

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO - MESTRADO PROFISSIONAL

Rafael Koppe

AVALIAÇÃO DO EFEITO PROVOCADO PELA PRESENÇA DE
FUROS EM UNIÕES METÁLICAS COM ADESIVO ACRÍLICO

Passo Fundo
2014.

Rafael Koppe

AVALIAÇÃO DO EFEITO PROVOCADO PELA
PRESENÇA DE FUROS EM UNIÕES METÁLICAS COM
ADESIVO ACRÍLICO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação sob a orientação do Prof. Dr. Charles Leonardo Israel.

Passo Fundo

2014

Rafael Koppe

**Avaliação do efeito provocado pela presença de furos em uniões metálicas com adesivo
acrílico**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação sob a orientação do Prof. Dr. Charles Leonardo Israel.

Aprovada em 29 de setembro 2014.

Os componentes da banca examinadora abaixo aprovam a dissertação:

Prof. Dr. Charles Leonardo Israel

Orientador

Dr. Paulo Henrique Sanchez Cardoso

Fundação Universidade do Rio Grande - FURG

Dr. Alexandre Pitol Boeira

Instituto Federal Sul-Rio-Grandense IFSul / PF

Dr. Vagner Alves Guimarães

Universidade de Passo Fundo - UPF

*Dedico este trabalho às minhas três famílias:
a de origem, a constituída e a formada por amigos.
Em especial a minha esposa pelo imenso apoio.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de registrar meus sinceros agradecimentos àqueles que tiveram participação no desenvolvimento deste trabalho.

Ao orientador Prof. Dr. Charles Leonardo Israel, Coordenador do Mestrado Profissional em Projeto e Processos de Fabricação pela orientação e grande apoio para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos Professores do Instituto Federal Sul Rio Grandense (Ifsul), Campus Passo Fundo - RS, pelas sugestões e contribuições.

À banca examinadora deste trabalho pelas considerações, discussões e sugestões.

Aos meus pais, Varno e Edi, pelo constante apoio e exemplo de vida.

Aos meus irmãos Ezequiel e Ângela pelo apoio e dedicação do seu tempo contribuindo para este projeto.

Em especial a minha esposa Aline, por estar sempre ao meu lado, me apoiar e contribuir para a realização deste projeto.

RESUMO

Diversos trabalhos já foram publicados apresentando estudos que consideram a influência das condições geométricas na resistência de uniões adesivadas. Os diferentes processos de preparação, também denominados de tratamento de superfície, provocam um acréscimo considerável na resistência mecânica de juntas adesivadas. Entre eles pode-se destacar o ataque químico e o jateamento abrasivo. Nas últimas décadas, os cuidados com a saúde ocupacional nos ambientes fabris têm aumentado, o que provocou a proibição de um dos processos de preparação de superfície mais eficientes, o jateamento abrasivo. Outro processo de preparação de superfície que vem recebendo crítica das indústrias é o tratamento químico envolvendo ácidos altamente tóxicos, pois coloca em risco a saúde de seus colaboradores e o meio ambiente. Surge, então, a necessidade de estudos e de processos que possam substituir os processos anteriormente citados.

Este trabalho apresenta um estudo sobre a inserção de furos na região de sobreposição de juntas adesivadas de sobreposição simples como uma alternativa aos processos convencionais de preparação de superfície visando ao aumento da resistência mecânica por meio do aumento da ancoragem. O presente estudo avalia a resistência mecânica ao carregamento estático por meio de ensaio de tração e avalia a resistência ao carregamento dinâmico por meio de ensaio de fadiga e da construção das curvas de Wöhler para os respectivos tratamentos. Por meio deste estudo, foi possível concluir que, na condição de carregamento estático, a inserção de furos não é uma alternativa eficiente, e é prejudicial em alguns casos. Já, para o carregamento dinâmico, o estudo detectou uma ligeira melhora no desempenho de juntas com furos na região sobreposta.

Palavras-chave: Uniões adesivadas. Adesivo estrutural. União de materiais. Planejamento fatorial.

ABSTRACT

This paper presents a study of the insertion of holes in the overlap area of bonded joints as an alternative to the conventional methods of surface preparation in order to increase the mechanical strength by increasing the anchorage on the bond process. This study evaluated the mechanical strength to static loading by a factorial experiment, and for the evaluation of the resistance to dynamic load, a Wöhler's curves was made for the respective treatments. Through this study we concluded that with the static loading condition, the insertion of holes is not an effective alternative and in some cases it may be harmful. The dynamic loading study detected a slight improvement in performance by the specimen with holes in the overlapping region.

Keywords: Adhesive joints. Single lap joints. Acrylic adhesives. Factorial design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geometria de juntas adesivadas.	19
Figura 2 – Tipos de esforços em juntas adesivadas: a) Clivagem; b) Tração; c) Corte.	19
Figura 3 – Representação esquemática dos modos de ruptura em juntas coladas de sobreposição.	20
Figura 4 – Distribuição de tensão em uniões rebitada e colada.	21
Figura 5 – Resistência ao cisalhamento em função da temperatura de dois adesivos acrílicos.	22
Figura 6 – O desequilíbrio das forças de atração à superfície de um líquido dá lugar à tensão de superfície e à energia de superfície.	27
Figura 7 – Tensão de superfície atuando em uma gota de líquido sobre um sólido.	28
Figura 8 – Curva de Zisman para determinação da tensão de superfície crítica.	29
Figura 9 – Ancoragem mecânica.	31
Figura 10 – Molhamento da superfície pelo adesivo.	32
Figura 11 – Ângulo de contato de um adesivo epóxi em quatro diferentes substratos com diferentes energias de superfície.	32
Figura 12 – Adesão por reação.	33
Figura 13 – Ligação entre adesivo aderente de uma junta metálica.	35
Figura 14 – Possíveis camadas superficiais em metais.	35
Figura 15 – Resistência mecânica ao cisalhamento de juntas adesivadas com quatro adesivos epóxi e quatro diferentes tratamentos de superfície.	36
Figura 16 – Tratamento de superfície alternativo sugerido por Ferreira et al. (2010).	38
Figura 17 – Variação da resistência mecânica da junta adesivada ao cisalhamento em função da espessura da camada de adesivo.	39
Figura 18 – Resistência ao cisalhamento de juntas de sobreposição simples em função do comprimento de sobreposição.	40
Figura 19 – Relação entre a força de ruptura e a geometria da junta.	40
Figura 20 – Distorção em junta de sobreposição simples sujeita a esforços de tração.	41
Figura 21 – Variação da resistência à fratura em função da rugosidade.	41
Figura 22 – Geometria do corpo de prova para ensaio de tração de junta adesivada de sobreposição simples conforme ASTM D 1002-01.	46

Figura 23 – Geometria dos substratos na região adesivada.	48
Figura 24 – Corte por jato de água.	49
Figura 25 – Rugosímetro TR200.	50
Figura 26 – Dispositivo para confecção de juntas adesivadas de sobreposição simples aberto.	51
Figura 27 – Dispositivo para confecção de juntas adesivadas de sobreposição simples fichado.	52
Figura 28 – Calços para redução da distorção.	53
Figura 29 – Equipamento de ensaio de tração EMIC DL 3000.	54
Figura 30 – Corpo de prova para ensaio de fadiga segundo ASTM D3166-99.	55
Figura 31 – Descrição da região de sobreposição das juntas submetidas ao ensaio de fadiga.	56
Figura 32 – Equipamento Shimadzu utilizados na realização dos ensaios dinâmicos.	58
Figura 33 – Fratura do corpo de prova SSF-3.	61
Figura 34– Corpo de prova SF-25,4-5, falha do tipo mista entre falha coesiva do adesivo e falha coesiva do substrato.	63
Figura 35 – Falha do tipo coesiva do substrato no corpo de 2F-25,4-5.	63
Figura 36 – Falha coesiva do alumínio.	65
Figura 37 – Probabilidade normal dos resíduos.	68
Figura 38 – Distribuição do resíduo ao longo dos ensaios.	68
Figura 39 – Fractografia de um copolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) submetido ao ensaio Charpy.	69
Figura 40 – Representação gráfica de propagação da falha como modelo de pluma.	70
Figura 41 – Corpo de prova 2F-25,4-5 submetido ao ensaio de tração.	70
Figura 42 – Região relativamente lisa onde a fratura teve seu início.	71
Figura 43 – Formação e coalescimento de microcavidades na fratura de polímeros submetidos a carga de cisalhamento.	72
Figura 44 – Falha interlaminar por cisalhamento, cristas de galo na superfície da fratura.	72
Figura 45 – Região rugosa da fratura do corpo de prova 2F-25,4-5.	73
Figura 46 – Ensaio de tração para determinação da carga a ser aplicada no ensaio de fadiga.	75
Figura 47 – Forças utilizadas nos ensaios de fadiga.	75
Figura 48 – Curva S-N para corpos de prova sem furos na região de sobreposição.	76
Figura 49 – Curva S-N para corpos de prova com dois furos na região de sobreposição.	77

Figura 50 – Fratura nos corpos de prova submetidos ao ensaio de fadiga.	78
Figura 51-A – Ensaio de tração realizados em corpos de prova com 25,4mm de comprimento de sobreposição e três diferentes tratamentos de superfície	84
Figura 52-A – Ensaio de tração realizados em corpos de prova com 38,1mm de comprimento de sobreposição e três diferentes tratamentos de superfície.	85
Figura 53-A – Ensaio de tração realizados em corpos de prova com 50,8mm de comprimento de sobreposição sem furos e 50,8mm de comprimento de sobreposição e dois furos.	86
Figura 54-A – Ensaio de tração realizados em corpos de prova com 50,8mm de comprimento de sobreposição e quatro furos.	87
Figura 55-A – Ensaio de tração realizados para caracterização dos substratos de aço.....	88
Figura 56-A – Ensaio de tração realizados para caracterização dos substratos de alumínio. .	88
Figura 57-A – Ensaio de tração realizados para determinação das cargas a serem aplicadas nos ensaios de fadiga.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Desenvolvimento cronológico dos adesivos.....	18
Tabela 2 – Resistência ao cisalhamento e ao descasque.	22
Tabela 3 – Características dos adesivos acrílicos modificados (Silva et al., 2007).	24
Tabela 4 – Influência do tratamento superficial na resistência da junta adesivada estrutural com diferentes adesivos acrílicos.	37
Tabela 5 – Propriedades típicas do adesivo Lord Maxloc® T18	44
Tabela 6 – Composição química do substrato de aço.....	44
Tabela 7 – Propriedade mecânicas do substrato de aço.....	45
Tabela 8 – Composição química do substrato de alumínio.	45
Tabela 9 – Propriedade mecânicas do substrato de Alumínio.....	45
Tabela 10 – Rugosidade Ra (μm) dos substratos.	50
Tabela 11 – Espessura da camada adesiva dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração.	53
Tabela 12 – Estatística da rugosidade dos corpos de prova submetidos ao ensaio de fadiga. .	57
Tabela 13 – Espessura da camada adesiva dos corpos de prova submetidos ao ensaio de fadiga.	58
Tabela 14 – Resultado dos ensaios de tração realizados para determinar o número de réplicas.	61
Tabela 15 – Resultado dos ensaios de tração dos corpos de prova que possuíam 25,4mm de comprimento de sobreposição.	62
Tabela 15 – Resultado dos ensaios de tração dos corpos de prova que possuíam 38,1mm de comprimento de sobreposição.	64
Tabela 16 – Resultado dos ensaios de tração dos corpos de prova que possuíam 50,8mm de comprimento de sobreposição.	65
Tabela 17 – Resultados do experimento fatorial.	66
Tabela 19 – Dados da rugosidade dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração para determinação do carregamento do ensaio de fadiga.....	74
Tabela 20 – Espessuras da camada adesiva dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração para determinação do carregamento do ensaio de fadiga.	74
Tabela 21-A – Dados dos corpos de prova com 25,4mm de comprimento de sobreposição submetidos ao ensaio de tração.	90

Tabela 22-A – Dados dos corpos de prova com 38,1mm de comprimento de sobreposição submetidos ao ensaio de tração.	91
Tabela 23-A – Dados dos corpos de prova com 50,8mm de comprimento de sobreposição submetidos ao ensaio de tração.	92
Tabela 24-A – Dados dos corpos de prova com 9,5mm de comprimento de sobreposição submetidos ao ensaio de tração.	93

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Identificação do problema.....	14
1.2	Objetivos e metas.....	15
1.3	Justificativa.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Uniões adesivadas.....	17
2.1.1	Vantagens.....	20
2.1.2	Desvantagens	21
2.2	Adesivos.....	23
2.3	Adesivos acrílicos	24
2.4	Teoria da adesão.....	24
2.4.1	Forças de adesão e coesão.....	25
2.4.2	Energia de superfície.....	26
2.4.3	Tensão de superfície.....	27
2.4.4	Equação de Thomas Young.....	28
2.4.5	Tensão de superfície crítica	29
2.4.6	Coefficiente de espalhamento	30
2.4.7	Teoria de adesão mecânica	30
2.4.8	Teoria da adsorção.....	31
2.4.9	Teoria da camada fraca (Weak boundary layer).....	33
2.5	Fatores que influenciam resistência de uma junta adesivada.....	34
2.5.1	Preparação de superfície	34
2.5.2	Fatores geométricos	38
2.5.3	Fatores térmicos	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	O adesivo.....	43
3.2	Os substratos	44
3.2.1	O substrato de aço.....	44
3.2.2	O substrato de alumínio	45
3.3	Método estático.....	45
3.3.1	Geometria do substrato	47
3.3.2	O planejamento do experimento.....	48

3.3.3	Confeção dos corpos de prova.....	49
3.3.4	Ensaio de tração.....	53
3.4	Método dinâmico.....	54
4	RESULTADOS.....	60
4.1	Resultados e discussões da análise estática	60
4.2	Análise estatística	65
4.3	Resultados e discussões da análise dinâmica.	73
5	CONCLUSÃO	79
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	80
7	BIBLIOGRAFIA.....	81
8	APÊNDICE A	84

1 INTRODUÇÃO

1.1 Identificação do problema

A incessante busca por produtos mais eficientes e com preços competitivos tem levado engenheiros a usar ao máximo o potencial das propriedades mecânicas de cada material. Isso tem-se dado, por exemplo, com a baixa densidade do alumínio e suas ligas, o elevado limite de escoamento dos aços de alta resistência e a boa relação peso/resistência dos compósitos poliméricos. Unir esses materiais entre si ou com outros de forma barata, eficiente, rápida e segura tem sido um desafio para a indústria. Segundo Marchezin et al. (2012), que desenvolveram seu estudo envolvendo juntas adesivadas aplicadas a aeronaves, as juntas são a fonte mais comum de falhas estruturais e quase todos os reparos envolvem juntas.

As uniões por meio de adesivos vêm ganhando espaço nesse cenário, mostrando-se eficientes e capazes de atender às novas exigências. Surge, então, a necessidade de aprofundar os conhecimentos nesse processo de fabricação.

Entre as configurações de uniões adesivadas, a união de sobreposição simples é a mais estudada pela comunidade científica e, segundo Sun et al. (2013), suas propriedades mecânicas são caracterizadas pela determinação da resistência da junta a esforços de cisalhamento, clivagem e tração. A configuração de sobreposição simples é bastante investigada pelo fato de que, em muitas aplicações, as juntas adesivadas estão em condições de sobreposição. Estudos como os realizados por Ferreira et al. (2010), comprovam que, para a confecção de uma junta adesivada com qualidade, faz-se necessário o processo de preparação das partes a serem unidas com adesivo.

Processos de preparação, também denominados de tratamento de superfície, provocam um acréscimo considerável na resistência mecânica de juntas adesivadas, dentre os quais se pode destacar o ataque químico e o jateamento abrasivo.

O uso de produtos químicos como ácido sulfúrico, comumente empregado na preparação de superfícies, traz inúmeros problemas, tais como risco à saúde de quem os manuseia e riscos ambientais. Quanto aos processos de jateamento abrasivo, a Portaria n. 99, de 19 de outubro de 2004, da Secretaria de Inspeção do Trabalho e da Diretoria do Departamento de Segurança e Saúde no Trabalho, do Ministério do Trabalho e Emprego, proíbe, em todo o território nacional, o uso de sistemas de jateamento de areia a seco ou

úmida para limpeza e reparo, tendo em vista a degradação do ambiente e os riscos à saúde dos trabalhadores.

O uso de diferentes materiais e parâmetros geométricos que têm o intuito de aumentar a ancoragem mecânica, reduzir os esforços de descascamento e os pontos de concentração de tensão de cisalhamento que ocorrem em junta de sobreposição simples é amplamente abordado pela literatura.

1.2Objetivos e metas

O presente trabalho visa a determinar as mudanças no comportamento estático (por meio de ensaio de tração) e dinâmico (por meio de ensaio de fadiga) de juntas adesivadas de sobreposição simples (alumínio ao aço), provocado pela presença de furos na região de sobreposição. As juntas foram confeccionadas com adesivo estrutural acrílico, e tiveram diferentes comprimentos de sobreposição.

Nos substratos, foram feitos furos em diferentes posições da junta com o intuito de avaliar se o aumento na ancoragem mecânica, ocasionada pela presença do furo em diferentes posições da junta, se sobrepõe ou não ao efeito de concentração de tensão originado pela presença deste.

A determinação das propriedades mecânicas foi feita por meio de ensaios de tração e de fadiga. Com isso, o presente trabalho pretende cooperar com o desenvolvimento de aplicações de adesivos na indústria, com a geração de conhecimento sobre o assunto, e servir de amparo para o desenvolvimento de projetos que envolvam uniões adesivadas.

1.3Justificativa

O uso de uniões adesivadas vem alcançando grandes resultados na indústria, pois distribui mais uniformemente as tensões, absorve melhor as vibrações, apresenta um excelente acabamento, permite a união de materiais com diferentes composições químicas, dando ao projeto uma maior flexibilidade (SHIGLEY et al., 2008).

O fato de as juntas adesivadas distribuírem melhor as tensões em uma união, na comparação com outros métodos, permite o uso de materiais mais finos. Isso porque, em alguns casos, é o ponto de união o responsável pela seleção da espessura do material em uma

estrutura quando a parede for fina, possibilitando, assim, uma redução de peso na estrutura. As colas geralmente possuem um peso bem menor que rebite, parafuso e metal de adição dos cordões de solda, sendo este mais uma forma para a redução de peso.

O sucesso no emprego de uniões adesivadas depende de vários parâmetros, dentre eles a preparação da superfície (SILVA et al., 2007). Se a introdução de furos na região de sobreposição melhorar o desempenho de juntas adesivadas, ter-se-á uma alternativa aos processos de tratamento de superfície convencionais com inúmeras vantagens em relação aos outros processos de preparação de superfície como:

- Dispensa o uso de produtos químicos perigosos comumente aplicados à preparação de superfície (como ácido sulfúrico);
- A preparação da superfície pode ser facilmente automatizada;
- A operação de furação pode ser incorporada a uma etapa de processo ao qual a peça já é submetida (corte laser, usinagem etc.), evitando a necessidade de uma etapa exclusiva para isso;
- Redução de custos e de tempo de fabricação;
- Substituição do uso de jato abrasivo;
- Redução no peso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Uniões adesivadas

Adesivo, conforme definição da *American Society for Testing and Materials* - ASTM D 907-04, é a substância capaz de reter materiais juntos pela superfície de contato.

É difícil determinar em qual período da história da humanidade o homem começou usar adesivos, mas indícios comprovam que os adesivos foram utilizados pelos povos babilônicos há pelo menos 6.000 anos, quando ovos eram misturados a alguns condimentos, como cal, e utilizados como cola, usando-a para colar os olhos de marfim nas estátuas babilônicas. Os papiros, que possibilitaram o desenvolvimento da escrita no antigo Egito, eram raízes amassadas e dispostas em camadas com aplicação de material adesivo entre as camadas, o que possibilitava a união das diversas camadas, aumentando sua durabilidade, permitindo que fossem marcadas, escritas e desenhadas com tintas especiais e enroladas para uso futuro (PIZZIE, 2003).

Adesivos feitos de proteína animal como a encontrada no leite, chamada caseína, foram empregados na primeira guerra mundial para a construção de aeronaves de madeira, mas tinham uma resistência limitada devido ao crescimento de fungos e à presença de umidade (BERRY, 1998, *apud* SOUZA, 2009). Há bastante tempo, os adesivos são muito bem empregados na união de materiais como couro, madeira, plásticos, borrachas, vidros, cerâmicas, e outras aplicações de caráter não estrutural (MESSLER, 2004).

Mais recentemente, com o desenvolvimento e a proliferação dos polímeros sintéticos, como mostra a Tabela 1, que descreve evolução cronológica dos principais adesivos sintéticos, é que as uniões adesivadas emergiram no sentido de novos materiais adesivos, sofisticando tecnicamente os processos de colagem. Hoje, tem-se uma vasta aplicabilidade na área de componentes eletrônicos, na união de cerâmicos, polímeros (termoplásticos e termofixos) e vários outros compósitos estruturais (MESSLER, 2004).

Tabela 1 – Desenvolvimento cronológico dos adesivos.

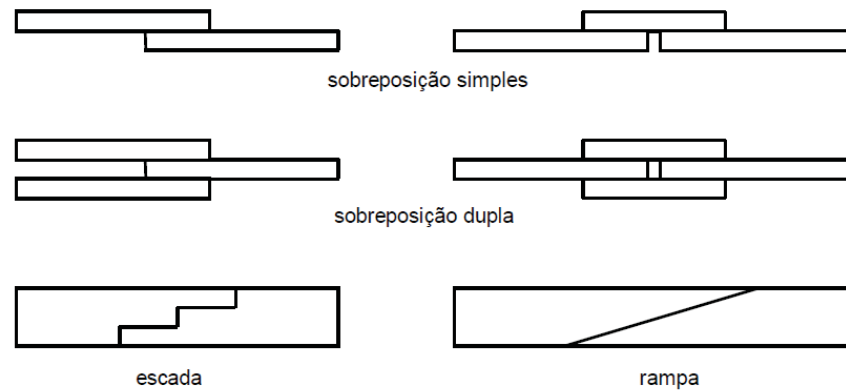
<i>Ano</i>	<i>Adesivo</i>
1910	Fenol-Formaldeído
1930	Ureia-Formaldeído
1940	Nitrilo-Fenólico Vinilo-Fenólico Acrílico Poliuretana
1950	Epóxido Cianoacrilatos Anaeróbicos
1960	Poliamidas Polibenzimidazol Poliquinoxalina
1970	Segunda geração de acrílicos

Fonte: Messler, 2004.

Atualmente, pode-se observar uma progressiva utilização dos adesivos em diversas áreas como indústria têxtil, calçadista, automotiva, implementos rodoviários e principalmente na indústria aeronáutica e aeroespacial tanto na criação de novos materiais compósitos como, por exemplo, a criação de novos tipos de “*Honeycombs*”, na substituição de sistemas de uniões convencionais como rebiteagem, soldagem ou até mesmo uniões parafusadas por uniões adesivadas. Segundo Pizzi, (2003), um dos principais fatores responsáveis pelo aumento no uso de uniões adesivadas é o aumento da temperatura de trabalho dos adesivos. Esse assunto será discutido posteriormente com maior ênfase, pois a baixa resistência dos adesivos a temperaturas relativamente altas é considerada um dos principais limitadores na aplicação de adesivos estruturais.

A Figura 1 mostra algumas das geometrias de juntas adesivadas mais comuns, onde uma das mais usadas é a junta de sobreposição simples. A junta do tipo escada e do tipo rampa tem elevado desempenho e aplicam-se na indústria aeronáutica para peças de materiais compósitos com espessura relativamente elevada (PEREIRA, 2002) e tem o custo de fabricação dessas juntas é superior ao custo das juntas de sobreposição simples.

