que também ocorreu de forma inesperada na região do Primer.

Figura 23 – Fixação do corpo de prova para ensaio de cisalhamento

Figura 24 – Região de rompimento do corpo de prova após ensaio de cisalhamento

3.5 Influência do preparo da superfície

A expectativa deste trabalho era de que o rompimento dos corpos de prova ocorresse, tanto para o ensaio de descascamento quanto para o ensaio de cisalhamento, na região do adesivo utilizado para fazer a união do suporte ao substrato. No entanto, assim como pode ser observado nas Figuras 22 e 24 ocorreu o rompimento entre o primer e o suporte de alumínio, não sendo possível, desta maneira, analisar o comportamento do adesivo propriamente dito quando submetido a ensaios mecânicos.

No intuito de propiciar uma variável de comparação, decidiu-se promover uma nova colagem efetuando, desta vez, a remoção total do Primer através do lixamento das superfícies conforme ilustra a Figura 25, e submetê-la aos mesmos ensaios mecânicos (descascamento e cisalhamento). Para essa nova colagem foram utilizandos os mesmos materiais anteriormente descritos.

O procedimento utilizado para a nova colagem também se sucedeu de maneira semelhante ao já descrito anteriormente neste trabalho. A única diferença em relação a colagem anterior ficou por conta do processo de cura do adesivo, que nessa situação ocorreu de maneira acelerada, colocando-se o material em uma estufa a 66ºC por um período de 2 horas conforme informações do fornecedor. Esses novos corpos de prova foram submetidos aos condicionamentos em *Skydrol* e Combustível.

Figura 25 - Remoção total do Primer

4. Resultados e Discussões

4.1 Análise da redução de peso

Umas das propostas da realização deste trabalho consiste na constatação da redução de peso devido a substituição do método de fixação atual – uso de rebites – por uma metodologia alternativa que propõe a colagem dos suportes de cablagem na estrutura da aeronave. No entanto, pesou-se uma amostragem e, assim como ilustra a Tabela 8, essa redução não se mostrou significativa conforme as expectativas levantadas no início desse trabalho.

Tabela 9 – Análise do Peso.

Tipo de fixação	Peso (g)			
Rebitado	CDP1	CDP2	CDP3	Total
R1	65,92	65,88	65,78	592,85
R3	65,93	65,87	65,85	
R4	65,92	65,75	65,95	
Colado	CDP1	CDP2	CDP3	Total
SG1	65,61	65,65	65,89	591,39
SG9	65,83	65,53	65,67	
SG10	65,90	65,51	65,80	

A partir da análise dos dados apresentados na Tabela 8, observou-se uma variação de apenas 0,25% entre as amostras consideradas. Estimando-se que em uma aeronave de médio porte são utilizados em média 7000 suportes pode-se calcular uma redução de aproximadamente 1 kg no avião como um todo, quando os sistemas tradicionais são substituídos pelo material analisado neste trabalho.

No entanto, o ganho na utilização de colagem pode ser constatado nas situações em que a necessidade de aplicação de um suporte surge no decorrer do desenvolvimento de um projeto. Neste tipo de situação as peças da estrutura primária, onde normalmente são fixados esses suportes, foram projetadas sem ser considerado a efetuação de furos, os quais seriam necessários caso a fixação fosse realizada utilizando-se rebites. A presença destes furos causam a diminuição da resistência considerada para a estrutura, assim como podem

ocasionar o início da propagação de trincas e rachaduras o que comprometem ainda mais a resistência de uma estrutura possibilitando a ocorrência de falhas e delaminações.

4.2 Resultados obtidos

Finalmente após a realização de todos os ensaios obteve-se as Tabelas 9 e 10 que expressam a média dos valores para a carga de ruptura na forma de perda ou ganho percentual de carga considerando como 100% a média dos ensaios de descascamento realizados nos corpos de prova sem nenhum tipo de condicionamento e colados após remoção total do primer.

Tabela 10 – Resultados dos Ensaios de Descascamento

Tipo de fixação	Condicionamento	Variação da carga de Ruptura (%)	
		Sem Primer	Com Primer
Colado	Nenhum	100	101
Colado	Combustível	117	121
Colado	*Skydrol*	127	134
Colado	Névoa salina	-	86
Rebitado	Nenhum	-	421

Tabela 11 – Resultados dos Ensaios de Cisalhamento

Tipo de fixação	Condicionamento	Variação da carga de Ruptura (%)	
		Sem Primer	Com Primer
Colado	Nenhum	115	214
Rebitado	Nenhum	-	280

4.3 Análise das cargas de ruptura

A Tabela 11 e a Figura 26 apresentam os resultados obtidos, a partir dos ensaios de descascamento, quanto a variação da carga de ruptura para amostras não condicionadas e condicionadas em diferentes meios.

