

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

ANDRIO GARCIA DUCATI

**ANÁLISE DA ADESÃO EM DIFERENTES SUPERFÍCIES DE CHAPAS
METÁLICAS: UMA COMPARAÇÃO JUNTA ADESIVADA VERSUS JUNTA
REBITADA**

CAXIAS DO SUL

2013

ANDRIO GARCIA DUCATI

**ANÁLISE DA ADESÃO EM DIFERENTES SUPERFÍCIES DE CHAPAS
METÁLICAS: UMA COMPARAÇÃO JUNTA ADESIVADA VERSUS JUNTA
REBITADA**

Trabalho de conclusão de Estágio II como
pressuposto parcial para obtenção de grau de
Engenheiro Mecânico

Supervisor: Prof. Dr. Alexandre Fassini
Michels

CAXIAS DO SUL

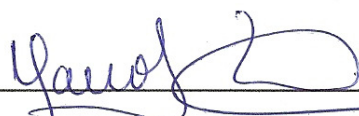
2013

ANDRIO GARCIA DUCATI

**ANÁLISE DA ADESÃO EM DIFERENTES SUPERFÍCIES DE CHAPAS
METÁLICAS: UMA COMPARAÇÃO JUNTA ADESIVADA VERSUS JUNTA
REBITADA**

RELATÓRIO DE ESTÁGIO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

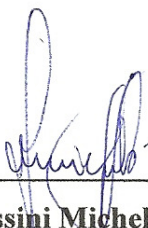
Caxias do Sul, 21 de junho de 2013



Prof. Marcos Alexandre Luciano, Dr. Eng. Produção
Universidade de Caxias do Sul – Coordenador de Estágio

CONCEITO FINAL:

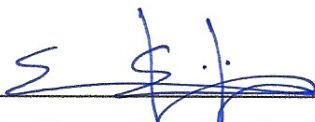
COMISSÃO EXAMINADORA



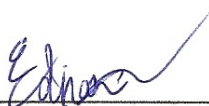
Prof. Alexandre Fassini Michels, Dr. Ciência dos Materiais
Universidade de Caxias do Sul – Supervisor de Estágio



Profa. Maria Cristina More Farias
Universidade de Caxias do Sul – Professor Convidado



Prof. Sandro Tomaz Martins, Dr. Eng. Mecânica
Universidade de Caxias do Sul – Professor Convidado



Sr. Edivar Anzolin, Eng. Mecânico
Macrosul Borrachas e Parafusos – Orientador de Estágio

RESUMO

Com o intuito de reduzir custos de processo e produto e aumentar a resistência de juntas, nota-se um crescimento expressivo na utilização de adesivos estruturais como elemento de fixação permanente na união de chapas metálicas de baixa espessura. Valores típicos de força suportada, peso específico, tempo de processo e mão de obra requerida tem demonstrado que sua utilização em uniões de chapas metálicas pode ser amplamente empregada, trazendo uma série de benefícios ao produto/processo se comparado aos tradicionais sistemas de fixação com parafuso, rebite e solda e reduzindo o custo total de fabricação. Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre uma junta de chapas de aço carbono SAE 1020 rebitada e a mesma junta unida com adesivos, esta por sua vez, testada em superfícies laminadas, lixadas e polidas. Para se obter valores comparativos de forças mecânica serão executados ensaios de tração cisalhante e tração cruzada, de acordo com as normas ASTM D 1002 e SAE J1553, respectivamente. Após a aquisição de valores de forças, a junta de melhor comportamento é avaliada no quesito custos de produção com o objetivo de quantificar os benefícios promovidos.

Palavras chave: Adesivo Estrutural. Rebitagem. Substituição de Rebites. Ensaios de adesivos e Rebites.

Áreas de conhecimento: Engenharia mecânica. Materiais. Processo de fabricação rebites/adesivos.

ABSTRACT

In order to reduce product and process costs and to increase joint strength, notices an expressive grown in the use of structural adhesives as a permanent fastener element at the low thickness metallic plates joints. Typical values of resistance, weigh, process time and manpower required have being demonstrated that its use in metallic plates can be widely employed, bringing a series of benefits to the product/process if compared to traditional fastening systems like screws/bolts, rivets and welding and decreasing the total cost of manufacturing.

This research presents a comparative study between two carbon steel plate joints: The first one joint using blind aluminum rivets and the second one, using structural adhesives. This, in its turn, tested in laminated, sanded and polished surfaces. In order to obtain comparative strength values, it is performed strength lap shear and cross peel tests, according to D 1002 and SAE J1553 standards respectively. After the values acquisition, the best behavior joint will be evaluated in the question of production costs in order to quantify all the benefits provided by adhesive process.

Keywords: Structural Adhesives. Riveting. Blind Rivet Substitution. Blind Rivet and Adhesive Test.