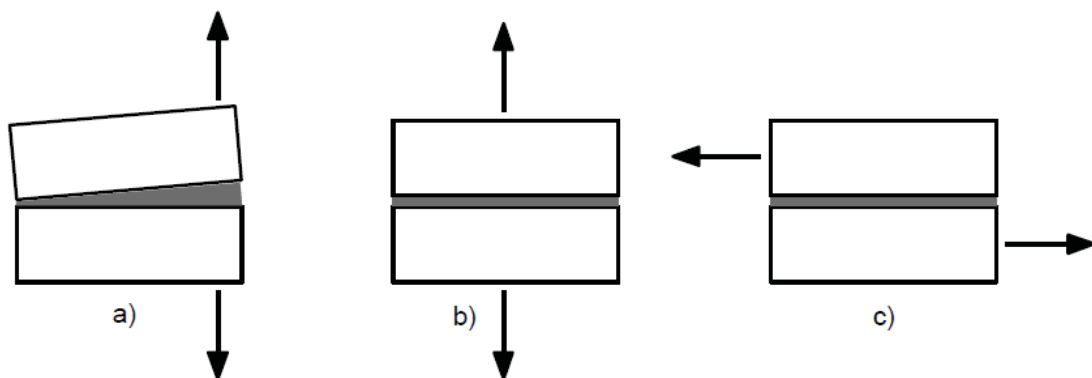
Figura 1 – Geometria de juntas adesivadas.



Fonte: Pereira, (2002).

As três principais formas de sollicitação de junta estão descritas na Figura 2, e, segundo Shigley et al. (2008), um princípio fundamental na concepção das ligações adesivadas é o de que o adesivo deve transmitir preferencialmente esforços de corte (Figura 2c). As forças de impacto, tração e clivagem devem ser evitadas, pois são altamente prejudiciais.

Figura 2 – Tipos de esforços em juntas adesivadas: a) Clivagem; b) Tração; c) Corte.



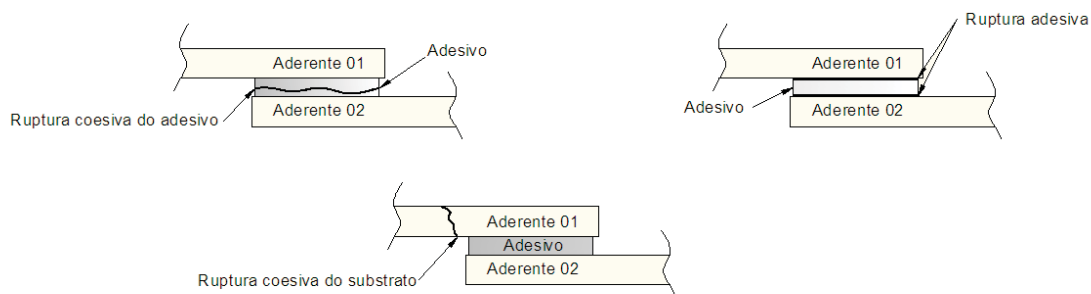
Fonte: Shigley et al. (2008).

O modo de falha é um fator importante na análise de uma junta, visto que retrata a parte mais fraca da junta e permitindo assim ao projetista avaliar o problema. De acordo com

Esteves, (2010), os três principais modos de ruptura (ver Figura 3) para uma junta adesiva caracterizados na literatura e por vezes utilizados na indústria são os seguintes:

- Fratura coesiva no adesivo: ocorre quando se tem ruptura interna na região do adesivo, indicando que a resistência do adesivo é menor que a resistência do substrato e da ligação entre adesivo e substrato;
- Fratura coesiva no substrato: quando a ruptura ocorre no interior do substrato;
- Fratura adesiva: quando a fratura ocorre na interface entre substrato-adesivo.

Figura 3 – Representação esquemática dos modos de ruptura em juntas coladas de sobreposição.



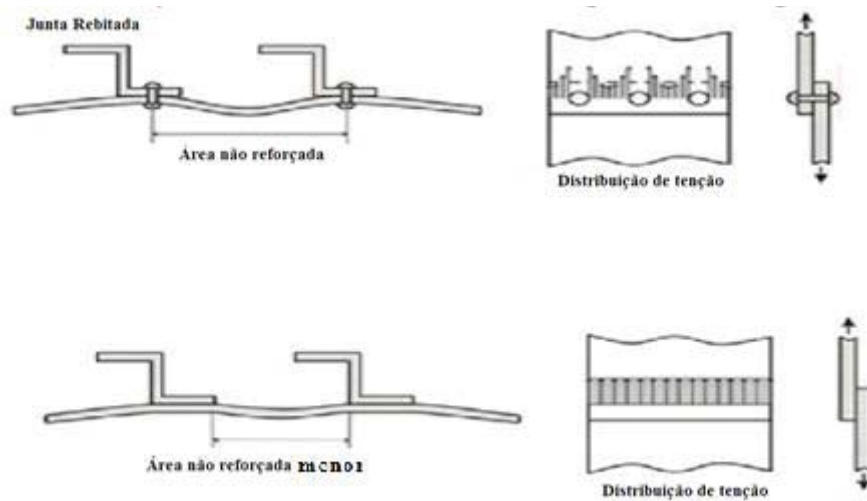
Fonte: Esteves, (2010).

2.1.1 Vantagens

De acordo com Silva et al. (2007), as principais vantagens que as uniões adesivadas apresentam em relação aos processos convencionais de união são:

- Possibilitam a união de materiais diferentes: como por exemplo a união de um metal a um compósito polimérico;
- Melhor aerodinâmica e contornos regulares: isso que confere uma alta qualidade estética e aerodinâmica peça ou ao conjunto;
- Maior resistência à fadiga: devido à boa distribuição da tensão e às propriedades mecânicas de alguns adesivos que possuem uma alta ductilidade e alta resiliência;
- A distribuição de tensão mais uniforme ao longo da área ligada: conforme pode ser observado na Figura 4, a junta colada apresenta menor incidência de pontos de concentração de tensão, dando uma maior rigidez à área ligada.

Figura 4 – Distribuição de tensão em uniões rebitada e colada.



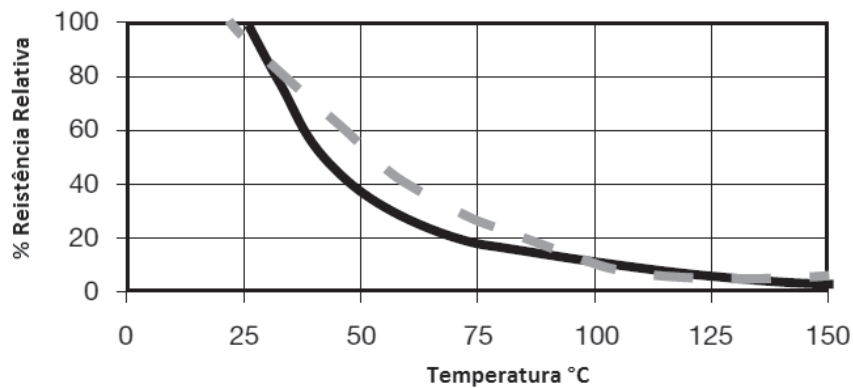
Fonte: Marchezin et al. (2012).

2.1.2 Desvantagens

Naturalmente, o processo possui desvantagens ou restrições quanto à sua aplicação, dentre as quais se pode destacar (COGNARD, 2006):

- Necessidade de preparação da superfície a ser colada: esse é o fator crucial para a produção de uma junta de boa qualidade. A presença de óleos ou impureza pode reduzir consideravelmente a resistência mecânica da junta e em alguns casos faz-se necessário, além do processo de limpeza um processo adicional para que a adesão entre adesivo e peça seja melhorada, processo esse que será discutido detalhadamente;
- Adesivos necessitam de um tempo para adquirir resistência mecânica (chamado de tempo de cura);
- Adesivos têm sua resistência mecânica afetada pela variação da temperatura: como é possível observar na Figura 5 o adesivo sofreu uma redução de 90% de sua resistência quando a temperatura aumentou 90°C, a maioria dos adesivos estruturais sofre uma variação acentuada na resistência mecânica em função da variação da temperatura, mesmo em temperaturas próximas à temperatura ambiente;

Figura 5 – Resistência ao cisalhamento em função da temperatura de dois adesivos acrílicos.



Fonte: Loctite, (2011).

- Sensibilidade a cargas de descasque: como é possível observar na Tabela 2, apesar de possuírem uma alta resistência ao cisalhamento, as juntas adesivadas não se comportam da mesma forma quando solicitadas a cargas de descasque;

Tabela 2 – Resistência ao cisalhamento e ao descasque.

<i>Química do adesivo ou tipo</i>	<i>Temperatura ambiente resistência ao cisalhamento sobreposto, MPa</i>	<i>Resistência de descasque (descasque) por unidade de largura, kN/m</i>
Sensível à pressão	0,01-0,07	0,18-0,88
Base de amido	0,07-0,7	0,18-0,88
Celulósico	0,35-3,5	0,18-1,8
Base de borracha	0,35-3,5	1,8-7
Derretimento a quente formulado	0,35-4,8	0,88-3,5
Derr. a quente sintética formulado	0,7-6,9	0,88-3,5
Emulsão de PVAc	6,9-13,8	0,88-1,8
Cianoacrilato	6,9-13,8	0,18-3,5
Base de proteína	6,9-13,8	0,18-1,8
Acrílico anaeróbico	6,9-13,8	0,18-1,8
Uretano	6,9-17,2	1,8-8,8
Acrílico de borracha modificada	13,8-24,1	1,8-8,8
Fenólico modificado	13,8-27,6	3,6-7
Epóxi não modificado	10,3-27,6	0,35-1,8
Bis-maleimida	13,8-27,6	0,18-3,5
Poliamida	13,8-27,6	1,8-0,88
Epóxi de borracha modificada	20,7-41,6	4,4-14

Fonte: Shigley et al., 2008.

2.2 Adesivos

A principal função de um adesivo é a de manter ligadas as estruturas, que devem ser capazes de resistir a cargas sem grande deformação nos mais variados ambientes.

Os adesivos podem ser classificados de várias formas, entre as quais se pode destacar as seguintes: pela função, materiais a unir, forma física, aplicação, durabilidade em serviço e composição química.

Um critério de classificação dos adesivos bastante usado é quanto à sua resistência ao cisalhamento. São considerados adesivos estruturais aqueles que possuem resistência ao cisalhamento superior a 5MPa, e não estruturais os que possuem resistência ao cisalhamento inferior a 5MPa. Alguns exemplos de adesivos estruturais são os epóxico, epóxico híbridos e fenólicos (COGNARD, 2006).

Os adesivos também são classificados quanto ao modo de cura por:

- Reação química: com um endurecedor ou reação com uma fonte externa de energia como calor, radiação etc.;
- Perda de solvente ou perda de água: endurecido pela evaporação da água ou solvente no ar ou pela difusão em substratos porosos;
- Esfriamento: geralmente os termoplásticos que derretem quando aquecidos e depois endurecem ao esfriar.

Já quanto à composição química, é possível distinguir os adesivos como:

- Adesivos termoplásticos: são os adesivos que podem ser derretidos com aplicação de calor e posteriormente aplicados aos substratos;
- Adesivos termoendurecíveis: ao contrário dos adesivos termoplásticos, estes adesivos não podem ser plastificados com calor após a cura. Dependendo da sua tipologia, os adesivos termoendurecíveis curam à temperatura ambiente ou a altas temperaturas;
- Adesivos elastômeros: embora os adesivos elastômeros possam ser termoplásticos ou termoendurecíveis, a resina elastômera, na qual estes adesivos são baseados, permite obter grandes capacidades de extensão e compressão. Essas características fazem destes adesivos uma boa escolha para juntas adesivas que sofrem carregamentos não uniformes;
- Adesivos híbridos: trata-se de adesivos oriundos da combinação de um ou mais tipos de adesivos já referidos para, com essa mistura, obter-se um adesivo com certas propriedades melhoradas.

2.3 Adesivos acrílicos

Também são denominados adesivos acrílicos reativos ou acrílicos modificados para distinguir dos outros acrílicos que são normalmente usados em aplicações termoplásticas sensíveis a pressão.

Este tipo de adesivo é normalmente composto de duas partes pastosas que, quando misturadas, dão início ao processo de cura, o que facilita sua aplicação em superfícies verticais sem que haja escorrimento. Possuem uma elevada resistência ao cisalhamento, podendo chegar a 30MPa.

Adesivos acrílicos modificados têm uma boa resistência ao arrancamento, ao impacto e ao corte entre -40 e 120°C. As juntas têm uma boa resistência à alta umidade, possuem um intenso odor monomérico, o que os torna incomodativos para certos aplicadores (SSAB, 2012).

Tabela 3 – Características dos adesivos acrílicos modificados (Silva et al., 2007).

<i>Adesivos Acrílicos Modificados</i>	
Cura	Catalisados por um iniciador que permite uma cura rápida
Temperatura de serviço	-40 a 120°C
Vantagens	Pode curar rapidamente. Habilidade de ligar superfícies mal preparadas. Boa resistência ao meio ambiente.
Desvantagens	Resistência e módulo são mais baixos do que para os epóxidos.
Resistência ao meio ambiente	Água – Boa resistência; Solvente – Boa resistência; Óleo – Boa resistência.
Saúde e segurança	Não causam grandes problemas à saúde, porém inflamáveis.
Aplicação	Montagem rápida de pequenos e grandes componentes.

Fonte: Silva et al., 2007.

2.4 Teoria da adesão

Segundo Monteiro, 1995, adesão é um fenômeno essencialmente interfacial no qual estão envolvidas forças químicas e físicas.

Existem inúmeras e diferentes teorias que explicam o fenômeno de adesão, e cada uma delas está associada a resultados experimentais, verificando-se contradições em alguns casos, o que indica que o fenômeno de adesão não é expresso por apenas uma teoria, mas sim pela associação de mais de uma teoria (MONTEIRO, 1995).

As forças responsáveis por unir o adesivo ao substrato são as mesmas presentes no interior do adesivo. Por isso, faz-se necessário compreender as forças que mantêm os átomos e moléculas do adesivo unidas entre si (PETRIE, 2007).

É importante salientar que as forças de adesão não são as únicas forças envolvidas na união de materiais por adesivos. Por exemplo, o mel de abelha pode ter uma boa adesão a um substrato qualquer, mas se o empregarmos como adesivo, a junta resultante seria extremamente fraca, pois as forças coesivas do mel são fracas e, como em uma corrente submetida a um carregamento, a falha ocorrerá no elo mais fraco.

2.4.1 Forças de adesão e coesão

As forças adesivas são aquelas que mantêm o adesivo conectado ao substrato e as forças coesivas são as forças que mantêm as moléculas de um mesmo material conectadas entre si. Uniões adesivadas comumente falham tanto adesivamente (quando se remove um adesivo de um vidro) como coesivamente (quando dois metais unidos com graxa são separados).

Tanto as forças de adesão quanto as forças de coesão são originadas a partir das forças de atração entre moléculas. A porção positiva de uma molécula atrai a porção negativa da molécula adjacente, e quanto maior a diferença de potencial e menor a distância entre as moléculas, maiores essas forças de atração serão (PETRIE, 2007).

As forças adesivas e coesivas são classificadas como forças primárias e secundárias. Forças primárias são subdivididas em forças covalentes, iônicas e metálicas. As forças covalentes são formadas por ligações covalentes, que apresentam energia de ligação entre 60 e 700 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, como, por exemplo, aquelas ocorridas em polímeros orgânicos ramificados. As ligações iônicas apresentam energia de ligação entre 600 e 1000 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, e são aquelas formadas por ligações químicas iônicas, como as presentes em cristais inorgânicos. As forças metálicas, de energia entre 100 e 350 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, correspondem às forças presentes entre os átomos de uma liga metálica. As ligações primárias não estão presentes na maioria dos adesivos (QUINI, 2011).

As forças secundárias são as mais comuns. Elas formam a interface entre adesivo e aderente e são identificadas como Forças de Van der Waals, como as dipolo induzido, dipolo permanente e as pontes de hidrogênio. As forças dipolo induzido, ou forças de London como também são conhecidas, têm energia de ligação entre 0,1 e 40 kJ.mol⁻¹, e as de dipolo permanente têm energia entre 4 e 20 kJ.mol⁻¹ e estão presentes entre moléculas polares (QUINI, 2011).

Quando em uma molécula existem elementos como F, O e N que são muito eletronegativos, ligados ao de hidrogênio, a eletronegatividade desses átomos exerce uma maior atração do par eletrônico dessa ligação, polarizando a molécula. Conseqüentemente, essa molécula, ao aproximar-se de outra que tenha elementos eletronegativos, irá interagir com o hidrogênio, formando uma ligação chamada de ligação de hidrogênio, ligação que apresenta energia em torno de 40 kJ.mol⁻¹ (QUINI, 2011).

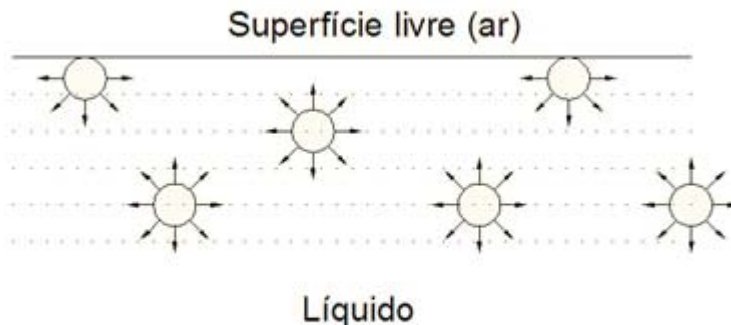
A natureza e a influência dessas ligações na resistência adesiva e coesiva são difíceis de determinar com precisão. Entretanto, de maneira geral, a sua compreensão ajuda-nos a entender como uniões adesivadas são originadas e por que elas falham (PETRIE, 2007).

2.4.2 Energia de Superfície

As forças que mantêm um adesivo em contato com o substrato, ou as moléculas de um material sólido, unidas entre si, podem ser relacionadas como o trabalho necessário para separá-las. Essa energia é chamada de energia livre de superfície (γ), é dependente das forças intermoleculares existentes no material e do espaçamento intermolecular (distância entre as moléculas).

Para facilitar a compreensão da energia de superfície (γ), imagine-se um líquido contido em um recipiente aberto. Dentro desse líquido, as forças de atração estão em equilíbrio mas, na superfície, não. Esse desequilíbrio na superfície ocorre pelo fato de as moléculas que estão nesta posição não possuírem molécula vizinhas em um dos lados (superfície livre), por conseqüência elas estão sujeitas a uma força que as atrai para o meio interior do líquido (ver Figura 6).

Figura 6 – O desequilíbrio das forças de atração à superfície de um líquido dá lugar à tensão de superfície e à energia de superfície.



Fonte: Silva et al. (2007).

Para trazer moléculas do meio do fluido para a superfície, é preciso fornecer-lhes energia, pois elas requerem uma quantidade de energia superior relativamente àquelas que não estão rodeadas por partículas vizinhas. Para criar uma nova superfície, é preciso trazer moléculas que estão em equilíbrio e estáveis no meio do fluido para a superfície. E, para que isso ocorra, faz-se necessária uma “adição” de energia a essa molécula. Essa energia adicional é denominada “energia livre de superfície” ou apenas “energia de superfície”. Em suma, a energia de superfície pode ser definida como a energia necessária para criar uma unidade de área numa superfície (SILVA et al., 2007).

2.4.3 Tensão de superfície

Na interface entre duas fases físicas (líquido-gasoso, por exemplo) ocorre um efeito denominado tensão superficial, que faz com que a camada superficial de um líquido venha a se comportar como uma membrana elástica. Esse fenômeno é causado pelas forças de coesão entre moléculas semelhantes, cuja resultante vetorial é diferente na interface. As moléculas situadas no interior de um líquido são atraídas em todas as direções pelas moléculas vizinhas, e as moléculas da superfície do líquido sofrem apenas atrações laterais e internas. Esse desbalanço de forças de atração faz com que a interface se comporte como uma película elástica. Para que haja um aumento de superfície (consequentemente um aumento de moléculas de superfície), é necessário vencer a coesão interna.

Um efeito bem conhecido da tensão superficial da água é o fato de alguns insetos andarem sobre ela, pois a tensão provocada por ele sobre a superfície é incapaz de vencer a tensão superficial.

Para os líquidos, os termos tensão de superfície e energia de superfície são usados sem distinção em muitos casos, e ambos são representados pela letra grega γ (gama) (SILVA et al., 2007).

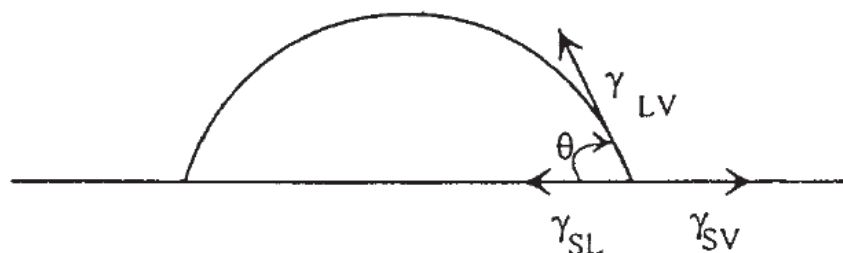
2.4.4 Equação de Thomas Young

Thomas Young foi um dos primeiros pesquisadores a estudar o fenômeno de molhamento e equacionou o vetor de tensão de superfície no ponto de contato entre as três fases: sólido, líquido e vapor.

Existem maneiras simples de medir a tensão de superfície de um líquido em equilíbrio com seu vapor (γ_{LV}). Porém, não é tão simples medir a tensão superficial do sólido (γ_{SV}).

Para medir a tensão superficial do sólido (γ_{SV}), foram criados métodos de medição indireta, pelo qual uma gota de um líquido é colocada sobre a superfície sólida. Assume-se que o líquido não reage com a superfície sólida e que esta seja lisa e rígida. A gota pode escoar e entrar em equilíbrio com a superfície livremente. O ângulo θ , formado entre a superfície sólida e a gota, é medido cuidadosamente, conforme mostra a Figura 7.

Figura 7 – Tensão de superfície atuando em uma gota de líquido sobre um sólido.



Fonte: Petrie, (2007).

Thomas Young descreveu o balanço de força como:

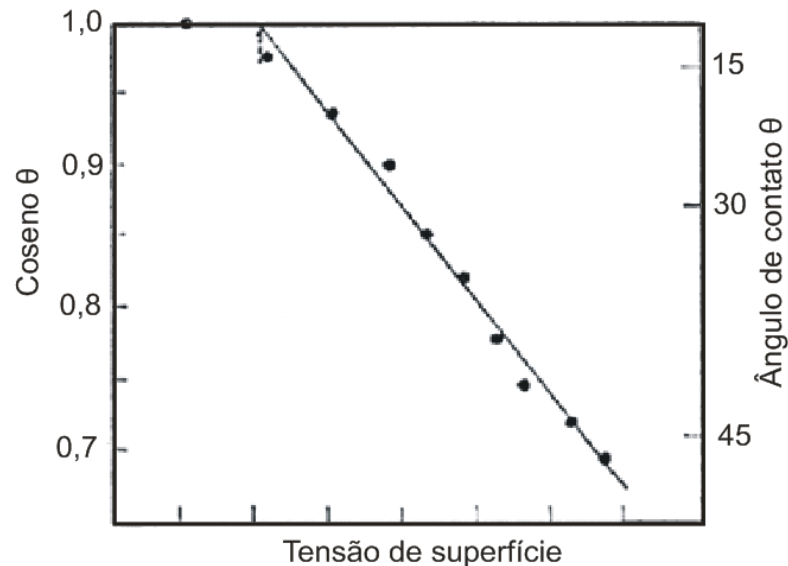
$$\gamma_{LV} \cdot \cos\theta = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (1)$$

Onde γ_{LV} é a tensão superficial do líquido com seu vapor e γ_{SV} é a do sólido. A tensão interfacial entre o sólido e o líquido é γ_{SL} (PETRIE, 2007).