Tabela 12 – Comparação – Com Primer *versus* Sem Primer

Condicionamento	Sem Primer		Com Primer	
	Variação da carga (%)	Desvio Padrão (%)	Variação da carga (%)	Desvio Padrão (%)
Nenhum	100	13	101	29
Combustível	117	30	134	29
Skydrol	127	34	121	27

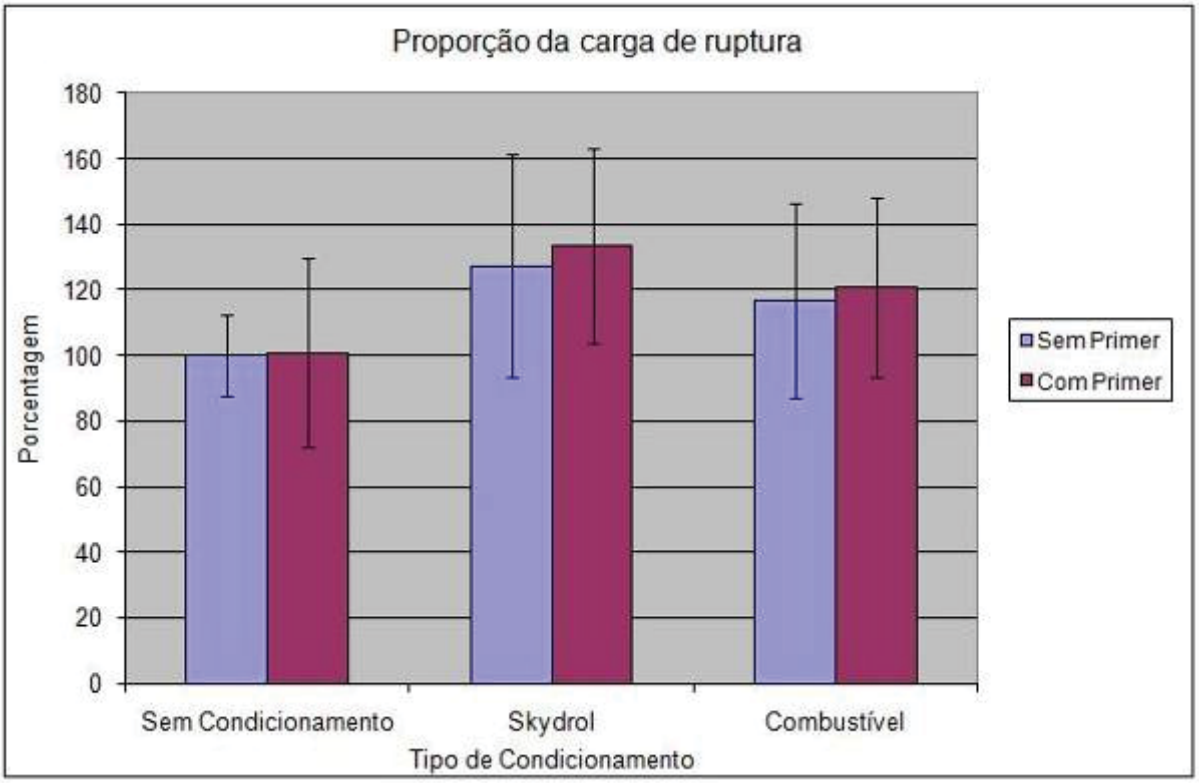

Figura 26 – Gráfico de Comparação – Sem Primer *versus* Com Primer.

A partir dos resultados encontrados foi observado que a carga de ruptura para ambas as situações de colagem apresentaram valores similares e que, apesar da grande dispersão destes resultados, há uma tendência de obtenção de valores mais elevados nos corpos de prova ensaiados após passarem por etapas de condicionamento no combustível ou no *Skydrol* com posterior acomodação em estufa com temperatura controlada de 65°C. Tal situação pode indicar que estes fluídos quando associados a temperaturas mais elevadas devem ter

contribuído para aumentar o grau de cura e/ou adesão do material, proporcinando um aumento da rigidez.

Ainda a partir dos resultados encontrados para esta caracterização é possível observar utilizando-se das Figuras 27 e 28 a ocorrência de falha adesiva tanto no primer do suporte quanto entre o adesivo e o metal com variações de carga de ruptura similares, sendo estas respectivamente, 100% e 101%.