Expertise Area: Mechanical Engineering. Materials. Manufacturing. Process for Blind Rivets/Adhesives.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dispositivo de Aplicação de Adesivos.....	15
Figura 2 – Esquema de mistura de adesivo bicomponente dentro do bico.....	16
Figura 3 – Representação da medição do ângulo de gota.....	17
Figura 4 – Princípio da teoria mecânica de adesão	18
Figura 5 – Processo de seleção de adesivos	23
Figura 6 – Tipos de carregamento em juntas adesivas	25
Figura 7 – Representação de falha coesiva.....	27
Figura 8 – Representação de falha adesiva.....	28
Figura 9 – Representação de falha do substrato	28
Figura 10 – Desenho esquemático para o ensaio de tração	29
Figura 11 – Desenho esquemático para o ensaio de tração cruzada.....	29
Figura 12 – O rebite de repuxo aberto e seus componentes	32
Figura 13 – Esquema de aplicação do rebite de repuxo aberto	32
Figura 14 – Imagem do rebite escolhido	38
Figura 15 – Junta rebitada	39
Figura 16 – Equipamento de ensaio de tração cisalhante e dispositivos de agarramento	43
Figura 17 – Dispositivos de agarramento para o ensaio de tração cruzada.....	44
Figura 18 – Corpo de prova de junta rebitada – Ensaio de cisalhamento	45
Figura 19 – Corpo de prova de junta rebitada – Ensaio de tração pura.....	45
Figura 20 – Corpo de prova de junta adesiva – Ensaio de Cisalhamento	46
Figura 21 – Corpo de prova de junta adesiva – Ensaio de tração pura	46
Figura 22 – Falha da junta adesiva laminada – Ensaio de cisalhamento.....	50
Figura 23 - Falha da junta adesiva lixada – Ensaio de cisalhamento	50
Figura 24 - Falha da junta adesiva polida – Ensaio de cisalhamento	50
Figura 25 - Falha da junta rebitada – Ensaio de cisalhamento	51
Figura 26 - Falha da junta rebitada – Ensaio de tração pura	53
Figura 27 – Falha da junta adesiva laminada – Ensaio de tração pura.....	53
Figura 28 - Falha da junta adesiva lixada – Ensaio de tração pura	53
Figura 29 - Falha da junta adesiva polida – Ensaio de tração pura	54
Figura 30 – Esquema indicativo da junta rebitada proposta.....	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Conceitos Importantes na Adesão Estrutural.....	24
Quadro 2 – Tabela de espessura rebitável para rebites Alumínio/Aço	38
Quadro 3 – Passos necessários no processo de rebitagem.....	39
Quadro 4 – Passos para o processo de adesão de substratos	41
Quadro 5 – Força mínima de rebites sob cisalhamento.....	41
Quadro 6 – Força mínima de rebites sob tração	42
Quadro 7 – Cronograma de ensaios.....	46
Quadro 8 – Valores de carregamento para o ensaio de tração cisalhante.....	49
Quadro 9 – Valores de carregamentos para o ensaio de tração pura.....	52
Quadro 10 – Cálculo de área adesiva equivalente a um rebite – Cisalhamento.....	54
Quadro 11 – Cálculo de área adesiva equivalente a um rebite - Tração	55
Quadro 12 – Comparação de tempos de processo para as juntas do estudo.....	56
Quadro 13 – Tabela de cálculo de custos das juntas do estudo.....	57

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Médias de cargas encontradas no ensaio de tração cisalhante	49
Gráfico 2 – Cargas médias para o ensaio de tração pura.....	52

SUMÁRIO

1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTÁGIO.....	11
1.1 OS ADESIVOS ESTRUTURAIS	11
1.2 AMBIENTE DE ESTÁGIO	11
1.3 JUSTIFICATIVA	12
1.4 OBJETIVOS.....	12
1.4.1 Objetivo geral.....	12
1.4.2 Objetivos específicos.....	13
2. ADESÃO ESTRUTURAL E REBITAGEM.....	14
2.1 ADESIVOS ESTRUTURAIS	14
2.1.1 Definição	14
2.1.2 Teorias da Adesão.....	16
2.1.3 Classificação dos Adesivos Estruturais	21
2.1.4 Seleção de Adesivos Estruturais.....	22
2.1.5 Projeto de Juntas Adesivas e Cálculos de Projeto.....	25
2.1.6 Análise de Tensões	25
2.1.8 Durabilidade e Tipos de Falhas.....	27
2.1.9 Ensaios Mecânicos	28
2.1.10 Vantagens e Desvantagens da Utilização de Adesivos.....	30
2.2 REBITAGEM.....	30
2.2.1 Os Rebites.....	31
2.2.2 Função	33
2.2.3 Aplicação	33
2.2.4 Materiais.....	33
2.2.5 Cálculos de Projeto.....	35
2.2.6 Normas e Ensaios.....	35
2.2.7 Vantagens e Desvantagens da utilização de Rebites.....	35
3 DESENVOLVIMENTO E PROPOSTA DE ESTÁGIO	37
3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	37
3.1.1 Adesão Estrutural versus Rebitagem	37
3.1.2 O Processo de Rebitagem de Chapas Metálicas	38

	10
3.2 PROPOSTA DE INTERVENÇÃO	40
3.2.1 O Adesivo	40
3.2.2 O Processo de Adesão de Substratos	40
3.3 MÉTODO DE ANÁLISE.....	41
3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	44
3.3.1 Análise de rugosidade dos substratos das juntas adesivas.....	44
3.3.2 Corpos de prova.....	45
3.3.3 Tempos de Processo.....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO CISALHANTE.....	48
4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO CRUZADA	51
4.3 EQUIVALÊNCIA DE RESISTÊNCIA	54
4.4 TEMPOS DE PROCESSO	55
4.5 CUSTOS PRODUTIVOS	57
CONCLUSÕES.....	59
REFERÊNCIAS	61

1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTÁGIO

1.1 OS ADESIVOS ESTRUTURAIS

Competitividade perante a concorrência, alta produtividade, eficiência e uma boa durabilidade são alguns dos clássicos requisitos de um produto/processo para que seu sucesso no mercado seja firmado. E é justificado por esta linha de pensamento que nota-se um crescimento expressivo na utilização de adesivos estruturais como elemento de fixação permanente na união de chapas metálicas de baixa espessura. Embora a utilização de adesivos seja bastante específica, valores típicos de resistência, peso específico, tempo de processo e mão de obra requerida tem demonstrado que sua utilização em uniões de chapas metálicas pode ser amplamente empregada, trazendo uma série de benefícios ao produto/processo se comparado aos tradicionais sistemas de fixação com parafuso, rebite e solda e reduzindo o custo total de fabricação.