2.4.5 Tensão de superfície crítica

Um método mais simples para a determinação da tensão de superfície foi desenvolvido por Zisman. Segundo Zisman, (1950), *apud* Petrie, (2007), uma tensão de superfície crítica, γ_C , pode ser estimada através da medição do ângulo de contato θ de uma série de líquidos com a tensão de superfície conhecidas nas superfícies de interesse. Esses ângulos de contato são traçados em função da tensão de superfície, γ_{LV} , do líquido de teste, como mostra a Figura 8. Se a reta for extrapolada para $\cos\theta = 1$, então a energia de superfície corresponde a um líquido que quase se espalha sobre o sólido.

Figura 8 – Curva de Zisman para determinação da tensão de superfície crítica.



Fonte: Petrie, (2007).

2.4.6 Coeficiente de espalhamento

Quando $\theta > 0$, o líquido não se espalha na superfície sólida. Quando $\theta = 0$, o líquido se espalha completa, livre e espontaneamente na superfície com a qual o mesmo foi colocado em contato. Por isso, para que ocorra uma molhagem completa e espontânea, é necessário que tensão interfacial entre o sólido e o vapor γ_{SV} seja maior que a soma da tensão interfacial entre o sólido e o líquido, γ_{SL} , e a tensão interfacial entre o líquido e o vapor, γ_{LV} .

Esse critério também pode ser expresso por um parâmetro designado coeficiente de espalhamento S , onde:

$$S = \gamma_{SV} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LV}) \quad (2)$$

Um líquido se espalha espontaneamente e molha completamente uma superfície quando $S > 0$. Somente é possível provocar o espalhamento e o molhamento por completo, onde $S < 0$ quando se aplica uma força ou pressão externa (SILVA et al., 2007).

O utilizador pode intervir aumentando a energia da superfície do sólido. E isso pode ser realizado de várias formas, como será discutido posteriormente, quando serão abordados os procedimentos de preparação dados às superfícies dos substratos antes da realização da colagem propriamente dita. A presença de contaminantes, como pó, gordura, umidade etc. pode causar uma diminuição da energia de superfície, fazendo com que haja uma maior dificuldade do fluido em espalhar-se.

2.4.7 Teoria de adesão mecânica

Uma superfície sólida sempre apresentará irregularidade como pode ser visto na Figura 9, ela nunca será completamente lisa, apresentando rugosidade com picos e vales. Logo, deseja-se que essas imperfeições sejam completamente preenchidas pelo adesivo e o ar deve ser expulso do interior das mesmas para que o adesivo ocupe seu espaço.

Esses picos e vales, quando preenchidos, provocarão uma ancoragem mecânica do adesivo com o substrato. Outro fator a ser considerado é o aumento da área de contato entre adesivo e substrato provocado pelas irregularidades (POCIUS, 1997, *apud* QUINI, 2011).

As forças de adesão resultam de um trabalho conjunto na junta. Nesses casos, a resistência apresentada pela junta será uma soma da adesão ocorrida devido às interações primárias e secundárias, com o efeito da ancoragem mecânica ocorrido.

No caso de substratos porosos, a ancoragem representa uma parcela significativa da resistência mecânica da junta. Em muitos casos, em que materiais pouco porosos são unidos, um tratamento superficial é realizado com o intuito de aumentar a rugosidade. O efeito benéfico da rugosidade na superfície ocorre devido ao aumento da ancoragem mecânica, formação de uma superfície mais limpa, de uma superfície mais reativa e ao aumento da área de contato (POCIUS, 1997, *apud* QUINI, 2011).

Figura 9 – Ancoragem mecânica.



Fonte: Special Chem, s.d.

2.4.8 Teoria da adsorção

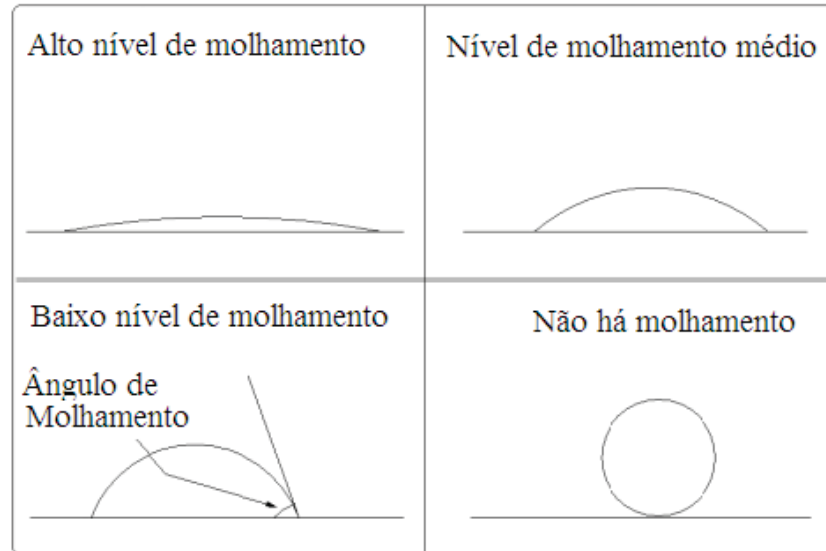
A teoria da adsorção sugere que a adesão é resultante do contato entre moléculas de dois materiais que se atraem, originando as forças de superfície. Essas forças de atração são denominadas forças secundárias ou forças de Van der Waals. Para que essa atração ocorra, deve haver um contato íntimo entre adesivo e aderente e as superfícies devem estar a uma distância menor que cinco Angstroms (COGNARD, 2006).

O fenômeno que origina esse contato íntimo é chamado de molhamento. A Figura 10 exemplifica um molhamento eficiente onde há um contato íntimo entre o adesivo e o aderente e um molhamento ineficiente onde o contato íntimo não ocorre.

Um molhamento eficiente ocorre quando o adesivo escoar preenchendo todos os vales e fendas da rugosidade da superfície, expulsando completamente o ar presente, eliminando a presença de bolhas e falhas. Um molhamento pobre ocorre quando o adesivo fica suspenso nos picos da rugosidade, formando pontes, e pequenas bolas de ar entre o adesivo e o

substrato ficam retidas, reduzindo a área de contato entre adesivo e aderente (PEYKOVA et al., 2012).

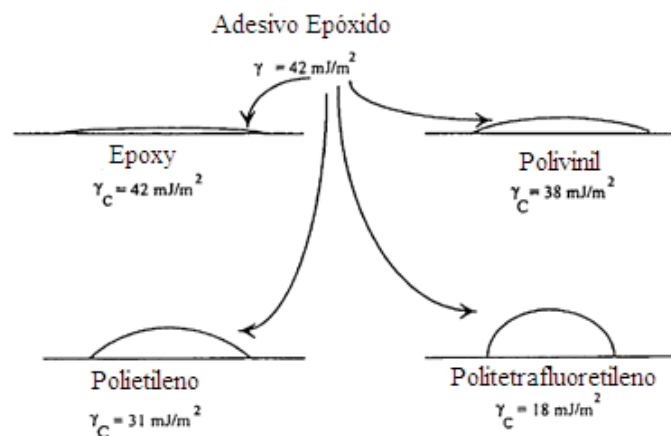
Figura 10 – Molhamento da superfície pelo adesivo.



Fonte: Petrie, (2007).

Como é possível observar na Figura 11, quando a energia de superfície do substrato γ_{SV} é alta e a energia de superfície do adesivo é baixa, o molhamento é favorecido (PETRIE, 2007).

Figura 11 – Ângulo de contato de um adesivo epóxi em quatro diferentes substratos com diferentes energias de superfície.



Fonte: Petrie, (2007).

Ligações químicas primárias também podem ocorrer na região de interface, constituindo o que se costuma denominar quimissorção. As ligações primárias são fortes e contribuem significativamente para a adesão intrínseca em alguns casos. O uso de agentes de ligação e promotores de adesão ajudam a fixar o adesivo à superfície por reação química (SILVA et al., 2007).

Figura 12 – Adesão por reação.



Fonte: Special Chem, s.d..

2.4.9 Teoria da Camada Fraca (Weak boundary layer).

Introduzida por Bikerman, (1961), *apud* Silva et al. (2007), a Teoria da camada fraca sugere que a ideia de duas fases em contato são completamente isotrópicas e de composição uniforme até suas fronteiras é errada. Bikerman afirma que a falha raramente ocorre na interface. Afirma, ainda, que, na maioria dos casos, ela ocorre em uma região muito próxima à interface com deformação plástica ou falha coesiva. Essa camada fraca pode ter sua origem no adesivo, no aderente, no ambiente ou na combinação destes.

A camada fraca pode ocorrer no adesivo ou no aderente quando há uma concentração de impurezas junto à interface adesivo aderente (PETRIE, 2007). Os principais mecanismos formadores da camada fraca são:

- A inclusão de ar ou de outros gases, formando vazios ou bolhas;
- A formação de camadas de óxidos, que são fracos ou mal ligados ao material de base;

- A concentração de antioxidantes, plastificantes ou diluentes junto à região interfacial adesivo aderente.

2.5 Fatores que influenciam na resistência de uma junta adesivada

São inúmeros os fatores que influenciam na resistência de uma junta adesivada, entre os quais se podem destacar as condições da superfície dos substratos, fatores geométricos como espessura do adesivo e dos aderentes, fatores térmicos e as propriedades mecânicas dos materiais envolvidos.

2.5.1 Preparação de superfície

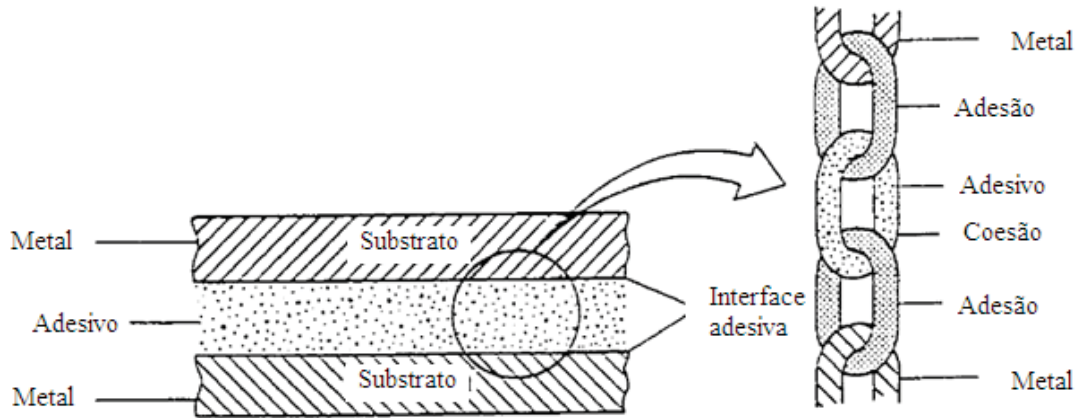
Uma das conclusões importantes que emergem da teoria de adesão é o fato de que tratamentos de superfície são quase sempre necessários. A natureza e a condição da superfície do substrato são fatores determinantes da qualidade de uma junta adesivada (ISLAM et al., 2014). Para a fabricação de uma junta com sucesso, quatro critérios devem ser considerados: nível de limpeza da superfície, continuidade (ausência de bolhas ou de inclusões), estabilidade e bom molhamento da superfície do substrato por parte do adesivo (SILVA et al., 2007).

Frequentemente as camadas superficiais não apresentam a mesma composição do material de base. Para metais e suas ligas, essa camada superficial pode estar constituída de óxidos. Em não metais, é comum a presença de aditivos absorvidos (PETRIE, 2007). Duas características dessa superfície afetam a qualidade da junta adesivada:

- Em alguns casos, a natureza química da camada superficial reduz a energia de superfície γ_{SV} ;
- A camada superficial é fraca coesivamente ou não possui uma boa adesão ao material de base.

Em uma junta adesivada ideal, o substrato deveria ser o componente ou elo (ver Figura 13) mais fraco do conjunto. Mas, na grande maioria dos casos, é o adesivo que apresenta a menor resistência porque a resistência mecânica provocada pelas forças de adesão é maior que a resistência mecânica do adesivo, ou seja, as forças de adesão são maiores que as forças de coesão do adesivo.

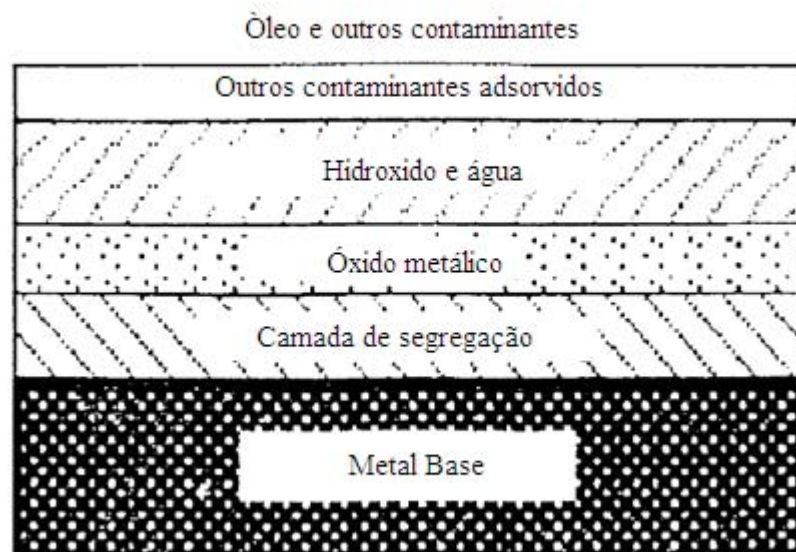
Figura 13 – Ligação entre adesivo aderente de uma junta metálica.



Fonte: Petrie, (2007).

As superfícies metálicas geralmente são compostas por regiões que não são bem definidas ou não possuem uma fronteira, mas que estão bem demarcadas para uma melhor compreensão na Figura 14 (SILVA et al., 2007).

Figura 14 – Possíveis camadas superficiais em metais.



Fonte: Petrie, (2007).

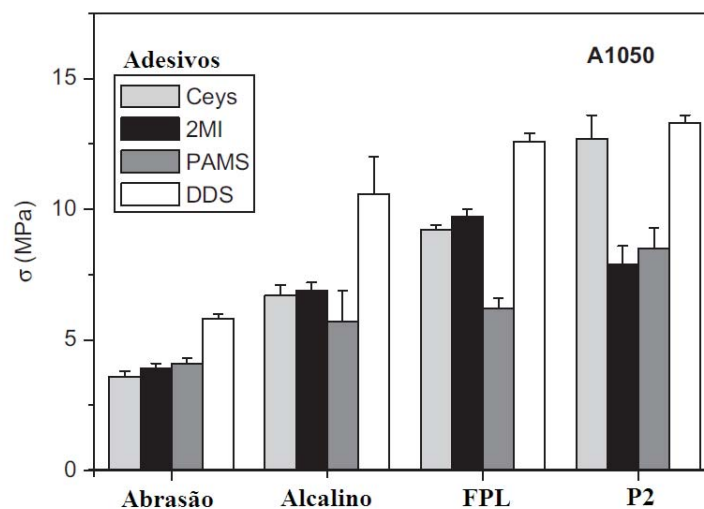
A primeira camada acima do metal base é denominada camada de segregação. Ela tem uma diferente composição do metal base, devido ao fenômeno de segregação dos elementos de liga e das impurezas.

A camada seguinte é formada pelos óxidos do metal seguido de uma camada de hidróxidos e uma camada de água absorvida. Pode também haver contaminantes absorvidos pela atmosfera como enxofre ou outros, dependendo da reatividade do metal e dos poluentes presentes no ambiente onde o processo foi realizado (PETRIE, 2007).

O uso de óleos, de lubrificantes ou de similares para a proteção do substrato contra corrosão ou para a realização das etapas de processos anteriores é bastante comum. E, ainda, em alguns casos, um trabalho mecânico como o de conformação pode ser realizado, aumentando ainda mais a heterogeneidade dessa superfície.

Como é possível ver na Figura 15, o comportamento mecânico de juntas adesivadas está diretamente ligado às condições de superfícies. A Figura 15 apresenta o resultado dos estudos realizados por Prolongo e Uren, (2009), que avaliou o comportamento mecânico de juntas de alumínio A1050 com quatro distintos adesivos, e quatro diferentes tratamentos de superfície. Os tratamentos superficiais adotados por Prolongo e Uren, (2009), foram abrasão, limpeza alcalina em uma solução de 100g/l NaOH, FPL, que consiste na imersão dos substratos metálicos em uma solução aquosa com 330ml/l de ácido sulfúrico e 50g/l dicromato de potássio e, por último, o tratamento denominado P2 onde os substratos foram imersos em uma solução aquosa contendo 186 ml/l de ácido e 127 g/l sulfato de ferro.

Figura 15 – Resistência mecânica ao cisalhamento de juntas adesivadas com quatro adesivos epóxi e quatro diferentes tratamentos de superfície.



Fonte: Prolongo e Uren, (2009).

A Tabela 4 demonstra o efeito do tratamento superficial na resistência de juntas adesivadas com diferentes aderentes metálicos. O aumento na resistência mecânica provocado pelo tratamento superficial depende do tipo de aderente e do tipo de adesivo aplicado (PETRIE, 2007).

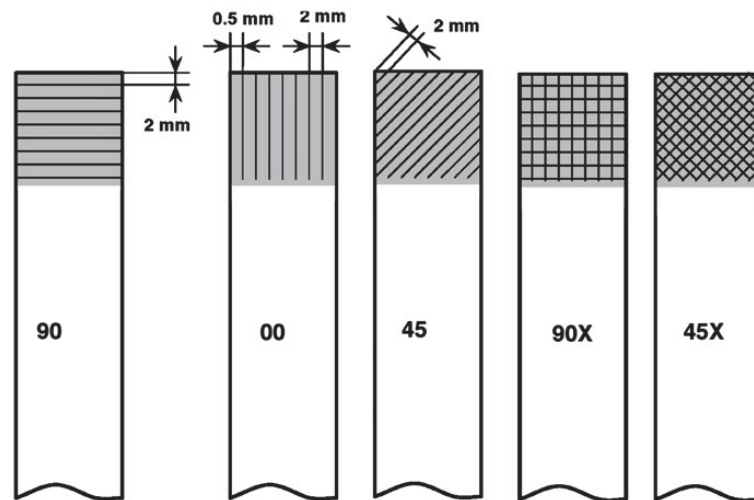
Tabela 4 – Influência do tratamento superficial na resistência da junta adesivada estrutural com diferentes adesivos acrílicos.

<i>Aderente</i>	<i>Tratamento superficial</i>	<i>Resistência ao cisalhamento (MPa)</i>			
		<i>V-204/Acc.4</i>	<i>V-52/Acc.4</i>	<i>F-241/Acc.4</i>	<i>V-245/Acc.5</i>
Alumínio	Solvente	23,7±1,0	3,7±0,4	18,5±5,1	16,7±1,4
	Jato abrasivo	22,0±0,7	11,6±0,3	20,5±4,0	16,2±1,1
	Ácido cômico	22,8±1,4	9,8±2,0	24,4±3,7	15,6±1,5
Aço	Solvente	5,3±0,2	7,1±0,3	23,5±1,4	20,0±0,9
	Jato abrasivo	26,7±2,7	4,5±0,2	25,3±1,4	12,5±1,7
Fibra de vidro	Solvente	19,4±1,4	14,1±1,0	12,5±1,8	12,2±1,2
	Jato abrasivo	17,1±1,4	15,5±1,4	10,5±2,0	15,6±2,0

Fonte: Dodiuk e Kenig, 1988.

Alguns pesquisadores, como Ferreira et al. (2010), sugerem como alternativa ao processo de preparação de superfície, a confecção de sulcos com profundidade de 0,1mm nas superfícies a serem unidas através de pantógrafos, conforme se pode verificar na Figura 16, processo limitado em função do tamanho das peças. Outro fator indesejado provocado por esse processo adicional sugerido por Ferreira et al. (2010), é um considerável aumento no custo de fabricação da junta.

Figura 16 – Tratamento de superfície alternativo sugerido por Ferreira et al. (2010).



Fonte: Ferreira et al. (2010).

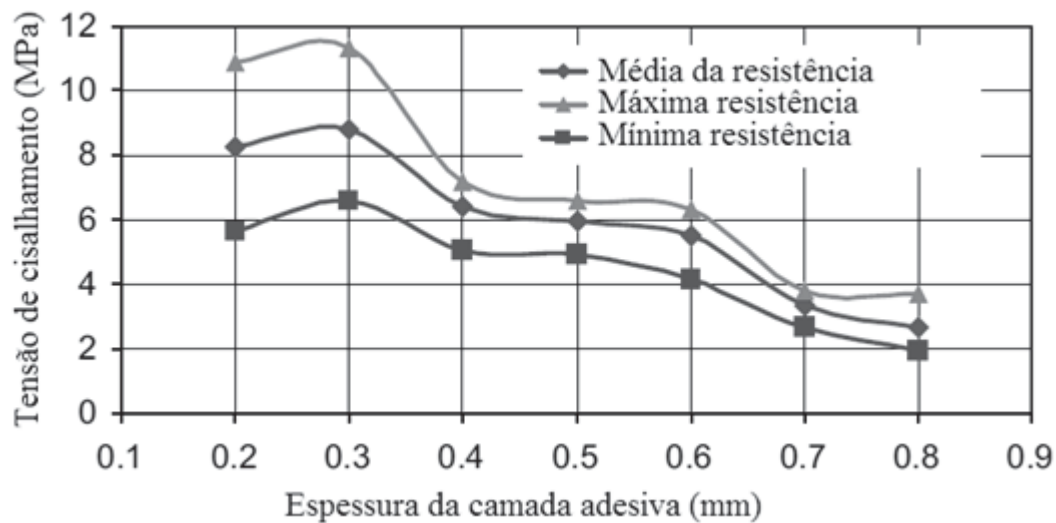
2.5.2 Fatores geométricos

Segundo Silva et al. (2007), o projetista pode atuar em diferentes níveis das características geométricas: espessura do adesivo, comprimento de sobreposição e geometria dos substratos.

2.5.2.1 Espessura da camada de adesivo

Um fator importante a controlar é a espessura da camada adesiva, para a qual existe um intervalo ótimo, geralmente entre 0,1 e 0,3 (ARENAS et al., 2010). Conforme se pode observar na Figura 17, a resistência da junta ao cisalhamento diminui acentuadamente com o aumento da espessura da camada adesiva acima de certos valores, devido à maior probabilidade da existência de defeitos. Espessuras demasiadamente finas aumentam consideravelmente o risco de falhas adesivas (ARENAS et al., 2010). Existem várias formas de controlar a espessura da camada de adesivo em uma junta, como, por exemplo, o uso de dispositivos mecânicos que definem a espessura ou a introdução de pequenas esferas de vidro que garantem uma determinada espessura a junta.

Figura 17 – Variação da resistência mecânica da junta adesivada ao cisalhamento em função da espessura da camada de adesivo.



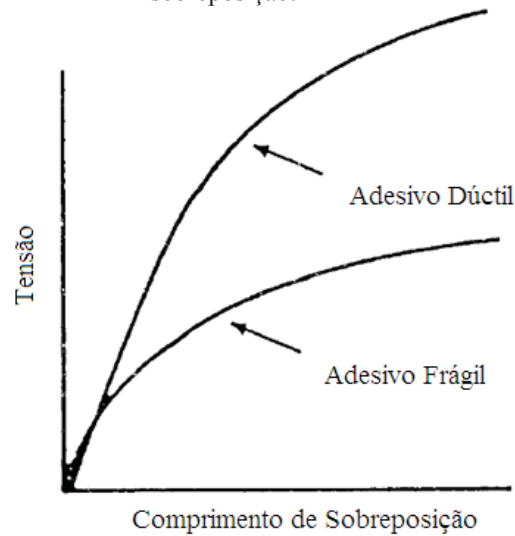
Fonte: Arenas et al. (2010).