Figura 27 – Falha adesiva no Primer do suporte: a) Substrato; b) Suporte

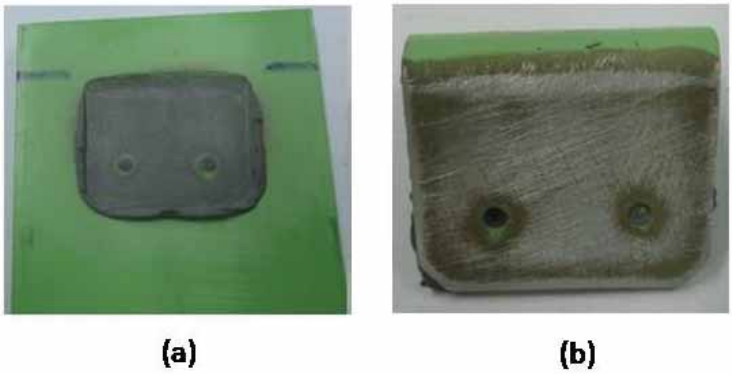

Figura 28 – Falha adesiva entre o adesivo e o metal: a) Substrato; b) Suporte

A análise dos valores individuais para carga de ruptura dos corpos de prova colados sem o Primer e que passaram por condicionamento em *Skydrol* possibilitou a conclusão de que as falhas ocorridas de maneira coesiva possuem valores superiores às falhas adesivas. A Tabela 12 apresenta essas cargas e as Figuras 29 e 30 ilustram o modo de falha dos materiais.

Tabela 13 – Variação da carga de ruptura após o condicionamento em *Skydrol*

Identificação dos corpos de prova	Variação da carga de ruptura (%)
Sky-1	126
Sky-2	81
Sky-3	143
Sky-4	160

Figura 29 – Ocorrência de falha Adesiva.

Figura 30 – Ocorrência de falha Coesiva.

Nas situações comparativas entre os métodos de fixação – colado e rebitado – observa-se que a carga suportada pelos corpos de prova rebitados foi mais de 4 vezes a carga dos colados se considerarmos o mesmo tipo de esforço solicitante, nesse caso o descascamento. A Figura 31 apresenta uma configuração rebitada após o ensaio de descascamento e a ocorrência da falha.

Tabela 14 – Comparação – Colado *versus* Rebitado

Tipo de esforço	Condicionamento	Variação da carga de Ruptura (%)	
		Colado	Rebitado
Descascamento	Nenhum	101	421

Figura 31 – Configuração rebitada após falha.

4.4 Cisalhamento *versus* Descascamento

A comparação entre os tipos de esforços solicitantes nos permite dizer que a carga de ruptura para o modo cisalhante é superior a carga necessária para promover o descascamento quando analisados os dados obtidos para o os corpos de prova colados com o Primer. A Tabela 14 apresenta esses dados.

Tabela 15 – Comparação – Cisalhamento *versus* Descascamento

Tipo de fixação	Condicionamento	Variação carga de Ruptura (%)	
		Cisalhamento	Descascamento
Colado	Nenhum	214	101

Já nas situações rebitadas não é possível efetuar essa análise comparativa, pois os mecanismos de falha obtido para os esforços de cisalhamento ocorreram no metal do suporte e não no rebite como era esperado. A Figura 32 ilustra como se deu essa falha, evidenciando que ocorreu a deformação do suporte de alumínio quando esperava-se o rompimento do rebite após a aplicação do esforço mecânico.

Figura 32 – Modo de falha sob esforço de cisalhamento do corpo de prova rebitado.

5. Conclusão

Baseado nos resultados obtidos a partir desse trabalho foi possível formular as seguintes conclusões:

1. O procedimento de preparação da superfície dos materiais é extremamente importante para garantir que os esforços solicitantes sejam transmitidos efetivamente ao adesivo num processo de colagem, garantindo uma boa adesão e possibilitando a realização de estudos no que se refere ao comportamento do mesmo perante formas distintas de aplicação das cargas.
2. O método de fixação a partir da utilização de rebites suporta cargas consideravelmente maiores do que as configurações coladas. Porém, para aplicação de baixa carga, como é o caso dos suportes utilizados para sustentar cablagem em aeronaves, os valores podem ser considerados aceitáveis e satisfazem os requisitos exigidos para o dimensionamento estrutural desse tipo de configuração.
3. A influência dos condicionamentos ambientais não pode ser analisada de maneira conclusiva, pois os resultados dos ensaios mecânicos apresentaram grande dispersão.