Essa tecnologia, relativamente recente, teve sua utilização iniciada pelo segmento aeroespacial, como solução praticável na redução de peso dos sistemas, mantendo a resistência necessária às uniões (PETRIE, 2000). Mais tarde estendeu-se à linha automotiva e nos últimos anos ao setor industrial em geral. De acordo com informações adquiridas em projetos de aplicações recentes, estima-se ganhos de até 50% na redução de algumas operações utilizando adesivos e valores superiores a 5% de redução no custo total das peças (LORD CORPORATION, 2012). Para a engenharia, a adesivagem estrutural representa uma nova opção de fixação permanente, solucionando algumas fraquezas e limitações dos tradicionais sistemas de fixação.

1.2 AMBIENTE DE ESTÁGIO

A Macrosul Borrachas e Parafusos Ltda, fundada em 1974, é especializada na distribuição de fixadores e sistemas de fixação em geral. Sua matriz e, também, centro de distribuição está localizado em Caxias do sul/RS. Quatro filiais, localizadas em Içara/SC, Curitiba/PR, São Paulo/SP e Porto Alegre/RS promovem o suporte técnico/comercial imediato aos clientes locais, tornando a empresa uma das líderes do segmento no Brasil. (MACROSUL, 2012)

Com foco voltado a oferecer soluções de fixação e seguindo as tendências do mercado nacional e mundial, a Macrosul firmou um acordo de distribuição de adesivos

estruturais Lord Corporation, no ano de 2012, sendo o único distribuidor nacional autorizado que conta com um setor de engenharia de aplicação de adesivos capaz de assessorar o cliente na análise, implantação e no acompanhamento de otimizações de produto e processo, substituindo uniões parafusadas, soldadas ou rebitadas por uniões adesivadas.

1.3 JUSTIFICATIVA

Na incessante busca por qualidade e produtividade a baixo custo, os adesivos estruturais têm se mostrado muito eficientes na substituição do elemento de fixação chamado de rebite, na união de chapas metálicas. Juntas rebitadas, mesmo que também eficientes, requerem furação para aplicação do rebite, aumentando significativamente tempos de processo. O furo, por sua vez, durante um esforço de cisalhamento, concentra boa parte das tensões envolvidas e fragiliza a união. O elemento rebite agrega peso, investimento em maquinário e manutenção e ainda, aumenta o custo da junta.

Visando resolver ou amenizar os problemas de engenharia citados, tem-se o adesivo estrutural como opção de projeto. É sabido que a adesivagem estrutural necessita, entre outros fatores, de uma interface de adesão uniforme e resistente e que a mesma pode variar de acordo com os tipos de superfície do substrato. (PETRIE, 2000)

Dessa maneira, este trabalho avalia o comportamento mecânico da interface de adesão em diferentes tipos de superfície de chapas de aço-carbono e compara valores obtidos com a mesma junta rebitada, para a substituição do sistema de fixação.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Determinar a força de adesão em juntas rebitadas de chapas de aço espessura 1,5 mm com rebites de alumínio, tipo repuxo aberto, (bitola 4,8 mm) e comparar com a tensão de adesão nos mesmos substratos, porém aderidos através de adesivo de base acrílica. Através dos resultados obtidos buscar-se-á a área mínima de adesão que se iguala a força suportada por um rebite, no tipo de junta e materiais propostos.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Determinar a força de juntas coladas com adesivos estruturais e rebitadas.
- b) Avaliar o efeito da rugosidade da superfície para as juntas coladas.
- c) Analisar viabilidade técnica de substituição do sistema de rebite para o sistema adesivo.