2.5.2.2 Largura e comprimento de sobreposição

Nas juntas de sobreposição, as bordas são as regiões que apresentam uma maior concentração de tensão. A tensão média é mais baixa do que a tensão nas bordas da junta, e essa distribuição não uniforme das tensões ao longo da junta faz com que a falha ocorra com cargas inferiores às cargas suportadas pelo adesivo. Enquanto a razão entre comprimento de sobreposição (l) e a espessura do substrato (t) for relativamente pequena, a resistência da junta aumenta quando do comprimento de sobreposição é aumentado. Mas, a partir de determinados valores de l/t , o ganho de resistência é desprezível.

A Figura 18 representa a resistência da junta em função do comprimento de sobreposição de dois adesivos, um deles frágil e outro dúctil. A maior resistência do adesivo dúctil se deve ao fato de o mesmo ser capaz de resistir mais a cargas não uniformes do que o adesivo frágil (PETRIE, 2007).

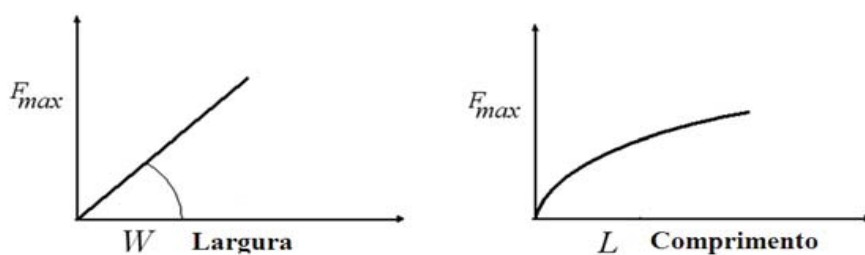
Figura 18 – Resistência ao cisalhamento de juntas de sobreposição simples em função do comprimento de sobreposição.



Fonte: Petrie, (2007).

Segundo Mattos et al. (2011), a largura de sobreposição tem um efeito maior que o comprimento de sobreposição sobre as propriedades mecânicas das uniões adesivadas, ou seja, se a largura da junta for aumentada, ao invés do comprimento de sobreposição, o aumento na resistência tenderá a ser maior e, conforme é possível observar na Figura 19, esse incremento na resistência será linear.

Figura 19 – Relação entre a força de ruptura e a geometria da junta.



Fonte (Mattos et al., 2011).

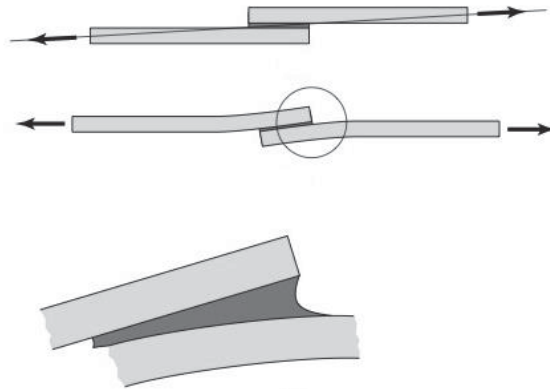
2.5.2.3 Espessura e rugosidade do substrato.

Em uma junta feita a partir de aderente fino e flexível, há uma tendência de distorção quando a ela é submetida ao carregamento de cisalhamento. Essa distorção provocada pela

excentricidade do carregamento está representada na Figura 20 e causa um esforço de clivagem e, conseqüentemente, uma redução na resistência mecânica da junta.

Aderentes mais espessos tendem a ser mais rígidos e, por conseqüência, menos suscetíveis a essa distorção (KARACHALIOS et al., 2013).

Figura 20 – Distorção em junta de sobreposição simples sujeita a esforços de tração.

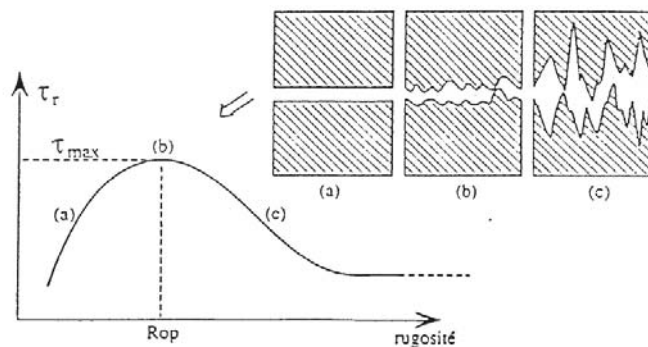


Fonte: Shigley et al. (2008).

A rugosidade é outro fator a ser considerado, pois ela favorece a ancoragem mecânica e aumenta a área de contato, favorecendo a adesão e a resistência mecânica da junta até certo ponto a partir do qual se tem novamente uma redução na resistência da junta (ISLAM et al., 2014).

Como se pode observar na Figura 21, na presença de uma superfície muito lisa (a) ou muito rugosa (c), a colagem pode não apresentar um desempenho satisfatório. No primeiro caso devido ao fato de não haver nenhuma ancoragem mecânica e, no segundo, devido ao fato de a cola não penetrar nas cavidades.

Figura 21 – Variação da resistência à fratura em função da rugosidade.



Fonte: Monteiro, (1995).

2.5.3 Fatores térmicos

O estado de tensão de uma junta colada pode ser influenciado por efeitos de origem térmica. Esse fenômeno pode ser observado em duas circunstâncias: durante o processo de execução da junta, um eventual resfriamento provoca a redução de sua viscosidade; durante o resfriamento no processo de solidificação que leva ao processo de cura, ocorre contração do adesivo induzindo tensões (ADAMS et al., 1992, *apud* SILVA et al., 2007).

Aumentando a temperatura do adesivo, atinge-se um ponto onde ocorrem alterações em suas propriedades, o polímero perde propriedades de materiais rígidos e assume propriedades similares as dos elastômeros (CARNAVAROLO, 2002, *apud* SANTOS, 2007). Essa temperatura é denominada Temperatura de Transição Vítrea (Tg). Alguns polímeros possuem uma Temperatura de Transição Vítrea de Segunda Ordem e, nesse caso, se o polímero continuar a ser aquecido, perderá suas propriedades de elastômeros e se tornará líquido. No caso de adesivos termofixos, se o polímero continuar a ser aquecido, ocorrerá a degradação em caso de superaquecimento (SANTOS, 2007).

As propriedades de cada polímero e, conseqüentemente, a dos adesivos, dependem das condições em que a cura é realizada, sendo a temperatura um dos mais importantes fatores para a cura (BROUGHTON e GROWER, 2001, *apud* SANTOS, 2007).

A formação de cadeias longas de polímero é favorecida pela elevação da temperatura durante a cura a diferentes níveis de acordo com o tipo de polímero. Essas cadeias proporcionam melhores características mecânicas aos adesivos. Cada adesivo possui uma faixa de temperatura, na qual se obtém as melhores condições de cura e, por consequência, as melhores propriedades mecânicas. Adesivos epóxis utilizados na indústria automotiva, por exemplo, geralmente são curados em temperaturas entre 150 e 190°C (SANTOS, 2007).

Estudos realizados por Hu et al. (2013), e por Yichi et al. (2011), constataam em seus experimentos que os adesivos não têm sua resistência influenciada somente por temperaturas altas como foi descrito anteriormente. Hu et al. (2013), avaliaram a resistência mecânica de juntas de sobreposição simples a temperatura de -30°C e a temperatura de 80°C constatando uma redução tanto na deformação sofrida quanto na tensão máxima suportada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de identificar se a presença de furos na região de sobreposição altera ou não o comportamento mecânico de juntas de sobreposição simples, um estudo experimental foi elaborado.

Os substratos de alumínio foram unidos aos de aço em juntas de sobreposição simples com adesivo estrutural acrílico. Alguns dos substratos possuíam a presença de furos na região sobreposta, sendo os furos dispostos em duas configurações e outros não possuíam a presença de furos.

A seleção dos materiais a serem unidos e o tipo de adesivo a ser empregado foi baseado em uma pesquisa junto a uma empresa de implementos rodoviários, sendo a combinação selecionada a mais usada por esse tipo de atividade.

Para que os objetivos fossem alcançados, foram realizados dois métodos de análise, um método para a análise do comportamento ao carregamento estático por meio de ensaio de tração e outro método para avaliação do comportamento da junta quando solicitada a um carregamento dinâmico por meio de ensaio de fadiga e construção da curva S-N.

3.1 O adesivo

O adesivo empregado no experimento foi do tipo acrílico, cura a frio, modelo Lord Maxloc T18, fabricado pela Lord Corporation, sendo este comercializado em duas partes (bi-componente). Em um dos tubos está o adesivo propriamente dito e no segundo está o endurecedor, também denominado acelerador. A relação de mistura adesivo-acelerador é de três partes de adesivo para uma parte de acelerador, sendo que a mistura dos dois dá início ao processo de cura.

De acordo com dados do fabricante, esse é um adesivo que resiste a solventes, graxas, óleos, umidade, maresia e intempéries. Fornece excelente resistência à exposição à radiação UV e a temperatura, apresentando boa performance no intervalo de Temperatura de -40°C até 149°C .

Possui, em sua composição, esferas de vidro com 0,25mm de diâmetro, o que garante um controle preciso da espessura da camada de adesivo durante o processo de colagem. Não

escorre, podendo ser aplicado em qualquer direção mesmo em superfícies inferiores, aumento a flexibilidade de uso.

O processo de cura completa requer um tempo mínimo de 24 horas, e pode ser acelerado aquecendo-se a junta. A temperatura máxima a que a junta pode ser submetida durante o processo de cura é de 60°C. Já o tempo que se necessita aguardar para que a peça possa ser manuseada (*handling time*) varia de 48 a 72 minutos, dependendo da temperatura da união. Algumas das propriedades do adesivo Lord Maxloc® e do acelerador MX estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades típicas do adesivo Lord Maxloc® T18

	<i>Lord Maxloc (TM) T18</i>	<i>Acelerador MX</i>
Viscosidade (Pa.s)	17000-32000	9000-15000
Densidade (kg/m ³)	1400	1050
Tempo de trabalho (min)	-	14-24
Tempo para manuseamento (min)	-	48-72
Resistência a Tração (MPa)	-	19,3
Elongação	-	>10%
Módulo de Young (MPa)	-	750

Fonte: Lord Corporation, (2011).

3.2 Os substratos

Para a caracterização dos substratos, foram realizados ensaios de tração seguindo a norma ASTM E 8M – 04 e a avaliação da rugosidade. Os substratos foram selecionados com base em uma consulta realizada junto a indústrias.

3.2.1 O substrato de aço

O aço utilizado é o SAE 1020, possui espessura de 2mm fabricado pela Arcelor Mittal e composição química conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Composição química do substrato de aço.

<i>Elemento</i>	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>Si</i>
Percentual	0,18-0,23	0,30-0,60	<0,030	<0,05

Fonte: Arcelor Mittal, (2014).

As propriedades mecânicas do material estão dispostas na Tabela 7. Os dados foram obtidos através da realização de ensaio de tração realizados no laboratório de ensaios mecânicos da Universidade de Passo Fundo em um equipamento universal de ensaio de

tração, Marca: Schenck, Modelo UPM 200 com capacidade de 200kN. Os dados apresentados são as médias dos valores obtidos após a realização de cinco ensaios.

Tabela 7 – Propriedade mecânicas do substrato de aço.

Número de ensaios	5
Tensão máxima	390,4 MPa
Tensão de escoamento	286,6 MPa
Deformação	29%

Fonte: Autor.

3.2.2 O substrato de alumínio

A liga de alumínio empregada foi a AL 5052-0, com espessura de 2mm, fabricada pela Votorantim Metais. A composição química da liga está descrita na Tabela 8.

Tabela 8 – Composição química do substrato de alumínio.

<i>Elemento</i>	<i>Cu</i>	<i>Si+Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Cr</i>	<i>Al</i>
Percentual	0,10	0,45	0,10	2,2/2,8	0,10	0,15/0,35	Balanço

Fonte: Votorantim Metais, (2014).

As propriedades mecânicas do material estão dispostas na Tabela 9 e foram obtidas através da realização de cinco ensaios de tração realizados laboratório de ensaios mecânicos da Universidade de Passo Fundo no mesmo equipamento onde os substratos de aço foram ensaiados .

Tabela 9 – Propriedade mecânicas do substrato de Alumínio.

Número de ensaios	5
Tensão máxima	157 MPa
Tensão de escoamento	151 MPa
Deformação	21 %

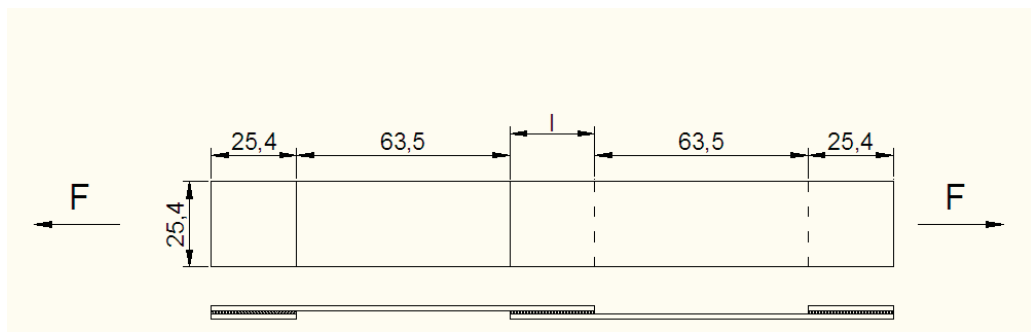
Fonte: dados primários.

3.3 Método estático

Um dos métodos mais usados para caracterizar uma junta de sobreposição simples é o ensaio de tração. Em muitas aplicações de adesivos, os substratos a serem unidos estão em condições de sobreposição, o que justifica sua frequente aplicação (FERREIRA et al., 2010). Outro fator relevante é que esse é um método simples, barato e pode ser realizado em máquinas de ensaio de tração universais.

O ensaio é regulamentado pelas normas ASTM D1002-99, ISO 4587-99 ou similares. A norma ASTM D1002-99 sugere um corpo de prova conforme o desenho da Figura 22, e que a velocidade de tracionamento seja de 1,3mm/min.

Figura 22 – Geometria do corpo de prova para ensaio de tração de junta adesivada de sobreposição simples conforme ASTM D 1002-01.



Fonte: ASTM D 1002-99.

O ensaio consiste na aplicação de forças de tração longitudinais nas extremidades do corpo de prova (ver Figura 22). Nas extremidades do corpo de prova, são colados calços com o intuito de atenuar o desalinhamento gerado pela geometria do corpo de prova. De acordo com a norma ASTM D 1002-99 o ensaio em junta de sobreposição simples pode ser utilizado em estudos comparativos entre adesivos desde que haja uma uniformização dos outros parâmetros que podem influenciar na resistência da junta. O resultado é expresso pela tensão média de cisalhamento τ à qual é definida como:

$$\tau = \frac{F}{l \cdot b} \quad (3)$$

Onde F é a força máxima aplicada, l é comprimento de sobreposição b é a largura da união adesivada.

Segundo Silva et al. (2007), é consensual que tensão média de corte τ não permite determinar nenhuma propriedade intrínseca do adesivo ou da própria junta.

Os fatores analisados estiveram sempre relacionados à geometria dos substratos, ou seja, os fatores relativos ao adesivo, como tipo, tempo de cura, temperatura de cura entre outros foram mantidos constantes.

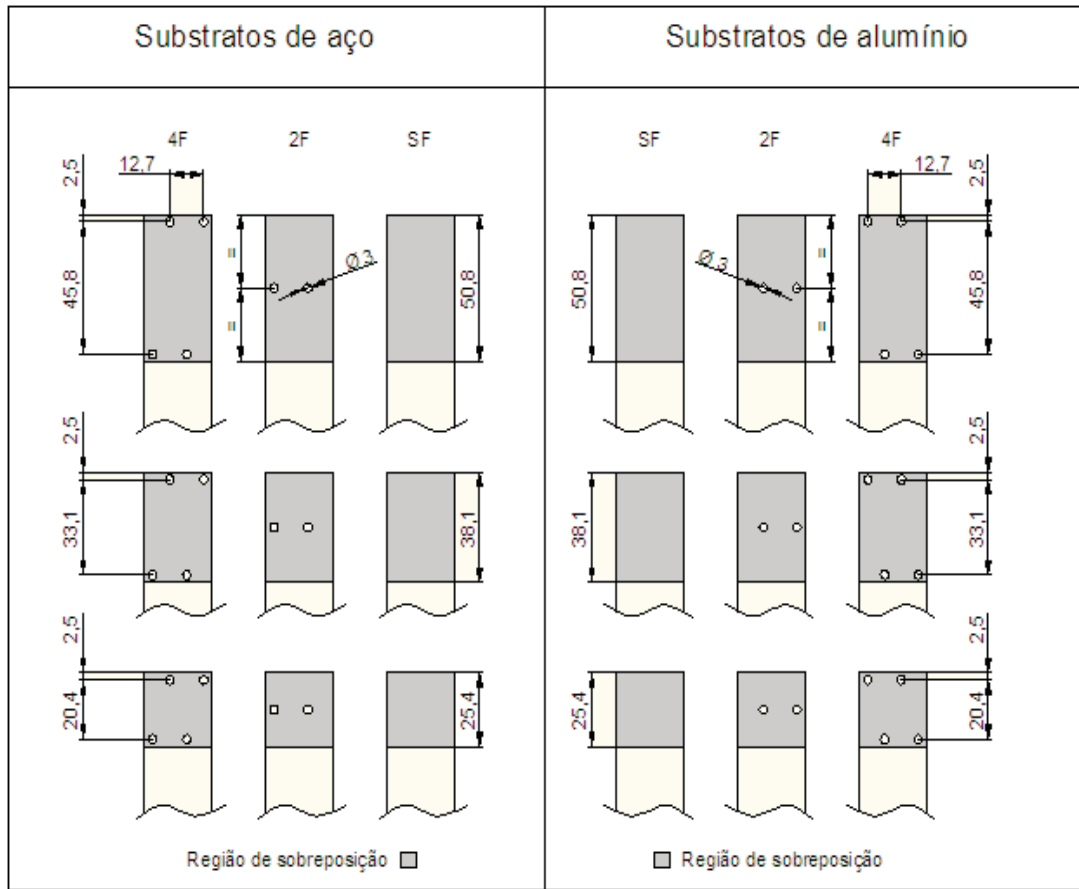
3.3.1 Geometria do substrato

Foram selecionadas três configurações ou tratamentos para avaliar a influência da presença de furos na região de sobreposição, conforme a Figura 23, sendo uma sem a presença de furos denominada configuração SF, uma com dois furos na região central, denominada configuração 2F, e a terceira com dois furos em cada extremidade da junta, totalizando quatro furos por substrato, denominada 4F. Todos os furos em todas as configurações possuem diâmetro de 3mm e ambos os substratos recebem os furos dispostos conforme Figura 23.

Outro fator analisado foi a possibilidade de iteração entre o comprimento de sobreposição e a presença de furos, com o objetivo de determinar se é possível ou não extrapolar essa proposta de alternativa aos tratamentos de superfície convencionais para juntas com diferentes comprimentos.

Para a definição de qual comprimento de sobreposição seria analisado, recorreu-se à literatura e foi observado que, em um grande número de trabalhos envolvendo união adesivada de sobreposição simples, o comprimento estudado variava entre uma a duas polegadas. Após o levantamento dessa informação, foi realizada uma consulta junto a indústrias utilizadoras de adesivos, tendo sido constatado que o comprimento médio de sobreposição era de quarenta milímetros. Adotou-se, então, os comprimentos de 25,4mm, 38,1mm, e 50,8mm. A largura da junta estudada foi adotada em função da informação constante na norma ASTM D1002-99, que sugere uma largura de 25,4mm, conforme Figura 23, onde cada uma das configurações está representada.

Figura 23 – Geometria dos substratos na região adesivada.



Fonte: Autor.

3.3.2 O planejamento do experimento

Segundo Montgomery e Runger, (2003), quando vários fatores são de interesse em um experimento, um planejamento fatorial de experimento deve ser adotado. Em um experimento fatorial, a cada tentativa ou réplica testada, todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são investigados.

Em função do número de fatores que neste caso são o comprimento de sobreposição com três níveis e a presença de furos que também possui três níveis, surge um experimento fatorial 3^2 . Para a determinação do número de réplicas foi necessário estimar o desvio padrão da tensão média de cisalhamento τ .

Para isso, foram realizados seis ensaios com corpos de prova em acordo com a norma ASTM D1002-99, comprimento de sobreposição de 25,4mm, sem furos na região de sobreposição. O desvio padrão calculado para a tensão média de cisalhamento foi de 0,449MPa.

O número de réplicas foi determinado com o auxílio do *software* estatístico, sendo o número de réplicas determinado foi de cinco.

3.3.3 Confeção dos corpos de prova

Os substratos utilizados nos ensaios de tração foram confeccionados de acordo com a norma ASTM D1002-99. O seccionamento e a furação foram realizados através do processo de corte por jato de água, junto ao Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do RS, vinculado à Universidade de Passo Fundo, Campus Soledade.

O corte com jato de água consiste no corte de materiais com água a extrema pressão, combinando-a com a incorporação de material abrasivo, tais como o carbetto de silício.

Nesse processo de corte, a água é pressurizada a uma pressão entre 2.500 e 3.000bar e um jato é direcionado sobre a superfície do material a ser cortado, conforme Figura 24, com um fluxo de água entre 20 e 40 litros por minuto, incorporando ao jato o material abrasivo. O corte produzido por esse processo apresenta baixo índice de empenamento, pouca rebarba e a ausência de região termicamente afetada.

Figura 24 – Corte por jato de água.



Fonte: Autor.

Para assegurar a homogeneidade da rugosidade dos corpos de prova, todos foram obtidos no sentido de laminação das chapas e, logo após a retirada dos mesmos da máquina, uma fina camada de óleo foi aplicada com o intuito de atenuar a oxidação.

Como citado na revisão bibliográfica, a rugosidade da superfície tem papel fundamental na ancoragem mecânica do adesivo junto à superfície, conseqüentemente no seu comportamento mecânico. Para controle da rugosidade dos substratos, o processo de medição de rugosidade foi realizado em todos os corpos de prova com o rugosímetro disposto na Figura 25, modelo TR 200 marca Time®, sendo as estatísticas dos dados obtidos dispostas na Tabela 10.

Tabela 10 – Rugosidade Ra (μm) dos substratos.

<i>Variável</i> <i>Ra</i>	<i>n</i>	<i>Média</i> (μm)	<i>Desvio Pad.</i> (μm)	<i>Min.</i> (μm)	<i>Máx.</i> (μm)
SF aço	15	0,751	0,021	0,519	0,880
SF alumínio	15	0,398	0,043	0,324	0,445
2F aço	15	0,690	0,022	0,591	0,877
2F alumínio	15	0,409	0,038	0,336	0,453
4F aço	15	0,703	0,026	0,585	0,858
4F alumínio	15	0,403	0,039	0,333	0,447

Fonte: Autor.

Figura 25 – Rugosímetro TR200.



Fonte: Autor.