6. Sugestões de Trabalhos Futuros

- Influência da exposição em elevados ciclos de variação súbita de temperatura no comportamento de juntas adesivadas submetidas a ensaios mecânicos.

- Influência da umidade na degradação do adesivo utilizado para fazer a junção de componentes metálicos.

- Comportamento do adesivo na junção de um componente metálico colado em um substrato de compósito.

7. Referências

A VESELOVSKY, Roman; KESTELMAN, Vladimir N.. **Adhesion of Polymers.** New York: Mcgraw-hill, 2002, 404p.

BERRY, Nara G.; D´ALMEIDA, José Roberto M.. Efeito da presença de defeitos no comportamento mecânico de juntas coladas carbono-epoxi. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 3, p.138-148, 2000.

COSTA, M. L. **Efeito do conteúdo de vazios no comportamento mecânico de compósitos avançados carbono/epoxi e carbono/bismaleimida**. 2002. 175 f. Tese (Doutorado), Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2002.

DAMATO, Cesar Agusto. **Efeito do condicionamento ambiental nas propriedades de cisalhamento viscoelásticas de compósitos híbridos metal-fibra.** 2010. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

FARIA, M. C. M. **Avaliação do efeito higrotérmico nas propriedades mecânicas de compósitos de PPS/Fibras continuas.** 2008. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG), Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, 2008.

FLICK, Ernest W.. **Handbook of Adhesives Raw Materials.** 2nd New Jersey: Noyes Publications, 1989. 520 p.

FLICK, Ernest W.. **ADHESIVES, SEALANTS AND COATINGS FOR THE ELECTRONICS INDUSTRY.** 2nd New Jersey: Noyes Publications, 1992. 989 p.

GATTI, M. C. A. **Tenacidade a fratura translaminar dinâmica de um laminado híbrido metal-fibra titânio-grafite de grau aeronáutico.** 2009. 111 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2009.

HENAFF-GARDIN, C.; LAFARIE-FRENOT, M. C. Specifity of matrix cracking development in CFRP laminates under mechanical or thermal loadings. **International Journal of Fatigue,** vol. 24, p. 171-177, 2002.

HIGGINS, A.. Adhesive bonding of aircraft structures. **International Journal Of Adhesion And Adhesives,** Woodford, p. 367-376. 26 jan. 2000.

MAZUR, Rogério Lago. **Obtenção e caracterização de compósitos de fibra de carbono/PEKK com aplicações aeronáuticas.** 2010. 142 f. Dissertação (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

MAYER, S. **Influência do Condicionamento Ambiental na Resistência a Tração de Laminados de Compósitos Poliméricos Reparados.** 2003. 218 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2003.

MENDES, Carlos Ney Rocha Pessoa. **Contribuição ao desenvolvimento de projeto de carrocerias automotivas utilizando adesivo estrutural para junção de chapas metálicas.** 2005. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MONTEIRO, D. F., **Análise do Comportamento à Fratura de Juntas Efetuadas com Adesivos Estruturais.** 1995. Dissetarção (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1995.

PETRIE, Edward M.. **Handbook of Adhesives and Sealants.** 1st New York: Mcgraw-hill, 2000. 871 p.

REZENDE, Mirabel Cerqueira; COSTA, Michelle Leali; BOTELHO, Edson Cocchieri. **Compósitos Estruturais: tecnologia e prática.** São Paulo: Artliber, 2011. 396 p.

ROBINSON, M. J.; CHARETTE, R. O.; LEONARD, B. G. Advanced Composite Structures for Launch Vehicles, Sampe Quarterly, p 26 - 37, 1991.

SANTOS, Demetrio Jackson Dos. **Estudo Experimental da Resistência Mecânica de Junções Adesivas.** 2007. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SKEIST, Irving. **Handbook of Adhesives**, 2nd New York: Van Nostrand Reinhold, 1977.

"Standard Terminology of Adhesives", D 907, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.

TEIXEIRA, Luís Manuel Barbosa Santos. **Caracterização do comportamento mecânico de juntas de sobreposição simples coladas com adesivos estruturais.** 2000. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2000.

TOMBLIN, Charles Yang And John S.. **Investigation of Adhesive Behavior in Aircraft Applications.** Washington: U.s. Department Of Transportation Federal Aviation Administration, 2001.

VILLENAVE, J. **Assemblage par collage.** Paris: Editora Artiliber. 2005. 319 p.

WEGMAN, Raymond F.; TULLOS, Thomas R.. **Handbook of adhesive bonded structural repair.** New Jersey: Noyes Publications, 2005.