2. ADESÃO ESTRUTURAL E REBITAGEM

2.1 ADESIVOS ESTRUTURAIS

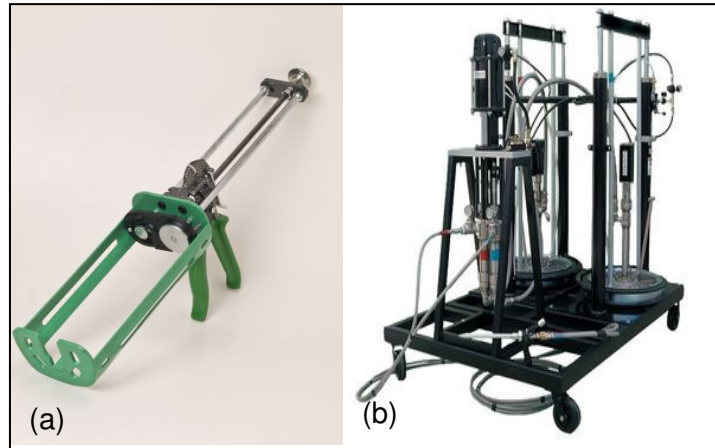
Tecnologias químicas de união de materiais já são comuns na sociedade atual. De papéis lembrete a estruturas aeroespaciais, muitos produtos utilizados no dia a dia não poderiam existir sem as tecnologias de adesão (PETRIE, 2000). A adesão ou adesivagem estrutural teve seu início na indústria aeroespacial, na busca por alto desempenho a baixo peso. Mais tarde se alastrou por outros segmentos, tornando-se, hoje, uma opção de projeto viável na união permanente de materiais (PACKHAM, 2005). Apesar dos constantes estudos e pesquisas relativos a essa tecnologia, alguns dos principais avanços do segmento foram conseguidos analisando eventos trágicos ocasionados por falhas adesivas. O acidente do ônibus espacial Challenger, em 1986, ocasionado por problemas de vedação adesiva, e da aeronave Boeing 737 da Aloha Airlines em 1988, que teve a fuselagem desprendida durante voo são alguns exemplos disto (PETRIE, 2000). A utilização destes produtos na indústria em geral torna necessário o estudo mais aprofundado desta tecnologia e das ciências que englobam a engenharia de adesão: Ciência da Adesão, Ciência de Superfícies, Materiais Poliméricos e Projeto de Juntas Adesivas (SILVA; MOURA; MAGALHÃES, 2007).

2.1.1 Definição

Adesivos estruturais são substâncias líquidas ou parcialmente líquidas em algum momento de sua adesão, capazes de manter pelo menos duas superfícies unidas de maneira forte e permanente (PETRIE, 2000). Do ponto de vista construtivo, conforme referido por QUINI (2011), citando SKEIST (1965), adesivos são polímeros termofixos rígidos ou elastoméricos. A sua função se dá pela reação química entre dois componentes que possuem elevadas propriedades mecânicas e boa resistência química. No quesito de resistência, espera-se de um adesivo estrutural, um mínimo de 7 MPA perante forças de corte e uma boa resistência a agentes externos ambientais (PETRIE, 2000). O poder de adesão destas substâncias é conseguido, normalmente, através da mistura de dois componentes, sendo um elemento adesivo e um elemento ativador, esse, polemicamente conhecido como “catalisador”. Esse tipo de adesivo é conhecido como bi-componente. São aplicados manualmente ou por equipamentos expurgadores e bicos misturadores nas proporções

precisas, de acordo com cada modelo e fabricante. A Figura 1 mostra um exemplo de equipamento aplicador manual (a) e eletropneumático (b).

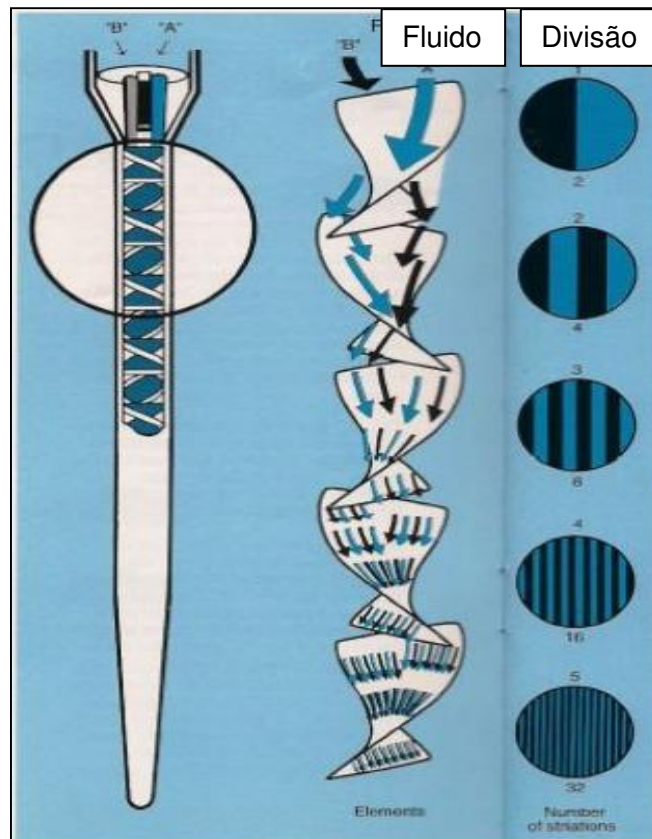
Figura 1 – Dispositivo de Aplicação de Adesivos



Fonte: Lord Corporation (2011)

Na Figura 2 tem-se um esquema demonstrativo do comportamento do adesivo e ativador sendo misturados no bico aplicador. O comportamento da mistura depende, entre outros fatores, tixotropia (propriedade de um fluido não-newtoniano ou pseudoplástico que apresenta uma alteração dependente do tempo em sua viscosidade) e tempo de cura (reação) dos componentes, tornando necessário o uso do bico projetado para cada modelo de adesivo (LORD CORPORATION, 2012).

Figura 2 – Esquema de mistura de adesivo bicomponente dentro do bico



Fonte: Quini (2007)

2.1.2 Teorias da Adesão

O mecanismo adesivo tem forte dependência do tipo de substrato, do tipo de adesivo e das forças envolvidas em cada aplicação. Serão expostas a seguir, as principais teorias de adesão conhecidas que possuem fortes ligações com o objeto de estudo (PETRIE, 2000).