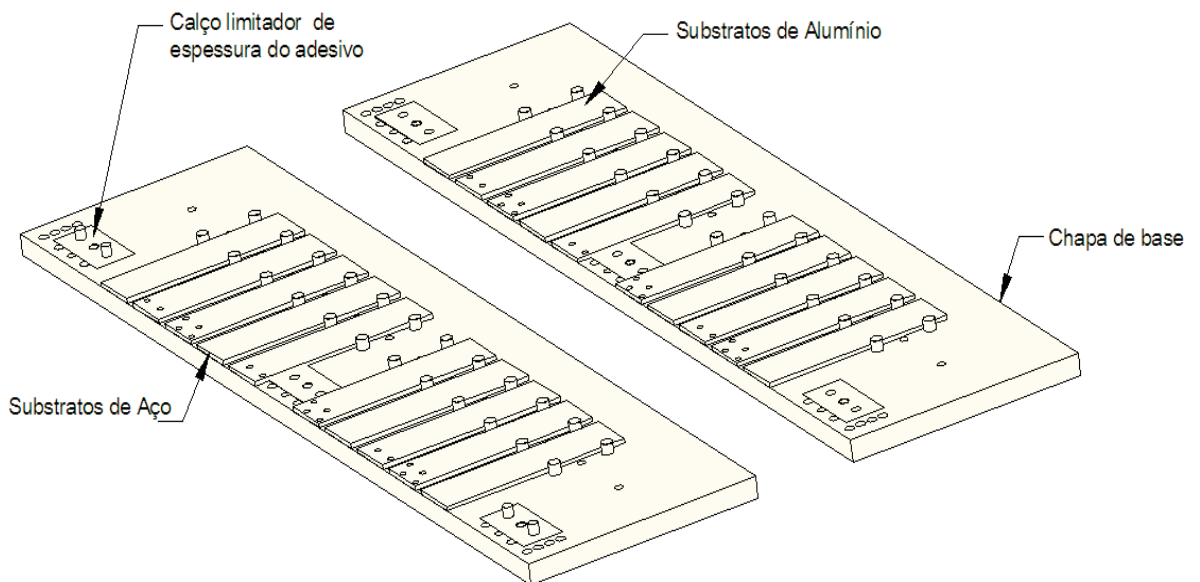
Para a montagem dos corpos de prova com precisão, de modo a garantir uma homogeneidade dos parâmetros como, comprimento de sobreposição, espessura da camada adesiva, alinhamento horizontal e transversal, um dispositivo para a montagem das juntas foi projetado e fabricado conforme Figuras 26 e 27.

Antes de se iniciar a montagem ou a colagem das amostras, os substratos foram limpos, para remoção de óleo e de outras impurezas da superfície. O processo de limpeza

adotado consistiu unicamente na limpeza das partes a serem unidas com estopa de algodão e álcool isopropílico.

Para garantir um experimento inteiramente casualizado, os substratos são posicionados sobre a chapa denominada “chapa base” representada na Figura 26, em uma sequência pré-determinada (conforme Figura 26) visando à distribuição homogênea do fator presença de furos durante o processo de fabricação das juntas. Isso evita que todas as peças de uma mesma combinação de fatores possa se beneficiar de algum fator descontrolado e desconhecido, como, por exemplo, um desvio dimensional não constatado no dispositivo.

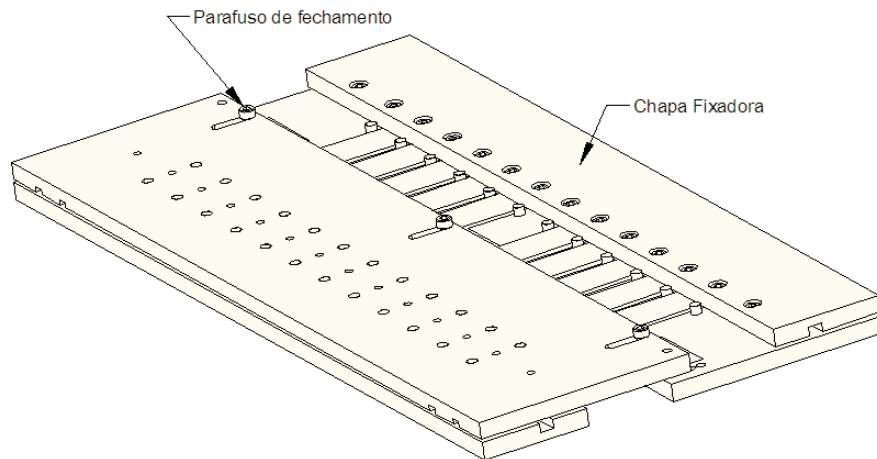
Figura 26 – Dispositivo para confecção de juntas adesivadas de sobreposição simples aberto.



Fonte: Autor.

Conforme descrito na revisão bibliográfica, a espessura da camada adesiva é um fator que possui grande influência na resistência mecânica da junta produzida. Juntas com a espessura entre 0,2mm e 0,3mm apresentam maior resistência mecânica (ARENAS et al., 2010). Para controlar a espessura da camada adesiva, foi utilizado um sistema de calços demonstrado na Figura 26, que limita a distância entre as duas chapas base, gerando uma espessura de camada adesiva precisa e uniforme.

Figura 27 – Dispositivo para confecção de juntas adesivadas de sobreposição simples fichado.



Fonte: Autor.

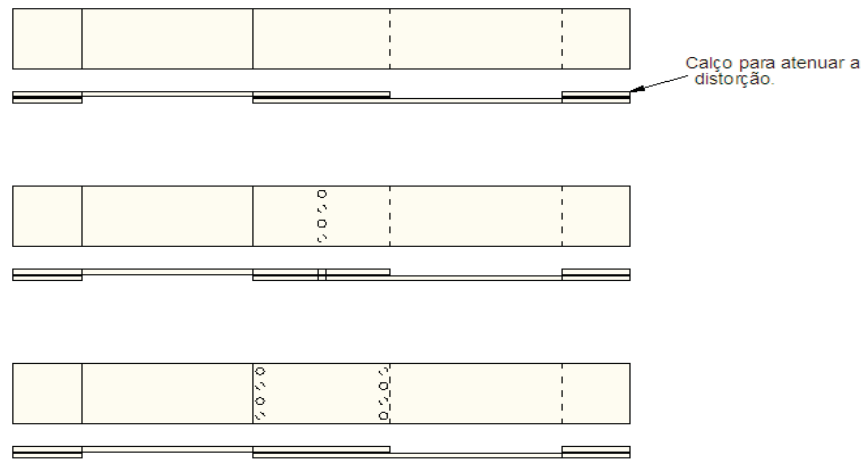
Após a distribuição alternada das peças sobre a chapa base e o ajuste dos calços que irão definir a espessura da camada adesiva, uma segunda chapa, denominada chapa fixadora (Figura 27) é posicionada junto aos corpos de prova com o intuito de garantir que eles não se movam durante o processo de aplicação do adesivo e do fechamento do dispositivo. Com as peças fixas, é aplicado o adesivo em ambos os substratos para que somente então o dispositivo seja fechado e as partes entrem em contato.

Para evitar a adesão das peças ao dispositivo, uma fita adesiva foi aplicada na superfície da chapa base. Por consequência, não foi necessário o uso de produto desmoldante.

Para atenuar a tendência de distorção quando o corpo de prova é submetido ao carregamento de cisalhamento, foram inseridos calços da mesma espessura do material que está sendo unido, conforme representado na Figura 28. Esses calços são inseridos na extremidade do corpo de prova, região onde a garra fixadora da máquina de tração irá entrar em contato.

Tanto no processo de fabricação quanto no processo de cura e realização dos ensaios, a temperatura foi controlada. O tempo aguardado para remover as peças do dispositivo (*handling time*) foi de duas horas e o tempo de cura foi de aproximadamente 72 horas.

Figura 28 – Calços para redução da distorção.



Fonte: Autor.

Após a confecção dos corpos de prova, todos foram medidos para controle da espessura da camada adesiva e as estatísticas dos valores obtidos estão dispostas na Tabela 11. Para as dimensões de comprimento de sobreposição e largura da junta, adotou-se uma tolerância de 0,2mm, de acordo com a norma ASTM D1002-99, sendo descartados os corpos com dimensões fora do intervalo estabelecido.

Tabela 11 – Espessura da camada adesiva dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração.

<i>Variável</i>	<i>n</i>	<i>Média (mm)</i>	<i>Desvio Pad. (mm)</i>	<i>Min. (mm)</i>	<i>Máx. (mm)</i>
Espessura SF	15	0,290	0,030	0,24	0,34
Espessura 2F	15	0,282	0,035	0,22	0,34
Espessura 4F	15	0,291	0,034	0,24	0,32

Fonte: Autor.

3.3.4 Ensaios de tração

Os ensaios de tração foram realizados com equipamento EMIC DL3000, representado na Figura 29 que está instalado junto ao Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Federal Sul-Rio-Grandense, campus Passo Fundo, o qual possui célula de carga de 30kN. Os parâmetros de ensaio, assim como a configuração geométrica da junção, foram baseados na

norma ASTM D1002-99. A velocidade de tracionamento utilizada foi de 1,3mm/min e o comprimento de fixação das chapas nas garras de 25,4mm.

Os corpos de prova foram cuidadosamente fixados e alinhados em sentido paralelo à direção de tração, tendo-se utilizado como referência para o alinhamento as garras da EMIC DL 3000 com o uso de esquadro.

Não foi utilizado extensômetro externo ao equipamento de teste, o deslocamento foi medido pela própria máquina pela medição do deslocamento de cabeçote.

Com os resultados dos ensaios, foi possível determinar a tensão de escoamento, a força de ruptura e a deformação.

Figura 29 – Equipamento de ensaio de tração EMIC DL 3000.



Fonte: EMIC.

Para assegurar a aleatoriedade dos ensaios, foi realizado um sorteio para determinar a sequência em que seriam realizados os ensaios.

3.4 Método dinâmico

A presença de furos na região de sobreposição pode provocar mudança no comportamento em fadiga de uniões adesivadas de sobreposição simples. Como já referido anteriormente, os furos agirão como concentradores de tensão, podendo provocar uma mudança na vida em fadiga da junta. Segundo Ferreira et al. (2010), o comportamento de uma

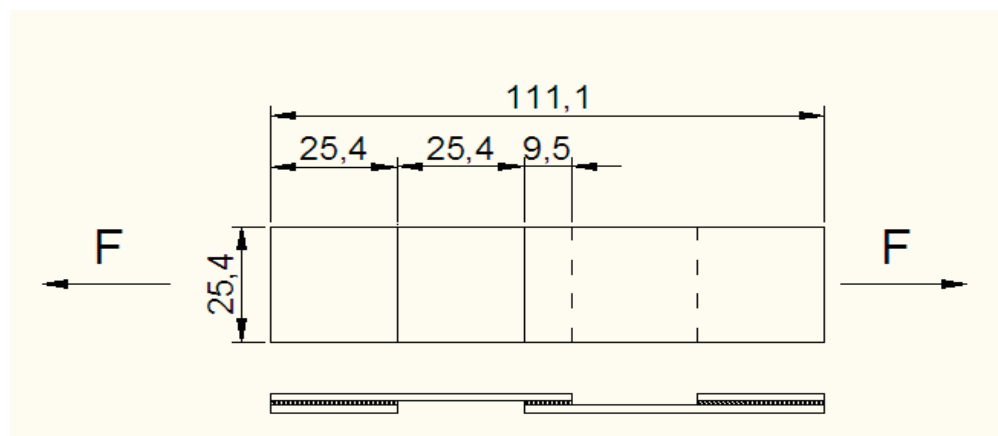
junta adesivada, quando solicitada em carregamento dinâmico, é influenciado pelas propriedades mecânicas do adesivo e pela geometria da junta, sendo o último o mais influente.

Segundo Pizzi e Mittal, (2003), os fatores que regem o comportamento de uma junta ao carregamento cíclico são fundamentalmente a geometria da junta e o tipo do adesivo. Com o intuito de representar o comportamento ao carregamento cíclico de uma junta adesivada, ensaios são realizados e um diagrama da carga aplicada *versus* o número de ciclos que levou a junta à fratura é elaborado. O diagrama é denominado diagrama S-N, ou curva de Wöhler, em homenagem ao engenheiro alemão que se dedicou ao estudo do fenômeno de fadiga.

A norma ASTM D3166-99 descreve o procedimento a ser realizado para a avaliação do comportamento à fadiga de juntas adesivadas de sobreposição simples. Segundo a norma, devem ser selecionados cinco ou mais níveis de tensão a serem aplicadas de modo que a falha ocorra num intervalo de no mínimo 2000 ciclos e no máximo de 10 milhões de ciclos. E, para cada um dos níveis de tensão, devem ser realizados pelo menos cinco repetições. Como referência inicial, a norma sugere 50% da tensão do limite de resistência à tração da união.

O corpo de prova deve ser apropriadamente fixado com um comprimento mínimo preso à garra de 25,4mm. Um bom alinhamento do corpo de prova deve ser realizado para que não haja um desvio das forças aplicadas superior a 2%. Para facilitar o alinhamento do corpo de prova nas garras da máquina, são colocados calços, conforme Figura 30, que devem ter comprimento mínimo de 25,4mm.

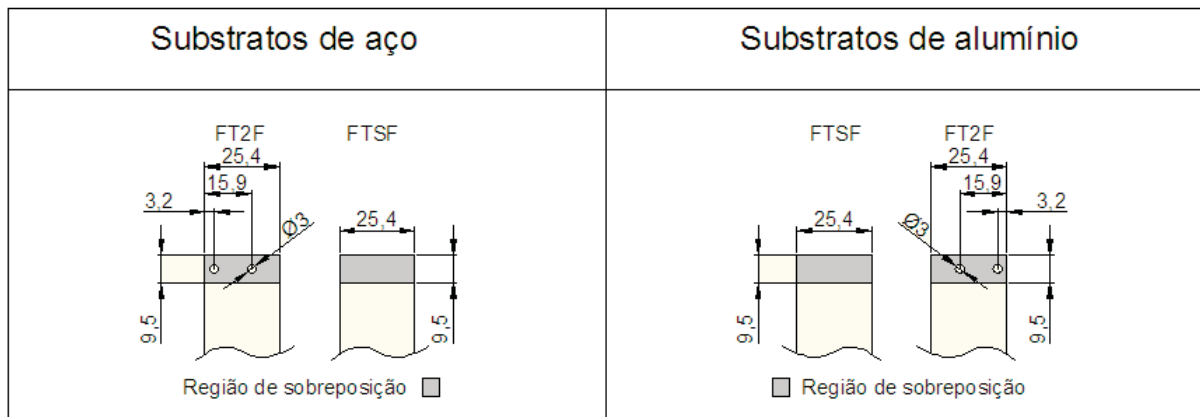
Figura 30 – Corpo de prova para ensaio de fadiga segundo ASTM D3166-99.



Fonte: Autor.

Duas configurações de junta foram avaliadas conforme Figura 31. Uma delas não apresenta furos e é denominada FSF (fadiga sem furo); outra possui dois furos na região de sobreposição, denominada F2F (fadiga 2 furos). O comprimento de sobreposição adotado foi o de 9,5 mm e largura de 25,4mm, baseados na sugestão da norma ASTM D3166-99.

Figura 31 – Descrição da região de sobreposição das juntas submetidas ao ensaio de fadiga.



Fonte: Autor.

Para a determinação da carga a ser aplicada nos ensaios de fadiga, foram realizados ensaios de tração para cada configuração de superfície com comprimento de sobreposição de 9,5mm e largura 25,4mm, seguindo a norma ASTM D1002-99, e, a partir da força máxima aplicada durante os ensaios de tração, foram determinadas as forças máximas usadas no ensaio de fadiga. O procedimento e os dispositivos usados na confecção dos corpos de prova são os mesmos descritos no capítulo 3.3 (Método Estático). Os ensaios de tração desta fase do experimento foram realizados no equipamento EMIC DL 3000, do Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Federal Sul-Rio-Grandense.

Os ensaios para determinação das curvas S-N seguem todas as recomendações feitas pela norma ASTM D3166-99, dela divergindo em apenas um ponto: o número de réplicas. A norma sugere um número de réplicas igual ou superior a cinco para cada nível de carregamento. Neste trabalho, em função da disponibilidade de tempo do equipamento para a realização dos ensaios e de recursos financeiros, o número de réplicas foi reduzido para três.

Segundo Ferreira et al. (2010), a frequência tem grande influência na vida em fadiga de uma união adesivada. A máxima frequência utilizada está atrelada à condutividade térmica do substrato e do adesivo, do comprimento de sobreposição, largura e espessura dos

substratos e da intensidade de carregamento. A frequência deve ser selecionada de forma que não ocorra aquecimento da junta.

A frequência adotada foi a sugerida pela norma sendo de 30 Hz. Dois testes preliminares com carregamento 70% (0,81 kN) foram realizados com a configuração de junta sem furos e a temperatura monitorada ao longo dos ensaios. Durante a realização dos ensaios, foram realizadas medições de temperatura da junta e do ambiente periodicamente e nenhuma variação significativa de temperatura foi registrada.

Foram realizados ensaios em seis níveis de carregamento, sendo eles 80%, 70%, 60%, 50%, 40%, e de 30%, ou seja, para o nível 80 % (80 % da força máxima suportada pela junta obtida no ensaio de tração), foram realizados 3 ensaios de fadiga com corpos de prova de geometria denominada FSF (fadiga sem furo), em que a força máxima aplicada foi de 0,925kN, e 3 ensaios de fadiga com corpos de prova de geometria denominada F2F (fadiga dois furos), em que a força aplicada foi de 1,145kN.

A forma de carregamento adotada foi a senoidal e $R=0$, onde a força mínima foi sempre a de 0kN e as forças máximas as serão descritas no capítulo resultados (ver figura 47 pg. 75).

Assim como nos ensaios de tração, os fatores geométricos e superficiais como rugosidade, espessura do adesivo e comprimento de sobreposição foram controlados. A Tabela 12 apresenta a estatística da rugosidade medida nos corpos de prova submetidos aos ensaios de fadiga e, neste caso, adotou-se uma tolerância para controle dimensional de $\pm 0,1\text{mm}$. Os corpos de prova que apresentassem dimensões fora da tolerância especificada seriam descartados, mas nenhum deles apresentou dimensões fora das especificações.

Tabela 12 – Estatística da rugosidade dos corpos de prova submetidos ao ensaio de fadiga.

<i>Cód.</i>	<i>n</i>	<i>Média (μm)</i>	<i>Desvio Padrão (μm)</i>	<i>Min. (μm)</i>	<i>Máx. (μm)</i>
Ra Al FSF	18	0,391	0,041	0,289	0,383
Ra Aço. FSF	18	0,662	0,110	0,520	0,854
Ra Al F2F	18	0,456	0,093	0,204	0,467
Ra Aço F2F	18	0,669	0,190	0,509	0,465

Fonte: Autor.

A estatística da espessura da camada adesiva está disposta na Tabela 13, onde é possível observar um bom controle dimensional nos corpos de prova.

Tabela 13 – Espessura da camada adesiva dos corpos de prova submetidos ao ensaio de fadiga.

<i>Cód.</i>	<i>n</i>	<i>Média (mm)</i>	<i>Desvio Pad. (mm)</i>	<i>Min. (mm)</i>	<i>Máx. (mm)</i>
Espessura FSF	18	0,270	0,044	0,22	0,32
Espessura F2F	18	0,294	0,085	0,22	0,38

Fonte: Autor.

O tempo de cura das juntas foi de aproximadamente 72 horas, havendo uma variação para mais devido à variação de tempo de realização dos ensaios.

Os ensaios foram realizados no núcleo de Tecnologia Mecânica da Universidade de Passo Fundo em um equipamento servo hidráulico da marca Shimadzu modelo EHF-EV101K1-Q10-1A, representado na Figura 32.

Figura 32 – Equipamento Shimadzu utilizados na realização dos ensaios dinâmicos.



Fonte: Autor.

A aquisição dos dados e o controle do equipamento foi realizado por equipamento controlador também fabricado pela Shimadzu, modelo Servo Controller 4830.

4 RESULTADOS

Assim como a descrição dos métodos adotados para a realização da caracterização do comportamento mecânico de uniões adesivadas que tange aos objetivos deste trabalho, a apresentação dos resultados também será dividida em duas. A primeira apresenta e discute os resultados obtidos através da utilização do método estático e a segunda apresenta e discute os resultados obtidos nos ensaios dinâmicos.

4.1 Resultados e discussões da análise estática

Os primeiros resultados a serem apresentados são os obtidos nos ensaios de tração realizados para a determinação do desvio padrão, um dado necessário para estimar o número de réplicas. Para isso, foram realizados seis ensaios cujos resultados estão dispostos na Tabela 14.

Segundo norma ASTM D1002-99, o relatório descritivo dos ensaios deve conter no mínimo as seguintes informações: a espessura do substrato utilizado (e_s), a espessura da camada adesiva (e_a), o comprimento de sobreposição (l) e o tipo de fratura. O tipo de fratura é classificado como adesiva (A), quando a fratura ocorre na interface entre substrato-adesivo, coesiva do substrato (Cs), quando a ruptura ocorre no interior do substrato, fratura coesiva no adesivo (Ca), quando se tem ruptura interna do adesivo, ou mista (M).

A nomenclatura adotada para os corpos de provas referentes a essa rodada de ensaio foi a sigla SSF (S= Desvio padrão da amostra, SF= Sem a presença de furos na região de sobreposição) seguida de um número identificador.

Tabela 14 – Resultado dos ensaios de tração realizados para determinar o número de réplicas.

<i>CP</i>	<i>Nf</i>	<i>L</i> (<i>mm</i>)	<i>e_a</i> (<i>mm</i>)	τ (<i>MPa</i>)	<i>Falha</i>
SSF-1	SF	25,4	0,34	6,57	Ca
SSF-2	SF	25,4	0,28	7,18	Ca
SSF-3	SF	25,4	0,30	7,14	Ca
SSF-4	SF	25,4	0,24	6,82	Ca
SSF-5	SF	25,4	0,30	5,97	Ca
SSF-6	SF	25,4	0,28	6,93	Ca
Média	-	-	0,296	6,77	-
Desvio	-	-	0,038	0,450	-

Fonte: Autor.

Onde $Nf=n^\circ$ furos, L = comprimento de sobreposição, e_a =espessura da camada adesiva, τ = tensão média de cisalhamento, Falha: Ca = coesiva do adesivo, Cs = Coesiva do substrato. M= mista, A = adesiva

Na Tabela 14, a segunda coluna refere-se ao número de furos (Nf) na região de sobreposição. Neste caso, adotou-se somente a configuração sem furos (SF). Como pode ser visto na Tabela 14, a falha foi predominantemente do tipo Ca, ou seja, coesiva do adesivo.

Os resultados apresentados na Tabela 14 foram os primeiros ensaios realizados. A partir deles, foi determinado o volume de cola a ser aplicado e se o procedimento de distribuição da cola ao longo da junta era satisfatório. Como é observável na Figura 33, o adesivo ficou bem distribuído sem a presença de falha ou vazios ao longo da junta.

Figura 33 – Fratura do corpo de prova SSF-3.



Fonte: Autor.

Os demais resultados dos ensaios estáticos foram divididos em três grupos em função do comprimento de sobreposição, apresentados nas Tabelas 15,16 e 17. Na Tabela 15 estão apresentados os resultados dos corpos de prova que possuíam 25,4mm de comprimento de sobreposição. Na Tabela 16 os que possuíam 38,1mm e na Tabela 17 os com 50,8mm de comprimento de sobreposição. Os valores apresentados nas colunas e_a (espessura da camada adesiva), τ (tensão média cisalhante de ruptura) e Def. (deformação) representam as médias e desvios padrões obtidos nos cinco ensaios.

Tabela 15 – Resultado dos ensaios de tração dos corpos de prova que possuíam 25,4mm de comprimento de sobreposição.

	N_f	l (mm)	e_a (mm)	τ (MPa)	Def. (mm)
Média	SF	25,4	0,28	6,97	1,31
Desvio	-	-	0,03	0,55	0,24
Média	2F	25,4	0,29	7,81	1,36
Desvio	-	-	0,03	0,72	0,19
Média	4F	25,4	0,28	5,84	0,93
Desvio	-	-	0,03	1,05	0,24

Fonte: Autor.

Onde $N_f=n^\circ$ furos, L = comprimento de sobreposição, e_a =espessura da camada adesiva, τ = tensão média de cisalhamento

Nas amostras com 25,4mm de sobreposição sem furos, a fratura foi do tipo coesiva do adesivo em três amostras e a falha foi do tipo mista entre coesiva do adesivo e coesiva do substrato em duas, sendo mista nos corpos de prova SF-25,4-1, e SF-25,4-5, o que está representado na Figura 34.

Conforme descrito ne Figura 34, o substrato de aço apresenta uma camada oxidada, camada não removida antes da aplicação do adesivo o que influenciou o comportamento mecânico da junta.

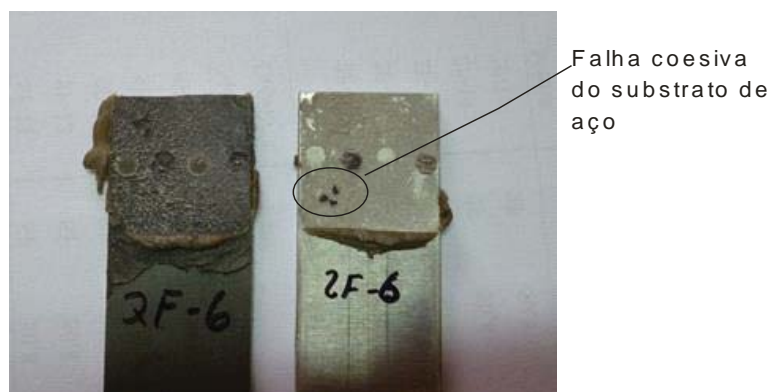
Figura 34– Corpo de prova SF-25,4-5, falha do tipo mista entre falha coesiva do adesivo e falha coesiva do substrato.



Fonte: Autor.

Nos corpos de prova com inserção de dois furos, a falha foi predominantemente do tipo coesiva do adesivo, com exceção da amostra 2F-25,4-5 representada na Figura 35, onde a falha foi do tipo mista entre falha coesiva do adesivo e falha coesiva do substrato, sendo que o desprendimento da camada oxidada se deu em áreas menores quando comparado às amostras do grupo onde não havia furos.

Figura 35 – Falha do tipo coesiva do substrato no corpo de 2F-25,4-5.



Fonte: Autor.

Em nenhuma das configurações de junta com comprimento de 25,4mm ocorreu falha do tipo adesiva, o que comprova que existe uma compatibilidade entre adesivo selecionado e o substrato, que o processo de limpeza das peças foi realizado de maneira adequada e que o espalhamento do adesivo foi realizado de forma eficiente.

A Tabela 15 apresenta os resultados dos corpos de prova com comprimento de sobreposição de 38,1mm, em que o tipo de falha foi coesiva do adesivo na maioria casos com

uma única exceção, o corpo de prova com dois furos 2F-38,1-9, que apresentou falha do tipo mista entre coesiva do adesivo e coesiva do substrato.

Tabela 16 – Resultado dos ensaios de tração dos corpos de prova que possuíam 38,1mm de comprimento de sobreposição.

	N_f	l (mm)	e_a (mm)	τ (MPa)	$Def.$ (mm)
Média	SF	38,1	0,30	6,68	1,52
Desvio	-	-	0,03	2,06	0,23
Média	2F	38,1	0,28	7,54	1,67
Desvio	-	-	0,04	0,91	0,28
Média	4F	38,1	0,29	5,24	1,44
Desvio	-	-	0,02	1,63	0,46

Fonte: Autor.

Em que $N_f=n^\circ$ furos, L = comprimento de sobreposição, e_a =espessura da camada adesiva, τ = tensão média de cisalhamento.

Os substratos de alumínio com comprimento sobreposto de 38,1mm não apresentaram falha coesiva, mas houve uma intensa deformação plástica provocando a curvatura dos mesmos.

A falha coesiva do substrato de alumínio ocorreu em quatro substratos com comprimento de sobreposição igual a 50,8mm. A Figura 36 apresenta três corpos de prova cuja falha foi coesiva do substrato de alumínio.

Figura 36 – Falha coesiva do alumínio.



Fonte: Autor.

A Tabela 16 apresenta os demais dados referentes aos ensaios realizados com corpos de prova de comprimento de junta de 50,8mm. Assim como nos corpos de prova de 38,1mm, a deformação plástica na região de contato foi bastante intensa.

Tabela 17 – Resultado dos ensaios de tração dos corpos de prova que possuíam 50,8mm de comprimento de sobreposição.

	N_f	l (mm)	e_a (mm)	τ (MPa)	Def. (mm)
Média	SF	50,8	0,29	6,08	2,82
Desvio			0,01	0,85	1,50
Média	2F	50,8	0,27	6,11	2,84
Desvio			0,02	1,19	1,17
Média	4F	50,8	0,29	5,27	2,26
Desvio			0,04	1,21	0,63

Fonte: Autor.

Em que $N_f = n^\circ$ furos, $L =$ comprimento de sobreposição, $e_a =$ espessura da camada adesiva, $\tau =$ tensão média de cisalhamento.

4.2 Análise estatística

Os resultados experimentais das tensões médias cisalhantes de ruptura obtidas nos ensaios de tração foram submetidos ao método de Planejamento Fatorial. Para auxílio do

processamento dos dados, foi utilizado o *software* estatístico Sisvar pelo qual se verificou se há ou não diferença significativa entre os tratamentos e se há interação entre eles a um nível de significância de 5%.

Tabela 18 – Resultados do experimento fatorial.

Experimento Fatorial Multinível						
Fatores :	2	Réplicas :	5			
Tratamentos:	9	N. ensaios	45			
Número de níveis: 3; 3						
Modelo linear geral: Tensão versus Comp. Sobreposição; Furos						
Fator	Tipo	Nível	Valores			
Comp. Sobre.	fixo	3	25,4mm; 38,1mm; 50,8mm			
Furos	fixo	3	SF; 2F; 4F			
Análise da variância para tensão						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Comp. Sobre.	2	8,475	8,475	4,238	2,86	0,070
Furos	2	22,403	22,403	11,201	7,55	0,002
Comp. Sobre.*Furos	4	3,034	3,034	0,758	0,51	0,728
Erro	36	53,385	53,385	1,483		
Total	44	87,296				
S = 1,21775 R-Sq = 38,85% R-Sq(adj) = 25,26%						
Observações usuais para tensão						
Obs	Tensão	Fit	SE Fit	Residual	St Resid	
4	3,17000	6,68200	0,54459	-3,51200	-3,22 R	

Fonte: Autor.

A análise estatística apresentada na Tabela 17 identifica que a interação entre os fatores presença de furos e comprimento de sobreposição não foi significativa ($P=0,728$) a um nível de significância de 5%, e que as médias da tensão de cisalhamento de ruptura não apresentam diferença estatística ($P=0,07$) entre os tratamentos com diferentes comprimentos de sobreposição.

Apenas o efeito do fator presença de furos foi significativo ($P= 0,002$). Para avaliar quais tratamentos deste fator diferenciam-se, foi realizada uma análise de variância e as comparações múltiplas entre as médias com o teste de Tukey são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Anova e teste de Tukey para o fator presença de furos.

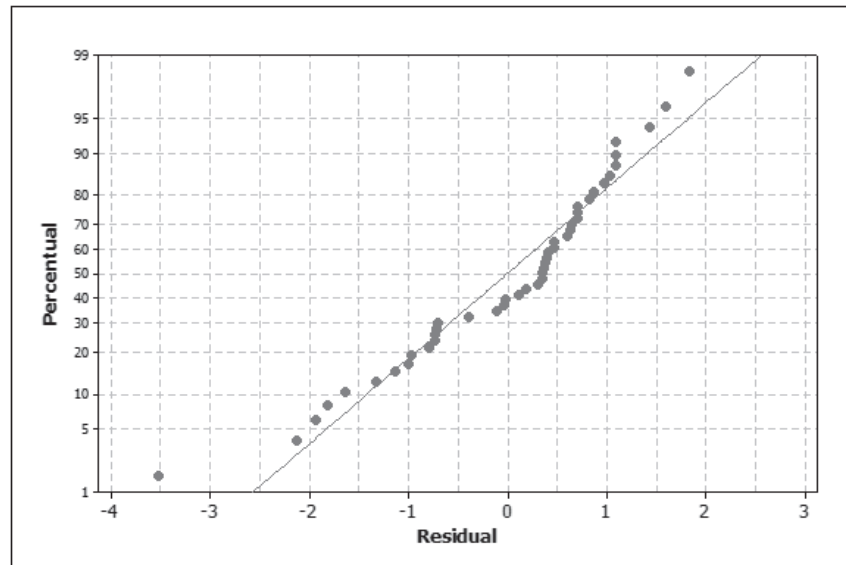
<i>ANOVA: Tensão versus Furos</i>					
Source	DF	SS	MS	F	P
Furos	2	22,40	11,20	7,25	0,002
Erro	42	64,89	1,55		
Total	44	87,30			
S = 1,243 R-Sq = 25,66% R-Sq(adj) = 22,12%					
Nível de Significância 5%					
Nível	N	Média	StDev	+-----+-----+-----+-----	
SF	15	6,581	1,290	(-----*-----)	
2F	15	7,155	1,179	(-----*-----)	
4F	15	5,456	1,258	(-----*-----)	
				+-----+-----+-----+-----	
				4,80	5,60
				6,40	7,20
Teste de Tukey					
Furos	N	Média	Grupo		
2F	15	7,155	A		
SF	15	6,581	A		
4F	15	5,456	B		
Grupo que não divide a mesma letra é estatisticamente diferente					

Fonte: Autor.

Entre as condições de superfície sem furo e com dois furos, não houve diferença significativa de acordo com o teste de Tukey apresentado na Tabela 18. Já a média das tensões de ruptura onde quatro furos foram inseridos apresentou diferença em relação aos outros tratamentos, sendo esta a pior condição.

A verificação da adequação do modelo foi feita através da análise do resíduo. Para isso, foi traçado o gráfico de probabilidade normal disposto na Figura 37, em que é possível observar que a distribuição da tensão de cisalhamento se aproxima satisfatoriamente da distribuição normal.

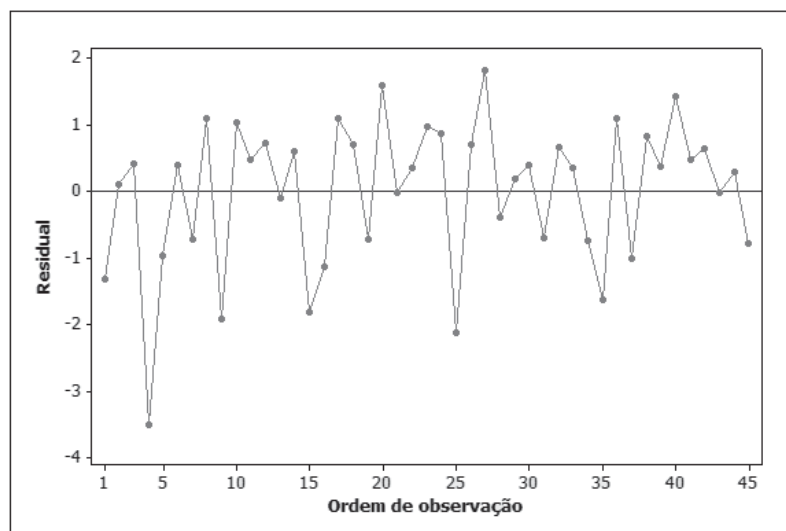
Figura 37 – Probabilidade normal dos resíduos.



Fonte: Autor.

Para avaliar a distribuição da tensão de cisalhamento ao longo dos ensaios e garantir que o delineamento tenha sido inteiramente casualizado e nenhum fator não controlado possa ter influenciado ao longo do procedimento experimental, foi traçado o gráfico do resíduo ao longo da experimentação, disposto na Figura 38.

Figura 38 – Distribuição do resíduo ao longo dos ensaios.



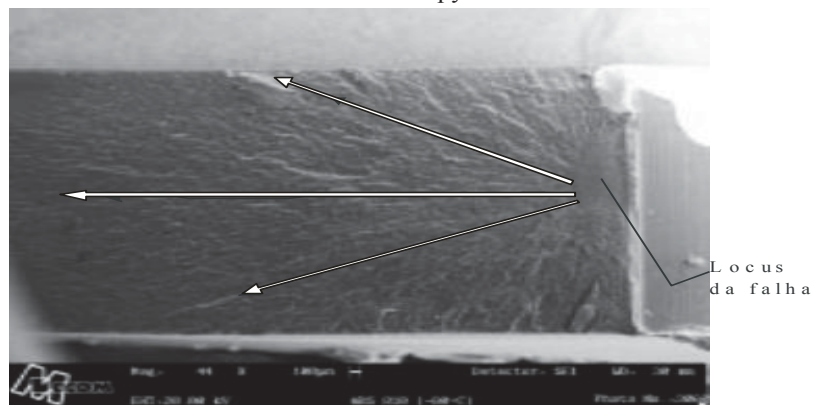
Fonte: Autor.

Para interpretar com mais consistência os resultados obtidos nos ensaios, recorreu-se a uma análise mais aprofundada da fratura ocorrida por meio de uma análise fractográfica.

Um dos principais objetivos da fractografia é analisar as características da fratura e buscar uma relação entre a topografia da superfície fraturada e as causas ou mecanismos básicos que a geraram (DKERLINS, 1987; HULL, 1999; O'BRIEN, 2001, *apud* CAMPOS, 2010).

Segundo Correa et al. (1999), a topografia da fratura dúctil apresenta-se através de regiões cisalhadas. Já na fratura frágil são observadas superfícies lisas ou espelhadas. Através da análise da fratura, pode-se obter informações sobre o modo de fratura. Além disso, a superfície de fratura fornece informações importantes sobre os caminhos de menor energia para propagação da trinca, indicando possíveis falhas, defeitos ou contaminações no material fraturado ou possíveis pontos de concentração de tensões, como pode ser observado na Figura 39.

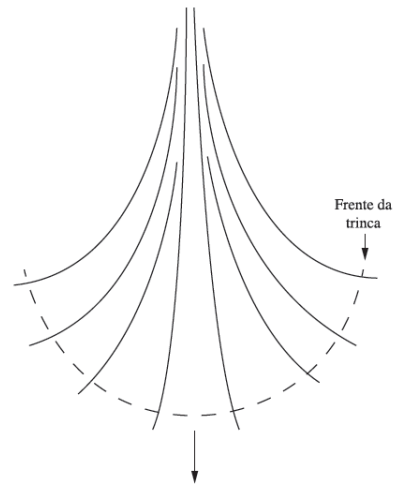
Figura 39 – Fractografia de um copolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) submetido ao ensaio Charpy.



Fonte: Correa et al. (1999).

Cândido et al. (2012), interpretam os caminhos de menor energia por onde a trinca se propaga como linhas de fluxo, afirmando que elas têm uma linha de centro imaginária, onde várias microtrincas caminham para frente em planos levemente diferentes, formando uma modelo com aspecto de pluma, conforme Figura 40.

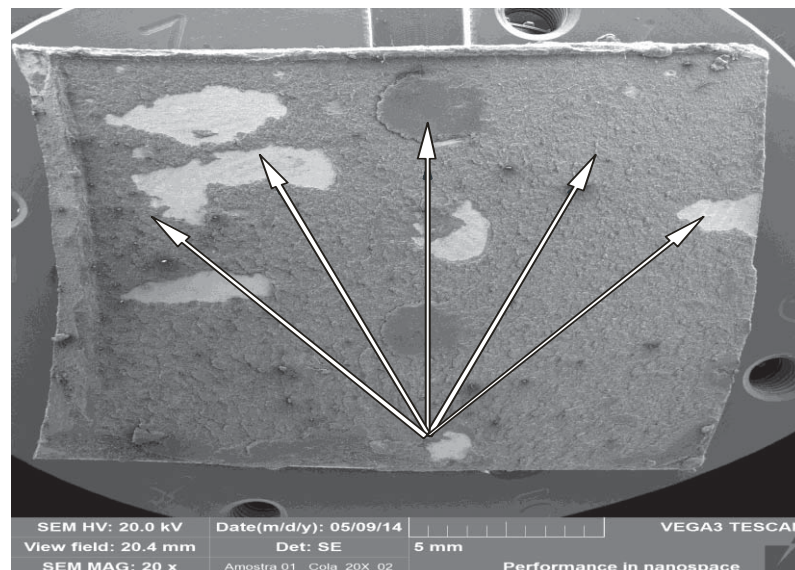
Figura 40 – Representação gráfica de propagação da falha como modelo de pluma.



Fonte: Cândido et al. (2012).

A Figura 41 apresenta imagem da falha do corpo de prova 2F-25,4-5, na qual observam-se as marcas de pluma e com isso determinar a região onde a falha se iniciou.

Figura 41 – Corpo de prova 2F-25,4-5 submetido ao ensaio de tração.

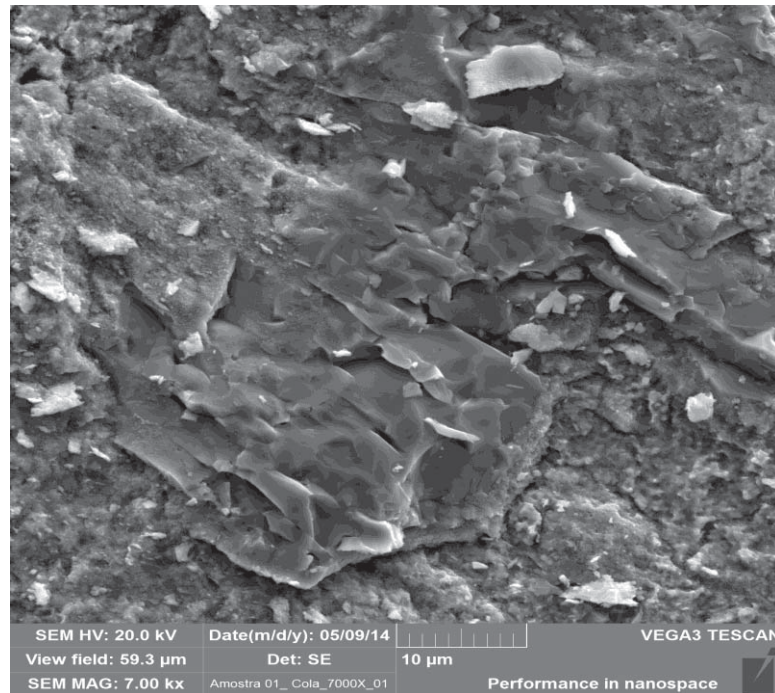


Fonte: Autor.

Segundo Sonza, (2013), existem três regiões envolvendo a fratura. A primeira delas é aqui denominada de Região I, uma região relativamente lisa. Já a segunda (Região II) apresenta uma textura fibrosa e aspecto nebuloso e a Região III é mais heterogênea. A primeira região é a região onde a trinca se propaga a partir de um defeito na origem de fratura.

Como demonstra a Figura 42, a região espelhada no corpo de prova 2F-25,4-5 é a região onde a trinca teve sua origem e ela está em uma posição coincidente com a presença de um furo no substrato. Isso evidencia a influência maléfica do concentrador de tensão provocado pela inserção de furos nos substratos de juntas adesivadas.

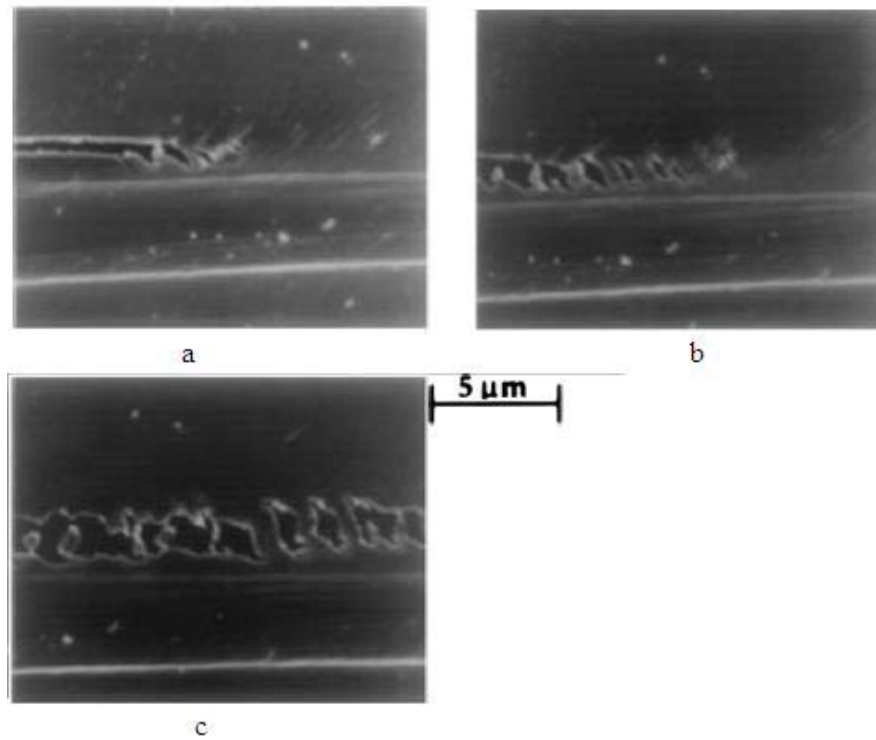
Figura 42 – Região relativamente lisa onde a fratura teve seu início.



Fonte: Autor.

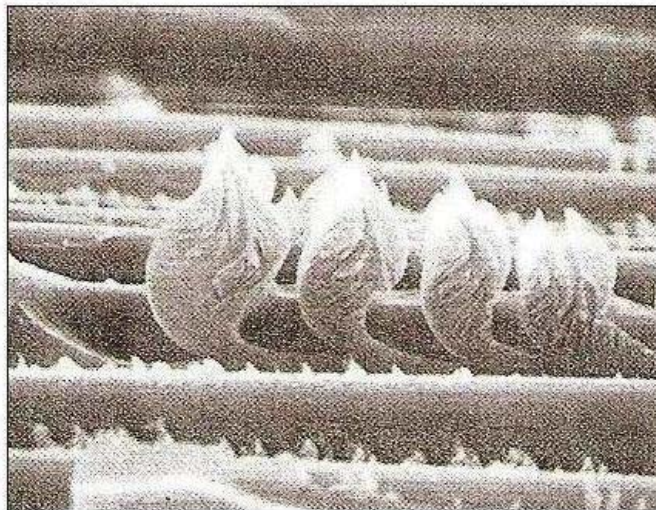
Outro fator que foi possível identificar através da análise da falha foram as condições de carregamento envolvidas. Anderson, (2005), capturou uma sequência de imagens, apresentada na Figura 43, demonstrando a progressão da fratura em materiais poliméricos quando submetidos ao cisalhamento. A Figura 43 (a) apresenta o início da trinca e a deformação no ponto de concentração de tensão, a Figura 43 (b) mostra a formação e coalescimento de microcavidades. Por sua vez, a Figura 43 (c) demonstra quando ocorre o rompimento da última região de ligação, dando origem às chamadas cristas, apresentadas na Figura 44.

Figura 43 – Formação e coalescimento de microcavidades na fratura de polímeros submetidos a carga de cisalhamento.



Fonte: Anderson, (2005).