2.1.2.1 Forças Envolvidas na Adesão

Força Adesiva

É a força que mantém a união entre a superfície do adesivo e a superfície do substrato. Esta depende além de bons e bem escolhidos adesivos, de uma superfície limpa, sem contaminantes que possam agir sobre a adesão ou interferir no contato do adesivo e substrato. Forças adesivas são resultantes do conjunto de ligações químicas gerados entre as superfícies (SILVA; MOURA; MAGALHÃES, 2007). Em resumo, corresponde à força que interface exerce para manter duas superfícies, antes separadas, unidas.

Força Coesiva

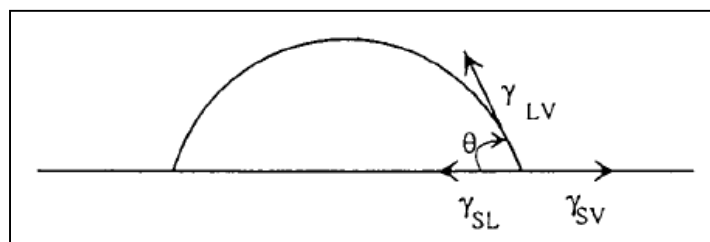
É a força que mantém a estrutura química do adesivo ou dos substratos unidas entre si. Resultante do estado químico interior de cada componente da junta, as propriedades “*bulk*” de cada substrato ou do adesivo (GASPARIN, 2011).

2.1.2.2 O Conceito de Energia de Superfície

A energia físico química entre dois materiais diferentes aderidos pode ser medida como o trabalho necessário para separar ambas as superfícies. Em um primeiro caso, as superfícies são o adesivo e o substrato. Em outro, são a afinidade das moléculas no núcleo do material. Essa força de adesão depende da força intermolecular existente no material e sobre o espaço molecular e pode ser referida como energia de superfície (PETRIE, 2000).

Para os sólidos, energia de superfície e tensão superficial não são a mesma coisa, isso porque a tensão superficial geralmente é maior que energia de superfície. A energia livre de superfície é explicada facilmente através do método de Zisman que propõe que a tensão crítica γ_C da superfície de um sólido pode ser estimada medindo-se o ângulo de contato que uma gota de líquido, com tensão superficial γ_{LV} conhecida, forma sobre a determinada superfície. A Figura 3 esquematiza a medição do ângulo de gota de um líquido em uma superfície.

Figura 3 – Representação da medição do ângulo de gota



Fonte: Petrie (2000)

Os dados são dispostos em um gráfico cuja extrapolação da reta é obtida até $\cos \theta = 1$. Isso trará o valor da tensão crítica de superfície, ou seja: a condição na qual um líquido de mesma tensão superficial formaria um ângulo de 0° com a superfície do sólido. Propriedade também conhecida como “molhabilidade”.

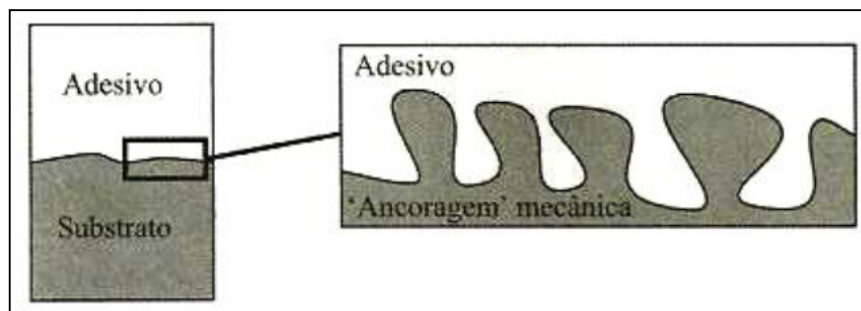
2.1.2.3 As Teorias de Adesão

Conforme anteriormente citado, várias teorias explicam o mecanismo de adesão. Algumas delas são mais específicas para alguns tipos de substratos e adesivos. A seguir, colocam-se as mais significativas para o estudo proposto.

Teoria Mecânica

Trata-se da teoria mais antiga proposta (SILVA; MOURA; MAGALHÃES, 2007). Sabe-se que as superfícies de sólidos nunca são completamente lisas. São compostas de picos e vales, de acordo com a rugosidade superficial de cada substrato. Espera-se de um bom adesivo, que ele possa preencher os espaços vazios entre as faces dos picos e vales, expulsando bolhas de ar presas. Quando o adesivo endurece, mantém o substrato unido por meio de um ancoramento mecânico. Uma boa maneira de aumentar a adesão é trabalhando aumentando-se a rugosidade do material. De acordo com a teoria mecânica de adesão, aumenta-se a área de contato do adesivo com o substrato, tem-se uma maior ancoragem mecânica (PETRIE, 2000). A Figura 4 esquematiza o efeito da teoria da adesão mecânica entre o adesivo e o substrato.

Figura 4 – Princípio da teoria mecânica de adesão



Fonte: Silva, Moura e Magalhães (2007)

Embora muitas aplicações adesivas possam ser explicadas pelo intertravamento mecânico, o fato de poder-se ter adesões bem resistentes em superfícies bastante lisas, prova que nem sempre os efeitos mecânicos são de primordial importância. (NARDIN, 2003)

A Influência da Rugosidade Superficial na Teoria Mecânica de Adesão

A rugosidade superficial influencia na adesão pelo efeito do intertravamento mecânico. Com superfícies mais rugosas o adesivo precisa passar através do substrato para que o arrancamento ocorra. O que geralmente ocorre é que a rugosidade, ou micro saliências causam a deformação plástica do adesivo e este, por sua vez, absorve energia. Consequentemente, a força da união adesiva aumenta. (PETRIE, 2000)

Outro benefício do intertravamento mecânico é que uma superfície rugosa fornece uma barreira à propagação de trinca. Em uma superfície lisa, uma pequena dissipação de energia é necessária para separar os substratos. Neste caso, os substratos irão apenas “desprender-se” um do outro. Entretanto, se a superfície for rugosa, então uma interface tortuosa entre os substratos agirá como barreira na separação dos substratos. Assim, então, aumentando a força suportada pela união (PETRIE, 2000). Figura demonstrativa no Anexo F.