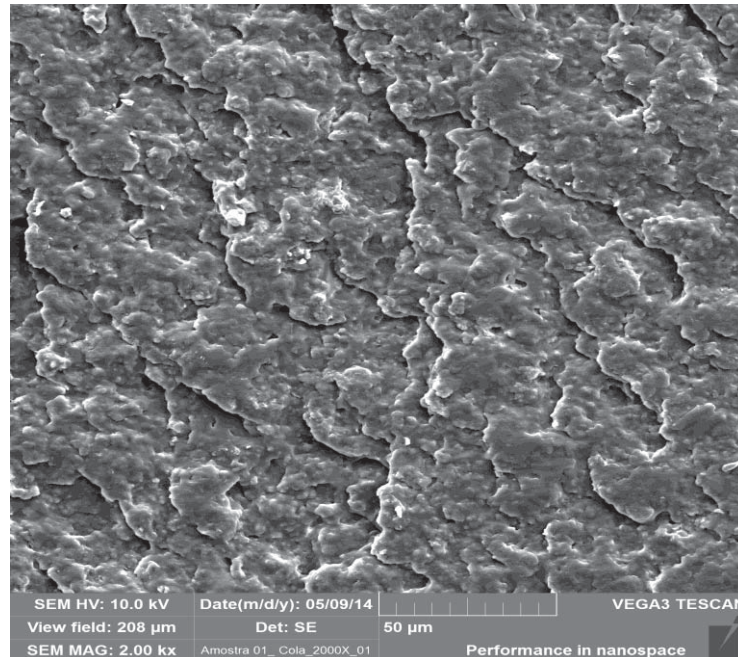
Figura 44 – Falha interlaminar por cisalhamento, cristas de galo na superfície da fratura.



Fonte: Campos, (2010).

A Figura 45 apresenta a Região II da fratura do corpo de prova 2F-25,4-5, em que se pode observar as cristas deformadas pelo escorregamento. O mesmo foi observado por Karachalios et al. (2013), que descobriram, em seus estudos, que a fratura do adesivo se dá pelo desenvolvimento de uma região com intensa deformação plástica.

Figura 45 – Região rugosa da fratura do corpo de prova 2F-25,4-5.



Fonte: Autor.

4.3 Resultados e discussões da análise dinâmica

Para a realização dos ensaios de fadiga, foi necessário antes, a realização de ensaios de tração para a determinação dos carregamentos a serem usados nos ensaios de fadiga, a Tabela 19 apresenta a estatística da rugosidade medida nos corpos de prova submetidos aos ensaios de tração para determinação do carregamento a ser adotado, o critério adotado para controle dimensional foi uma tolerância simétrica de 0,2mm. Os corpos de prova que apresentassem dimensões fora da tolerância especificada seriam descartados. Os corpos de prova foram denominados FTSF (fadiga tração sem furo) e FT2F (fadiga tração 2 furos).

Tabela 19 – Dados da rugosidade dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração para determinação do carregamento do ensaio de fadiga.

	<i>n</i>	<i>Média (μm)</i>	<i>Desv. Padrão (μm)</i>	<i>Min. (μm)</i>	<i>Máx. (μm)</i>
Ra Al FTSF	6	0,351	0,035	0,302	0,398
Ra Aço. FTSF	6	0,674	0,120	0,536	0,838
Ra Al FT2F	7	0,406	0,024	0,268	0,480
Ra Aço FT2F	7	0,676	0,036	0,532	0,822

Fonte: Autor.

Outro fator controlado foi a espessura da camada adesiva, cuja estatística está disposta na Tabela 20, onde se pode observar um bom controle deste fator que possui grande influência no desempenho de juntas adesivadas.

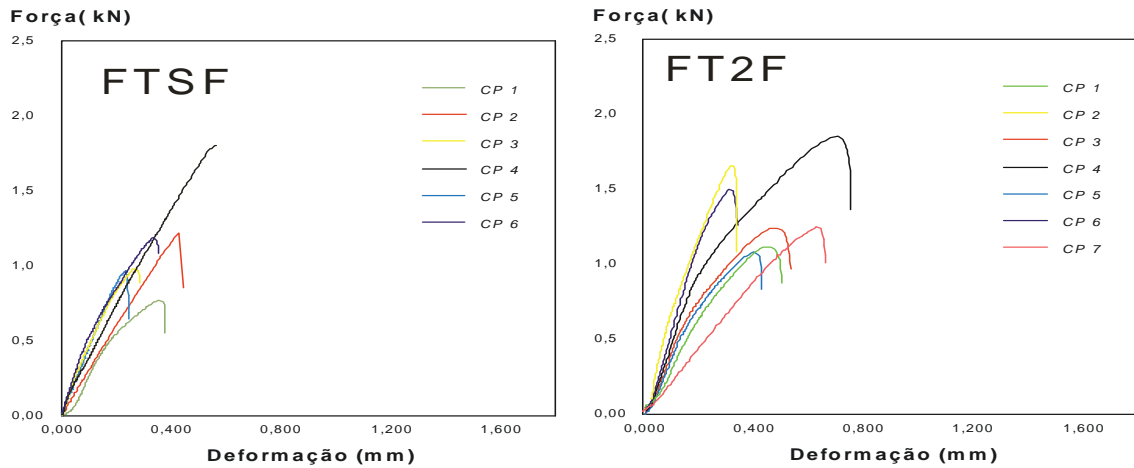
Tabela 20 – Espessuras da camada adesiva dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração para determinação do carregamento do ensaio de fadiga.

<i>Variável</i>	<i>n</i>	<i>Média (mm)</i>	<i>Desvio Pad. (mm)</i>	<i>Min. (mm)</i>	<i>Máx. (mm)</i>
Espessura FTSF	6	0,303	0,032	0,26	0,34
Espessura FT2F	7	0,282	0,062	0,22	0,36

Fonte: Autor.

A Figura 46 apresenta os resultados obtidos através do ensaio de tração, onde a média das forças máximas na configuração FTSF foi de 1,16kN e para a configuração FT2F a média das forças máximas foi de 1,43kN.


Figura 46 – Ensaios de tração para determinação da carga a ser aplicada no ensaio de fadiga.



Fonte: Autor.

As forças máximas aplicadas em todos os níveis de carregamento aplicados nos ensaio de fadiga, bem como a representação da geometria da região adesivada estão dispostas na Figura 47.

Figura 47 – Forças utilizadas nos ensaios de fadiga.

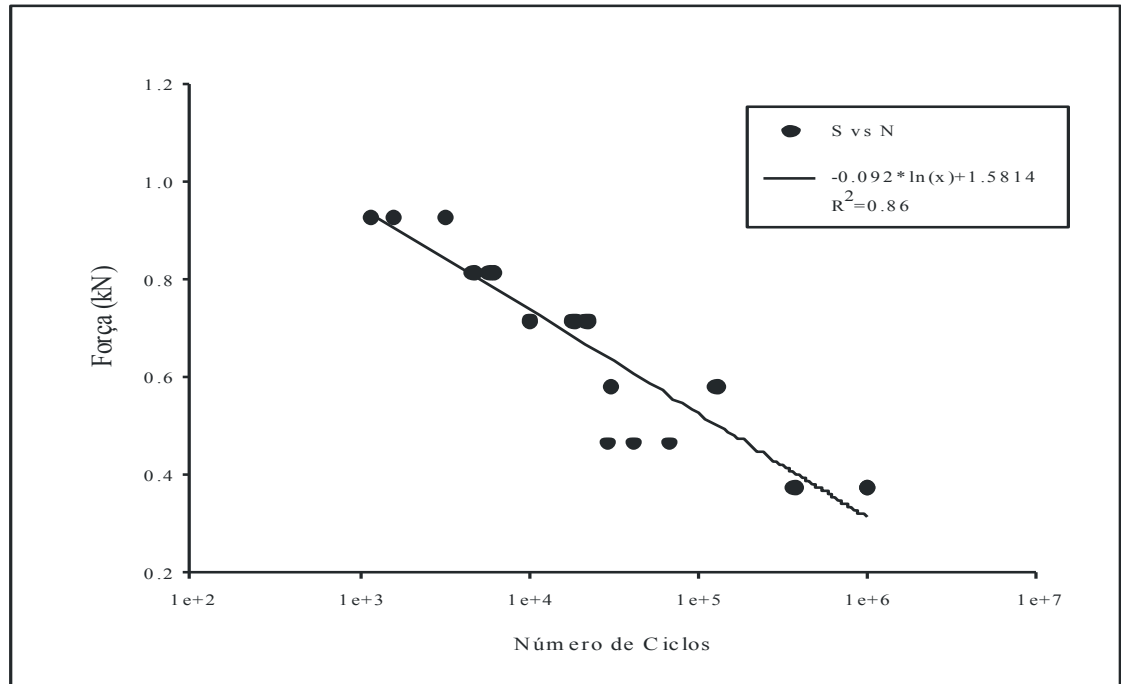
	FSF	F2F
	Força máxima aplicada (kN)	
80%	0,925	1,145
70%	0,810	1,002
60%	0,694	0,858
50%	0,578	0,715
40%	0,463	0,572
30%	0,370	0,458
 Região de sobreposição		

Fonte: Autor.

Na Figura 48 está representada a curva S-N do ensaio de fadiga realizado nos corpos de prova cuja condição da superfície adesivada é a ausência de furos. Somente quando o

carregamento foi de 30% (0,37kN) da força de ruptura nos ensaios estático é que dois dos corpos de prova ultrapassaram a marca de um milhão de ciclos e o ensaio foi interrompido.

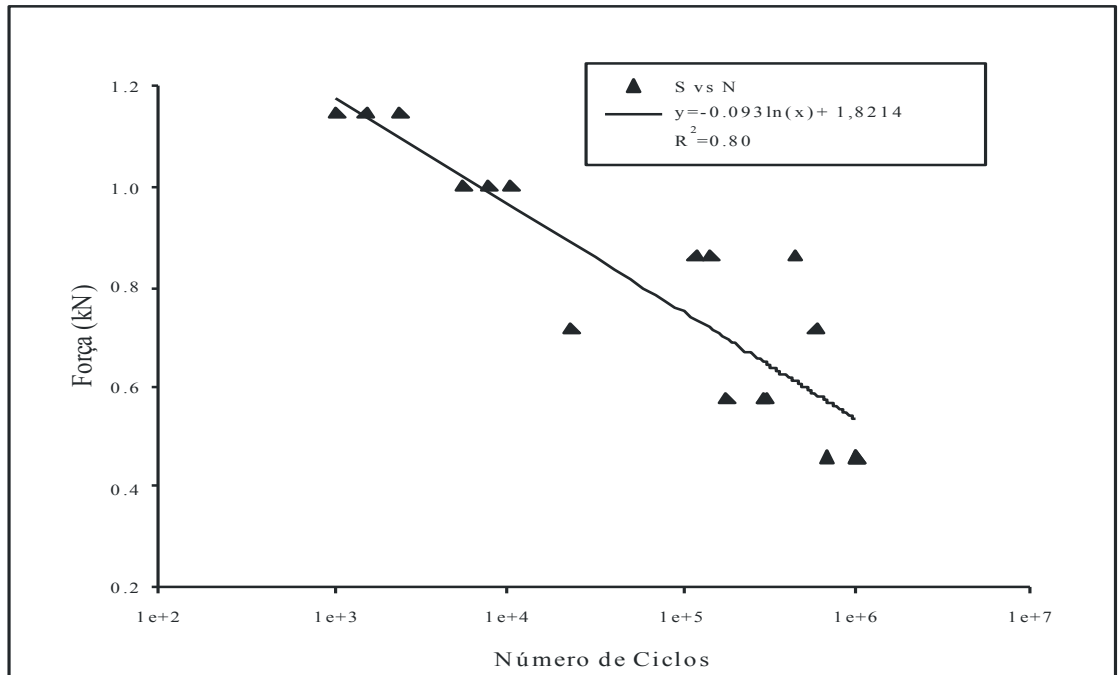
Figura 48 – Curva S-N para corpos de prova sem furos na região de sobreposição.



Fonte: Autor.

A curva S-N dos copos de prova com furos na região de contato está disposta na Figura 49, na qual é possível observar que, assim como no tratamento de superfície sem furos, a marca de um milhão de ciclos só foi alcançada quando o carregamento foi de 30% (0,458kN) da força de ruptura nos ensaios estáticos.

Figura 49 – Curva S-N para corpos de prova com dois furos na região de sobreposição.



Fonte: Autor.

Por meio de uma regressão não linear foi possível determinar a equação da curva e o coeficiente de correlação (R^2) dispostos na Figura 48 para a condição de superfície sem furo e na Figura 49 para a condição de superfície com 2 furos.

Em ambos os ensaios, verificou-se que os coeficientes de correlação foram baixos. Segundo Ribeiro et al. (2008), isso se deve ao fato de haver um grande número de fatores que afetam a vida de juntas coladas quando solicitadas em carregamento dinâmico.

A fratura predominante em ambos os tratamentos (sem furo e com dois furos) foi do tipo mista entre adesiva e coesiva do adesivo, como pode ser visto na Figura 50. As falhas coesivas dos substratos ocorridas em alguns corpos de prova submetidos aos ensaios estáticos, nos quais houve o desprendimento da camada oxidada do substrato de aço, não se repetiram nos ensaios de carregamento dinâmico.

Figura 50 – Fratura nos corpos de prova submetidos ao ensaio de fadiga.



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

O comportamento estático e dinâmico de juntas adesivadas com adesivo acrílico na união de aço ao alumínio com substratos de 2mm de espessura foram avaliados, sendo o comportamento estático avaliado através de ensaio de tração e o dinâmico através de ensaio de fadiga. A interação entre os parâmetros comprimento de sobreposição e presença de furos na região de sobreposição foram avaliados por meio de um experimento fatorial. As conclusões a que se pode chegar a partir do estudo são as seguintes:

- Não há interação entre os fatores comprimento de sobreposição e a presença de furos na região colada;
- A presença de dois furos na região de sobreposição não provocou mudança significativa no comportamento mecânico das juntas quando solicitadas em carregamento estático;
- A presença de quatro furos na região de sobreposição pode acarretar a redução da resistência mecânica de juntas adesivadas de sobreposição simples quando solicitadas em carregamento estático;
- Superfícies de substratos oxidadas interferiram diretamente na resistência das junções adesivas. A fratura da camada oxidada pode ocorrer antes da ruptura do filme de adesivo, causando redução da resistência;
- Quando juntas de sobreposição simples são submetidas a carregamento dinâmico, a inserção de dois furos aumenta a resistência da união;
- Nos ensaios de fadiga, tanto os corpos de prova que possuíam furo na região de sobreposição como os que não possuíam furos só atingiram a marca de um milhão de ciclos quando a força aplicada foi de 30%, força máxima resistida no ensaio estático;
- O dispositivo projetado para a fabricação das juntas adesivadas apresentou desempenho satisfatório;
- Por meio da fractografia, foi possível determinar que a falha teve seu início na região dos furos, evidenciando o efeito de concentração de tensão provocado pela inserção dos furos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se alguns temas para o desenvolvimento de trabalhos futuros envolvendo o mesmo tema, quais sejam:

- Investigar o uso de jato de água para aumento da rugosidade e para remoção da camada óxida da superfície a ser adesivada, causando o aumento da ancoragem mecânica e da área de contato;
- Avaliar o comportamento de uniões adesivadas em fluência;
- Testar a modelagem da resistência mecânica pelo método dos elementos finitos.
- Realizar estudo comparativo da influência da inserção de furos em juntas adesivadas com adesivo dúctil ou selante.

7 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 907-Standard Terminology of Adhesives. **Annual Book of ASTM Standards**, West Conshohocken, 1999.

_____. D 1002- Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to- Metal).

_____. D 3166- Fatigue Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading (Metal/Metal).

ANDERSON, T. L. **Fracture Mechanics Fundamentals and Applications**. Boca Raton: Taylor and Francis, 2005.

Arcelor Mittal. Disponível em: <<http://www.arcelormittal.com/br/>>. Acesso em: 05 jan 2014.

ARENAS, J. M.; NARBÓN, J.J.; ALÍA, C. Optimum adhesive thickness in structural adhesives joints using statistical techniques based on Weibull distribution, **International Journal of Adhesion & Adhesives**, n. 30, 160-165, 2010.

BRASIL. **Portaria n. 99, de 19 de outubro de 2004**. Secretaria de Inspeção do Trabalho e da Diretoria do Departamento de Segurança e Saúde no Trabalho, do Ministério do Trabalho e Emprego. Disponível em: <http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812BE914E6012BF92910AF0633/p_20041019_99.pdf>. Acesso em: 05 dez 2013.

CAMPOS, K. A. **Fractografia Quantitativa**: análise do comportamento fractal de fratura em compósitos carbono/epóxi, por processamento digital de imagens. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

CÂNDIDO, G. M.; REZENDE, M. V. D.; ALMEIDA, S. F. M. de. Fractografia de compósito estrutural aeronáutico submetido à caracterização de tenacidade à fratura interlaminar em Modo I. **Polímeros**, v. 22, n. 1, p. 41-53, 2012.

COGNARD, P. **Handbook of Adhesives and Sealants**. v. 2. Versailles: Elsevier, 2006.

CORREA, C. A., YAMAKAWA, R. S.; HAGE Jr., E. Determinação da temperatura de transição dúctil/frágil de plásticos através de testes de impacto instrumentado. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, p. 76-84, mar-dez, 1999.

COSTA Mattos, H.S.C.; SAMPAIO, E. M.; MONTEIRO, A. H. Static failure analysis of adhesive single lap joints. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, n. 31, p. 446–454, 2011.

DODIUK, H.; KENIG, S. The effect of surface preparation on the performance of acrylic adhesive joints. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, p. 156-166, 1988.

ESTEVEES, V. H. C. **Determinação da Tenacidade de um Adesivo em Solicitações de Modo Misto (I + II)**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.

FERREIRA, N. M. A. J.; SILVA, L. F. M. da; RICHTER-TRUMMER, V.; MARQUES, E. A. S. Effect of grooves on the strength of adhesively bonded joints. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, n. 30, p. 735-746, 2010.

HU, P.; HAN, X.; LI, L.; SHAO, Q. Research on the static strength performance of adhesive single lap joints subjected to extreme temperature environment for automotive industry. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, n. 41, p. 119-126, 2013.

ISLAM, M.S.; TONG, L.; FALZON, P.J. Influence of metal surface preparation on its surface profile, contact angle, surface energy and adhesion with glass fibre prepreg. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, n. 51, p. 32-41, 2014.

KARACHALIOS, E.F.; ADAMS, R.D.; SILVA, e Lucas F.M. da. Single lap joints loaded in tension with high strength steel adherends. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, n. 43 p. 81-95, 2013.

LOCTITE. **Design Guide for Bonding Metals**. 2011.

LORD Corporation. 2011. Disponível em: <<http://www.lord.com/>>. Acesso em: 05 jan 2014.

MARCHEZIN, E.; PARDINI, L. C.; GUIMARÃES, V.A. Avaliação do comportamento em fadiga de juntas estruturais de ligas de Al2024T3 coladas com adesivo epóxi. **Revista Matéria**, n. 17, p. 889-900, 2012.

MESSLER, R. W. **Joining of material and structures**. Burlington: Elsevier, 2004.

MONTEIRO, D. F. **Análise do comportamento à fractura de juntas de aço efectuadas com adesivos estruturais**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 1995.

MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G.C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 2. Trad: Verônica Calado. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

PEREIRA, A. M. B. **Fractura de juntas coladas**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aviero, Aviero, 2002.

PETRIE, E. M. **Handbook of Adhesives & Sealants**. New York: McGraw-Hill, 2007.

PEYKOVA, Y.; LEBEDEVA, O.V; DIETHERT, A.; Muller-Buschbaum, P.; Willenbacher, N. Adhesive properties of acrylate copolymers: Effect of the nature of the substrate and copolymer functionality. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, n. 34, p. 107-116, 2012.

PIZZI, A; MITTAL, K.L. **Handbook of Adhesive Technology, Revised and Expanded**. 2. ed. Nova York: Marcel Dekker AG, 2003.

PROLONGO, S.G.; UREN, A.. Effect of surface pre-treatment on the adhesive strength of epoxy–aluminium joints. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, n. 29, p. 23-31, 2009.

QUINI, J. G. **Adesivos estruturais uretânicos aplicados a combinações de compósitos, plásticos e metais**. Tese, IPEN, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2011.

RIBEIRO, A.S., JESUS, A.M.P.; FERREIRA, A.J.M. Comportamento estático e à fadiga de juntas coladas com perfis pultrudidos. **Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões**, n.16, p. 81-87, 2008.

SANTOS, D. J. **Estudo Experimental Da Resistência Mecânica De Junções Adesivas**. Dissertação Mestrado, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7. ed. Trad.: João Batista de Aguiar e José Manoel de Aguiar. Porto Alegre: Bookman, 2008.

SILVA, L. F. M.; MAGALHÃES, A. G. de; MOURA, M. F. S. F. **Juntas Adesivadas Estruturais**. Porto: Publindústria, 2007.

SONZA, Q. N. **Comportamento de fratura de sistemas para restaurações cerâmicas**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, 2013.

SOUZA, J. D. R. B. **Adesivos alcalinamente ativados: Ativação com silicato de potássio e silicato de sódio**. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

Special Chem. s.d. Disponível em: <<http://www.specialchem4adhesives.com/>>. Acesso em: 24 dez 2013.

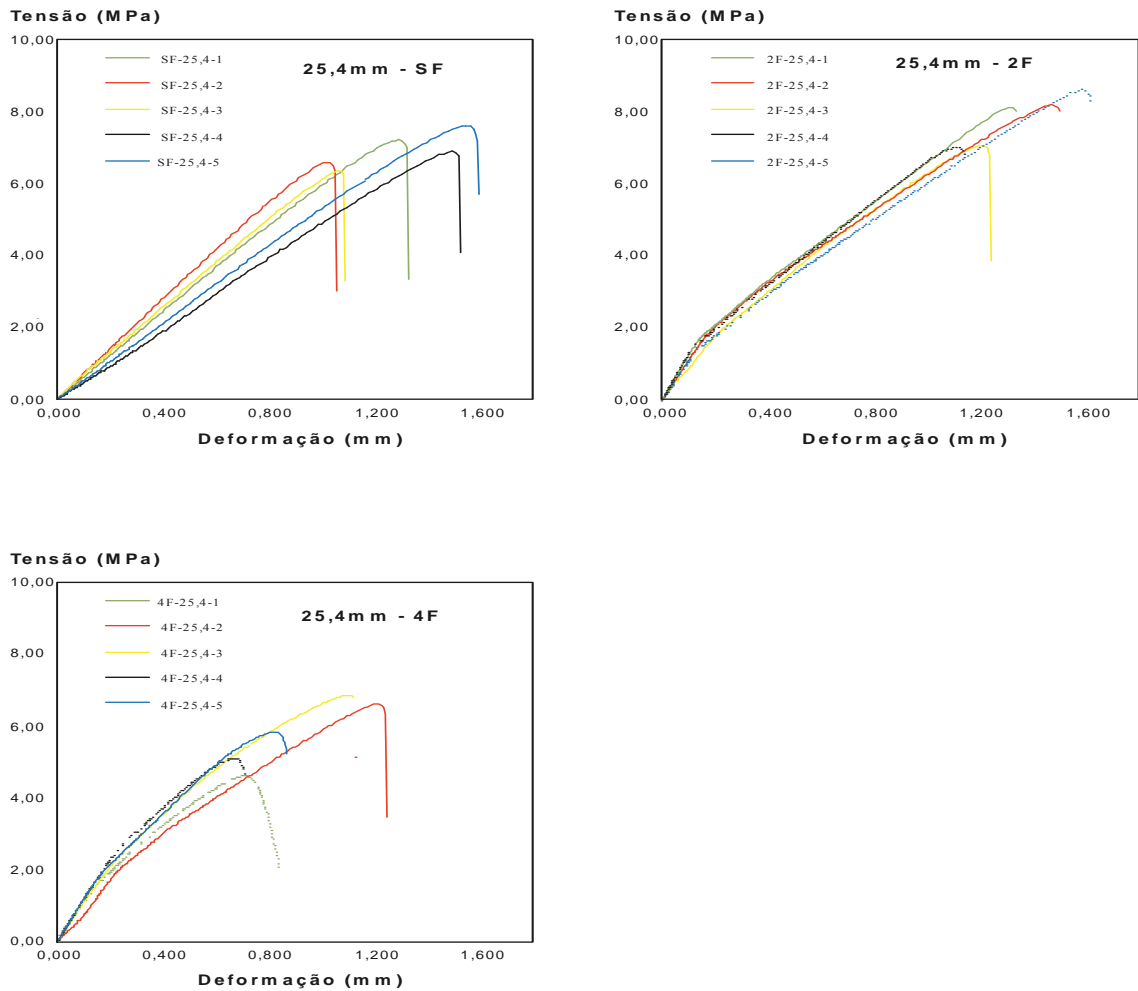
SSAB. **Joining handbook**, 2012. Disponível em: < <http://www.ssab.com/en/Products--Services/Service--Support/Technical-handbooks-/Joining-Handbook/>>. Acesso em: 2014.

SUN, S.; LI, M.; LIU. A. A review on mechanical properties of pressure sensitive adhesives. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, n. 41, p. 98-106, 2013.

YICHI, C.; HONGMEI, Z.; LIQUN, Z.; Tao, H.E.; Weiping, L.I; Huicong, L. Synthesis and characterization of acrylic modified epoxy prepolymers for UV-curable adhesives. **Rare Metals**, n. 30, p. 567, Mar, 2011.

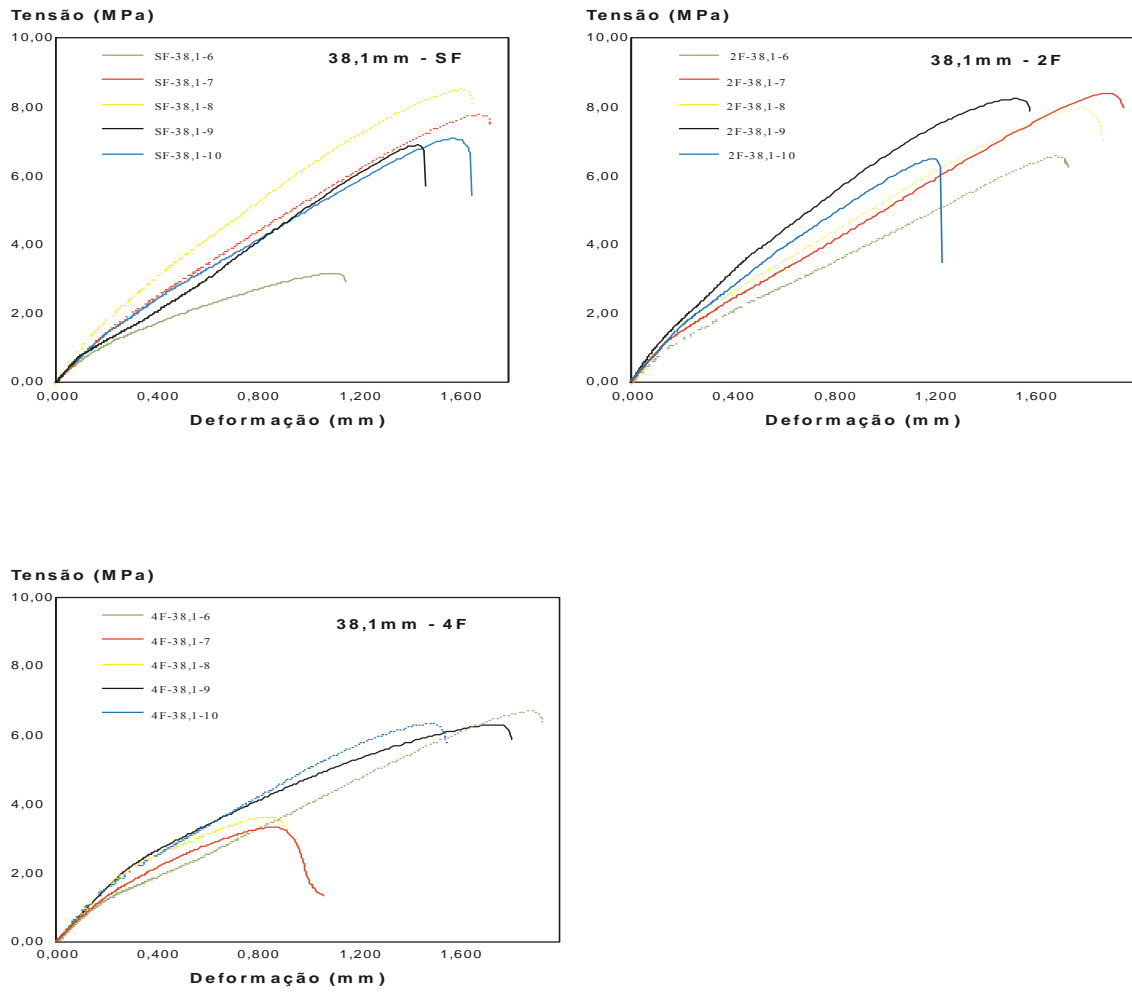
8 APÊNDICE A

Figura 51-A – Ensaios de tração realizados em corpos de prova com 25,4mm de comprimento de sobreposição e três diferentes tratamentos de superfície



Fonte: Autor.

Figura 52-A – Ensaio de tração realizados em corpos de prova com 38,1mm de comprimento de sobreposição e três diferentes tratamentos de superfície.



Fonte: Autor.

Figura 53-A – Ensaio de tração realizados em corpos de prova com 50,8mm de comprimento de sobreposição sem furos e 50,8mm de comprimento de sobreposição e dois furos.

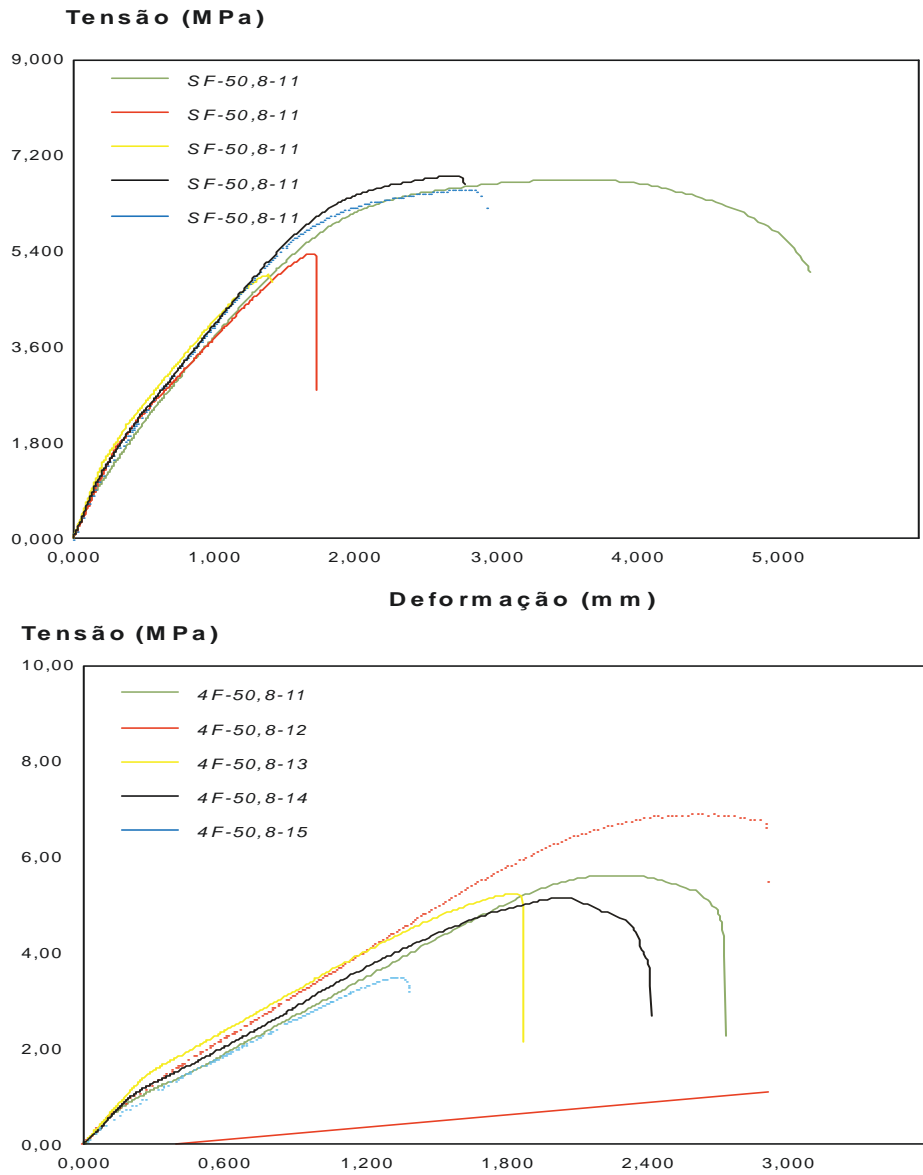
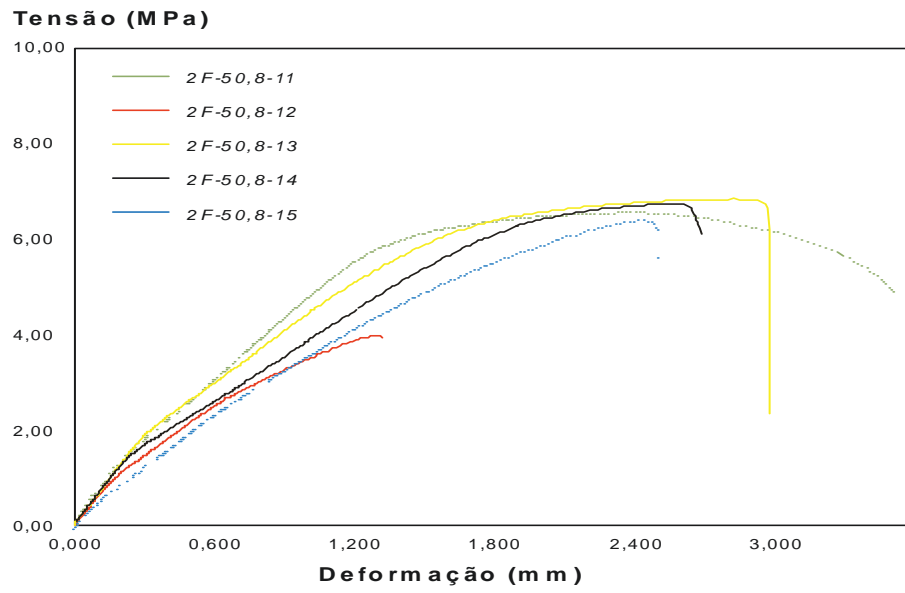
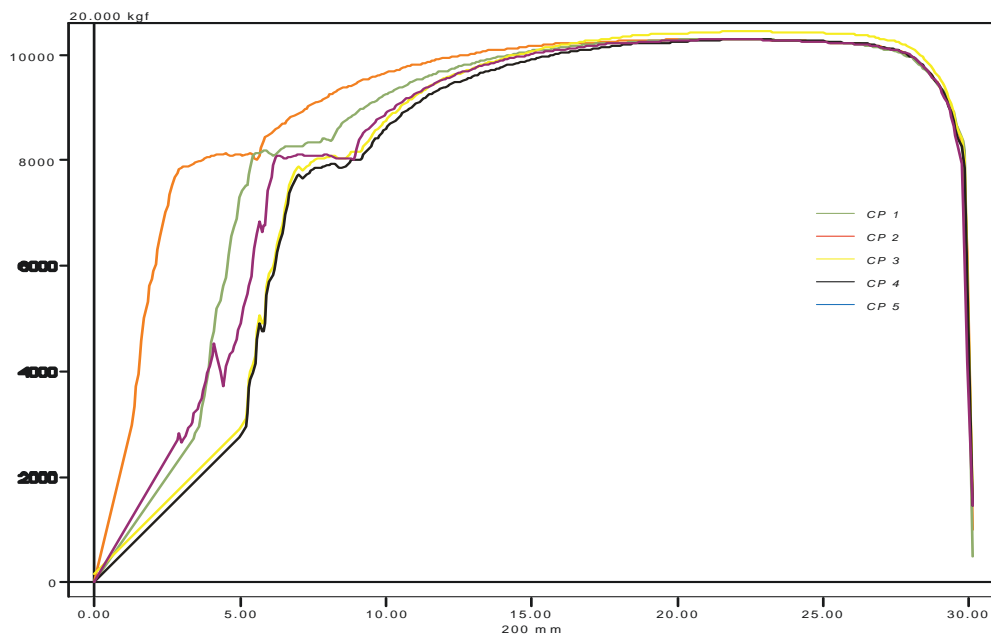


Figura 54-A – Ensaio de tração realizados em corpos de prova com 50,8mm de comprimento de sobreposição e quatro furos.



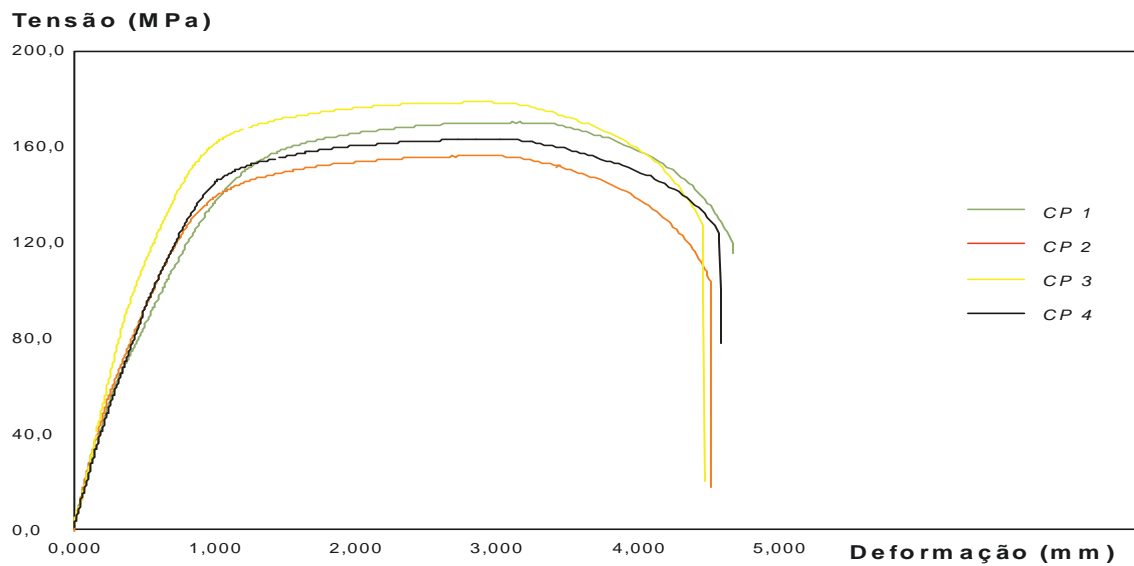
Fonte: Autor.

Figura 55-A – Ensaio de tração realizados para caracterização dos substratos de aço.



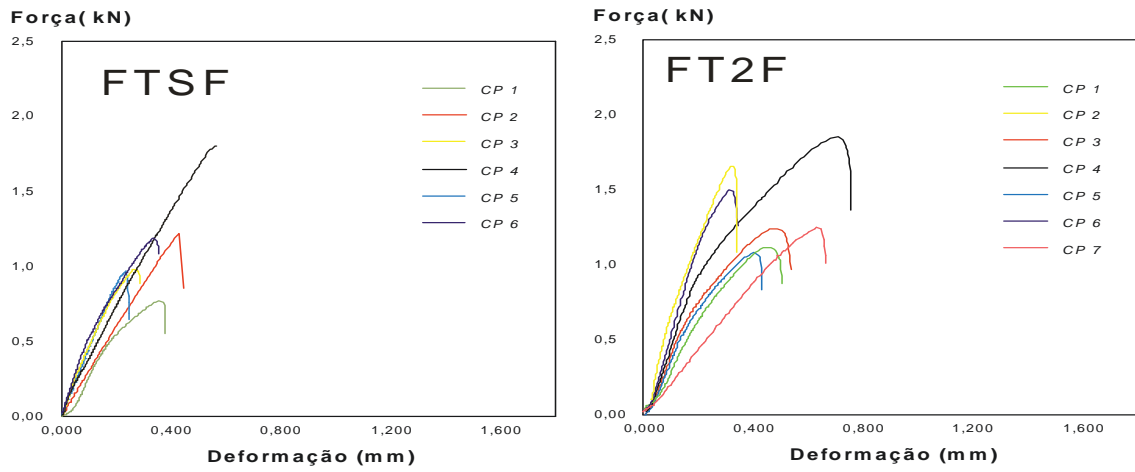
Fonte: Autor.

Figura 56-A – Ensaio de tração realizados para caracterização dos substratos de alumínio.



Fonte: Autor.

Figura 57-A – Ensaios de tração realizados para determinação das cargas a serem aplicadas nos ensaios de fadiga.



Fonte: Autor.

A.2 Tabelas

Tabela 21-A – Dados dos corpos de prova com 25,4mm de comprimento de sobreposição submetidos ao ensaio de tração.

<i>CP</i>	<i>Nf</i>	<i>L</i> (mm)	<i>e_a</i> (mm)	τ (MPa)	<i>Def.</i> (mm)	<i>Falha</i>
SF-25,4-1	SF	25,4	0,24	7,34	1,33	M(Cs+Ca)
SF-25,4-2	SF	25,4	0,24	6,58	1,05	Ca
SF-25,4-3	SF	25,4	0,30	6,26	1,08	Ca
SF-25,4-4	SF	25,4	0,30	7,09	1,51	Ca
SF-25,4-5	SF	25,4	0,32	7,61	1,59	M(Cs+Ca)
Média	-	-	0,28	6,97	1,31	-
Desvio	-	-	0,03	0,55	0,24	-
2F-25,4-1	2F	25,4	0,34	8,21	1,32	Ca
2F-25,4-2	2F	25,4	0,30	8,11	1,50	Ca
2F-25,4-3	2F	25,4	0,24	7,02	1,23	Ca
2F-25,4-4	2F	25,4	0,28	7,08	1,13	Ca
2F-25,4-5	2F	25,4	0,30	8,63	1,62	M(Cs+Ca)
Média	-	-	0,29	7,81	1,36	-
Desvio	-	-	0,03	0,72	0,19	-
4F-25,4-1	4F	25,4	0,28	4,52	0,72	Ca
4F-25,4-2	4F	25,4	0,26	6,82	1,24	Ca
4F-25,4-3	4F	25,4	0,34	5,11	1,13	Ca
4F-25,4-4	4F	25,4	0,30	5,83	0,71	Ca
4F-25,4-5	4F	25,4	0,26	6,93	0,87	Ca
Média			0,28	5,84	0,93	
Desvio			0,03	1,05	0,24	

Fonte: Autor.

Tabela 22-A – Dados dos corpos de prova com 38,1mm de comprimento de sobreposição submetidos ao ensaio de tração.

<i>CP</i>	<i>Nf</i>	<i>L</i> (mm)	<i>ea</i> (mm)	τ (MPa)	<i>Def.</i> (mm)	<i>Falha</i>
SF-38,1-6	SF	38,1	0,28	3,17	1,15	Ca
SF-38,1-7	SF	38,1	0,34	7,77	1,72	Ca
SF-38,1-8	SF	38,1	0,26	8,51	1,65	Ca
SF-38,1-9	SF	38,1	0,28	6,87	1,46	Ca
SF-38,1-10	SF	38,1	0,34	7,09	1,64	Ca
Média	-	-	0,30	6,68	1,52	-
Desvio	-	-	0,03	2,06	0,23	-
2F-38,1-6	2F	38,1	0,30	6,58	1,74	Ca
2F-38,1-7	2F	38,1	0,22	8,41	1,95	Ca
2F-38,1-8	2F	38,1	0,24	7,93	1,87	Ca
2F-38,1-9	2F	38,1	0,32	8,25	1,59	M(Cs+Ca)
2F-38,1-10	2F	38,1	0,32	6,54	1,23	Ca
Média	-	-	0,28	7,54	1,67	-
Desvio	-	-	0,04	0,91	0,28	-
4F-38,1-6	4F	38,1	0,26	6,68	1,93	Ca
4F-38,1-7	4F	38,1	0,28	3,32	0,96	Ca
4F-38,1-8	4F	38,1	0,28	3,62	0,95	Ca
4F-38,1-9	4F	38,1	0,32	6,34	1,81	Ca
4F-38,1-10	4F	38,1	0,32	6,28	1,55	Ca
Média	-	-	0,29	5,24	1,44	-
Desvio	-	-	0,02	1,63	0,46	-

Fonte: Autor.

Tabela 23-A – Dados dos corpos de prova com 50,8mm de comprimento de sobreposição submetidos ao ensaio de tração.

<i>CP</i>	<i>Nf</i>	<i>L</i> (mm)	<i>e_a</i> (mm)	τ (MPa)	<i>Def.</i> (mm)	<i>Falha</i>
SF-50,8-11	SF	50,8	0,28	4,95	5,24	Cs
SF-50,8-12	SF	50,8	0,30	6,56	1,73	Ca
SF-50,8-13	SF	50,8	0,30	6,80	1,42	Ca
SF-50,8-14	SF	50,8	0,30	5,38	2,79	Ca
SF-50,8-15	SF	50,8	0,28	6,74	2,95	Ca
Média	-	-	0,29	6,08	2,82	-
Desvio	-	-	0,01	0,85	1,50	-
2F-50,8-11	2F	50,8	0,30	6,46	4,63	Cs
2F-50,8-12	2F	50,8	0,24	3,99	1,35	M (A+Ca)
2F-50,8-13	2F	50,8	0,26	6,58	2,99	Ca
2F-50,8-14	2F	50,8	0,30	6,71	2,53	Ca
2F-50,8-15	2F	50,8	0,28	6,82	2,72	Ca
Média	-	-	0,27	6,11	2,84	-
Desvio	-	-	0,02	1,19	1,17	-
4F-50,8-11	4F	50,8	0,32	5,25	2,73	Ca
4F-50,8-12	4F	50,8	0,24	6,87	2,92	Cs
4F-50,8-13	4F	50,8	0,32	5,17	1,87	Ca
4F-50,8-14	4F	50,8	0,34	3,47	2,41	Ca
4F-50,8-15	4F	50,8	0,24	5,63	1,38	Cs
Média	-	-	0,29	5,27	2,26	-
Desvio	-	-	0,04	1,21	0,63	-

Fonte: Autor.

Tabela 24-A – Dados dos corpos de prova com 9,5mm de comprimento de sobreposição submetidos ao ensaio de tração.

<i>CP</i>	<i>Nf</i>	<i>L</i> (<i>mm</i>)	<i>e_a</i> (<i>mm</i>)	τ (<i>MPa</i>)	<i>Def.</i> (<i>mm</i>)	<i>Falha</i>
FTSF-1	SF	9,5	0,28	3,04	0,82	Ca
FTSF-2	SF	9,5	0,28	5,18	0,77	Ca
FTSF-3	SF	9,5	0,3	4,14	0,92	Ca
FTSF-4	SF	9,5	0,24	7,44	0,54	Ca
FTSF-5	SF	9,5	0,32	4,21	0,67	Ca
FTSF-6	SF	9,5	0,24	4,74	0,93	Ca
Média	-	-	0,27	4,79	0,77	-
Desvio	-	-	0,03	1,48	0,15	-
FT2F-1	2F	9,5	0,30	5,34	1,16	Ca
FT2F-2	2F	9,5	0,26	4,82	0,82	Ca
FT2F-3	2F	9,5	0,24	6,73	0,93	Ca
FT2F-4	2F	9,5	0,34	6,77	0,72	Ca
FT2F-5	2F	9,5	0,24	7,77	0,85	Ca
FT2F-6	2F	9,5	0,30	4,69	0,89	Ca
FT2F-7	2F	9,5	0,30	5,34	0,41	Ca
Média	-	-	0,28	5,92	0,84	-
Desvio	-	-	0,03	1,16	0,24	-

Fonte: Autor.