Um fator importante a ser considerado é formação de bolhas de ar. Uma vez que se tenha uma superfície rugosa, com vales profundos e, conseqüentemente, longas paredes de picos, a aplicação do adesivo tende a não conseguir expulsar todo o ar presente nestes vales. (NARDIN, 1993). De acordo com Bikerman (1961), as bolhas de ar presas entre o adesivo e substrato, tendem a migrar para dentro da camada adesiva, durante o processo de cura, criando uma camada fraca que interferirá na força coesiva da junta.

Uma superfície rugosa fornece maior área de colagem do que uma superfície lisa. Essa área maior contribui para distribuição da força aumentando a resistência da junta. Entretanto, um alto grau de rugosidade da superfície contribui para formação de concentrações de tensões na junta, o que reduz a força. (JENNINGS, 1972)

Para o aço ao carbono, objeto de estudo desta pesquisa, não foram encontradas evidências bibliográficas que correlacionem os valores de rugosidade superficial com a resistência da junta adesiva. Entende-se que, em teoria, uma superfície lixada é mais rugosa que uma superfície laminada, que por sua vez, é mais rugosa que uma superfície polida. A teoria mecânica e a influência da rugosidade superficial do substrato, tendem a ditar que os resultados obtidos por este estudo são encontrar falhas coesivas para as juntas laminadas e lixadas e falha adesiva para a junta polida.

Teoria da Adsorção ou Molhabilidade

Nesta teoria, entende-se que a adesão se dá pelo contato molecular entre dois materiais e as forças de atração se desenvolvem na superfície. A adesão resulta da adsorção de moléculas de adesivo pelo substrato ativando as forças de van der Waals. Para que estas de atração passem a atuar, ambas as superfícies devem estar intimamente próximas, não ultrapassando distâncias acima de cinquenta nanômetros. O processo de estabelecimento contínuo de contato entre o adesivo e o substrato é conhecido como “molhagem”. Uma boa molhabilidade garante que o adesivo flua dentro dos vales da superfície dos substratos. Em uma superfície com molhabilidade pobre o adesivo cria uma ponte sobre os vales, interligando os picos. Dessa maneira, as distâncias entre as superfícies ultrapassam o valor citado, impedindo a atuação das forças de adesão, além de reduzir a área de contato do adesivo e substrato e aprisionar minúsculas bolhas de ar na interface de adesão, que fragilizarão a junta (PETRIE, 2000).

A molhabilidade de um adesivo sobre uma superfície pode ser determinada medindo-se o ângulo de contato que uma gota de adesivo se forma com a superfície do substrato. A mesma é favorecida quando a energia de superfície do substrato é alta e a tensão superficial do líquido é baixa. Para uma boa molhabilidade a tensão superficial do adesivo deve ser menor que a do substrato. (SILVA; MOURA; MAGALHÃES, 2007).

No Anexo G tem-se uma relação entre o ângulo de contato de gota com o grau de molhabilidade na superfície.

Teoria da Camada Fraca

Uma falha em uma junta adesiva próximo da interface de adesão (falha coesiva), normalmente é causada por uma fina camada de baixa resistência localizada nesta região. A teoria da camada fraca sugere que fatores contaminantes como ar, poeira, óleos, óxidos e etc, podem facilitar a formação dessa camada que, prejudicará a interface de adesão, reduzindo a resistência da junta. Estes contaminantes tendem a migrar para a camada adesiva durante a cura do mesmo, ou mesmo posteriormente (umidade). A presença desta camada reduz a força coesiva da união e, conseqüentemente, a força máxima de ruptura da junta. Tomando-se como base a teoria da camada fraca, criaram-se alguns passos para a preparação da superfície do substrato que mais tarde será descrito.

2.1.3 Classificação dos Adesivos Estruturais

Os adesivos estruturais possuem três bases de construção distintas: Acrílica, Epóxi e Poliuretanos. As bases definem o comportamento do adesivo perante determinadas aplicações. O conhecimento das principais propriedades das bases adesivas auxilia a correta especificação do produto para se absorver o máximo de eficiência da junta.

2.1.3.1 Adesivos base Epóxi

É provavelmente a família de adesivos mais versátil existente, uma vez que, devido a sua boa molhabilidade, possuem um excelente comportamento em muitos substratos, exceto polímeros e elastômeros que possuem uma energia de superfície muito baixa. Adesivos Epóxi foram introduzidos na indústria automotiva e aeroespacial, no ano de 1946 (SILVA; MOURA; MAGALHÃES, 2007).

Após curados, os adesivos de base epóxi, possuem uma excelente resistência a tração e uma fraca resistência ao arrancamento, porém podem ser modificados para apresentar melhor comportamento. Entre os principais benefícios do seu uso, estão a excelente resistência à altas temperaturas, óleos, umidade, solventes e agentes corrosivos em geral (PETRIE, 2000).

Entre os fatores que limitam seu uso, destacam-se o elevado tempo de cura total, que pode chegar a 72 horas e seu baixo alongamento, na casa dos 5%, que pode prejudicar aplicações onde há constante vibração ou que exija um adesivo menos rígido (LORD CORPORATION 2012).

2.1.3.2 Adesivos base Poliuretano

São adesivos extremamente flexíveis, ao contrário dos epóxidos, podendo chegar a alongamentos superiores a 120%. Essa propriedade dá aos poliuretanos uma boa resistência ao corte e ao arrancamento. Não são tão bons quanto os epóxidos quando se trata de resistência a agentes corrosivos, porém seu bom desempenho de adesão estrutural e seu alongamento o torna uma boa alternativa para várias aplicações.

Limitam seu uso, a necessidade de uma superfície bem limpa e preparada, algumas vezes com uso de primers ou aditivos para total eficiência do adesivo e sua sensibilidade à variação de proporção de mistura quando bi-componente. A variação da mistura pode

comprometer fortemente o adesivo, por isso limita-se suas aplicações a bisnagas ou seringas de proporção controlada (LORD CORPORATION, 2012).

2.1.3.3 Adesivos base Acrílico Modificado

É a base adesiva que apresenta maior resistência ao corte para aplicações com metais em pelo menos um dos substratos e o objeto deste estudo. São termoendurecíveis e também designados de acrílicos reativos para que se diferenciem de outros acrílicos sensíveis à pressão (SILVA; MOURA; MAGALHÃES, 2000).

São encontrados como bicomponentes, sendo um adesivo e um ativador com proporção de acordo com cada modelo e fabricante. Sua cura se dá pela reação química entre os componentes e geralmente é muito rápida. Cerca de 80% da cura total se dá entre 20 minutos e 1 hora (A & S ADESIVOS E SELANTES, 2011). Essa propriedade o torna uma excelente opção em linhas de alta velocidade onde as peças precisem ser movimentadas rapidamente após a aplicação do adesivo.

Com relação a sua resistência, os adesivos acrílicos tem um ótimo comportamento sob condições ambientais severas, inclusive resistindo bem à alta umidade e salinidade corrosiva. Possuem, também uma boa resistência ao arrancamento, ao corte e a impactos, trabalhando em temperaturas abaixo dos 120°C. Para temperaturas mais altas os adesivos de base epóxi ou poliuretânicos tem melhor comportamento (GARCIA, 2008).

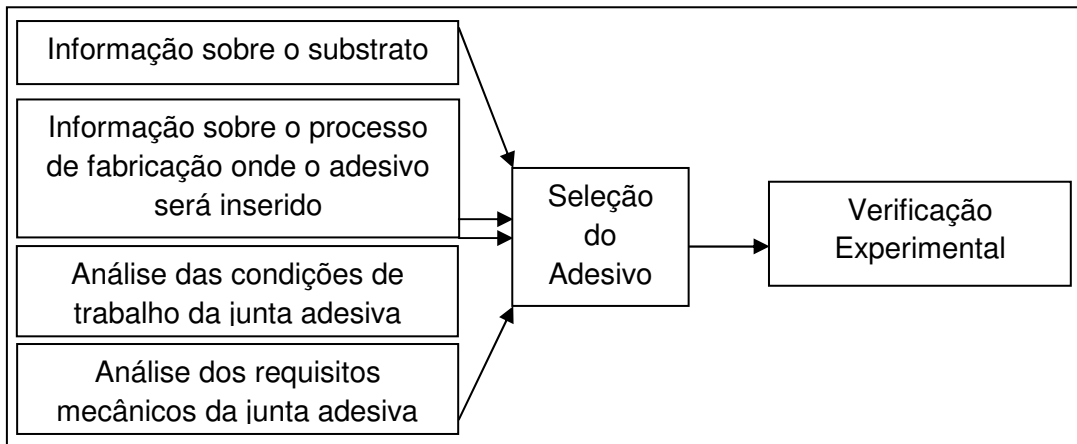
Em sua aplicação, podem ser usados com aplicadores de bisnagas, de baldes ou tambores, ou fazendo a mistura manualmente, já que sua sensibilidade à proporção é mais alta que os adesivos de outras famílias (LORD CORPORATION, 2012).

Entre os fatores que podem limitar sua utilização estão o fato de serem adesivos relativamente caros, comparando-se com epóxidos e poliuretânicos e seu odor bastante forte de origem monomérica, quando ainda pastoso, que pode incomodar os aplicadores. (SILVA; MOURA; MAGALHÃES, 2007)

2.1.4 Seleção de Adesivos Estruturais

A seleção do adesivo é fator primordial no projeto de uma junta. É através da análise das condições de trabalho do adesivo, dos requisitos mecânicos e da aplicação produtiva que se adquire informações necessárias para a escolha do melhor adesivo para a união. (PETRIE, 2000) A Figura 5 mostra os passos importantes para seleção do adesivo.

Figura 5 – Processo de seleção de adesivos



Fonte: Silva, Moura, Magalhães (2007)

2.1.4.1 Análise do Substrato

Todo projeto informacional de inserção de adesivos inicia na análise dos substratos a serem aderidos. De acordo com molhabilidade de cada adesivo e a energia de superfície de cada substrato, alguns produtos são mais adequados a determinados materiais. (PETRIE, 2000)

Cálculos e ensaios de energia de superfície são relativamente complexos. Uma maneira interessante de escolher o adesivo ideal para os substratos é usando tabelas informativas de origem experimental, como é o caso do quadro presente no ANEXO A.

2.1.4.2 Análise do Processo de Fabricação

O mercado nacional está cada vez mais competitivo e é uma necessidade das empresas trabalhar com altas produções e baixa mão de obra para reduzir os custos de fabricação de seus produtos (PACKHAM, 2005).

Seguindo esta linha de raciocínio, a análise do processo de fabricação pela qual o adesivo será aplicado é de extrema importância.

Os adesivos estruturais possuem algumas propriedades de comportamento de aplicação distintas entre si, de acordo com modelos e fabricantes, que são fatores importantes para o projeto. São elas, descritas de acordo com o Quadro 1:

Quadro 1 – Conceitos Importantes na Adesão Estrutural

Propriedades do Adesivo Importantes para Fabricação	
Open Time:	Tempo de Manuseio do adesivo, Tempo para fechar-se a união.
Handling Time:	Tempo necessário para se poder manusear a junta
Cure Time:	Tempo de cura total do Adesivo
Shelf-Life:	Tempo de armazenamento do adesivo, validade.

Fonte: (Petrie, 2000)

2.1.4.3 Análise das Condições de Trabalho

Entre os principais fatores que devem ser analisados para uma correta escolha do adesivo, estão:

Temperatura de trabalho: À temperatura ambiente, boa parte dos adesivos tem um excelente comportamento. À medida que se tem temperaturas mais baixas ou mais elevadas é necessária a verificação da propriedade do adesivo (PACKHAM, 2005).

Umidade: Alguns adesivos monocomponentes tem cura ativada por umidade, o que pode ocasionar a cura antes do previsto, outros podem ser atacados por ela e ter a união prejudicada (PETRIE, 2000).

Agentes corrosivos: A propriedade de resistência a agentes corrosivos varia de acordo com as bases adesivas. É necessária uma boa análise dos agentes que ficarão em contato direto e indireto com o adesivo para uma correta especificação. No ANEXO B tem-se uma comparação breve entre as bases adesivas e condições de trabalho da junta (SILVA, MOURA E MAGALHÃES).

2.1.4.4 Análise dos Requisitos Mecânicos da Junta

Para juntas adesivas estruturais, os requisitos mecânicos são os pontos principais a serem analisados para a seleção do adesivo (SKEIST, 1965). O conjunto de informações adquiridas até aqui ditará qual a força suportada que se poderá esperar do adesivo.

Alguns outros fatores como resistência a fadiga, absorção de vibração e impactos devem ser verificados neste momento.

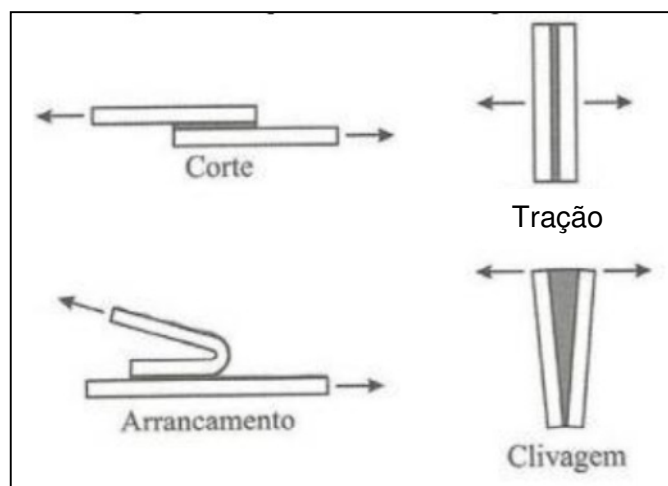
2.1.5 Projeto de Juntas Adesivas e Cálculos de Projeto

O projeto de uma junta adesiva requer análise de vários pontos importantes, uma vez que o design da mesma ditará como a junta sobreviverá a carregamentos externos. Sabe-se que os adesivos tendem a suportar muito bem carregamentos de cisalhamento e não são muito bons contra tração pura ou arrancamento (SILVA; MOURA; MAGALHÃES, 2007). Dessa maneira, juntas adesivas eficientes são projetadas prevendo carregamentos mais cisalhantes. No ANEXO C, tem-se alguns tipos de juntas indicados para o melhor aproveitamento do adesivo.

2.1.6 Análise de Tensões

Atualmente a análise das tensões geradas por carregamentos em juntas adesivas pode ser medida através de ensaios normativos com máquinas de tração ou de maneira computacional através softwares de elementos finitos. Para entender os resultados de um gráfico de tensões ou de um modelo de elementos finito, é necessário compreender os tipos de carregamentos possíveis em uma junta adesiva. A Figura 6 mostra os tipos de carregamentos típicos em juntas adesivas.

Figura 6 – Tipos de carregamento em juntas adesivas



Fonte: Silva, Moura, Magalhães (2007)

2.1.6.1 Tração

Tensões de tração se formam quando forças atuando perpendicularmente ao plano da junta são distribuídas uniformemente ao longo da área colada. Tensões puramente trativas costumam apresentar um médio desempenho em relação aos outros sistemas de fixação, porém este argumento depende exclusivamente da sollicitação mecânica em questão (SILVA; MOURA; MAGALHÃES, 2007).

2.1.6.2 Corte ou Cisalhamento

Esse tipo de tensão surge quando forças que atuam no plano do adesivo tendem a separar os substratos. São relativamente fáceis de fabricar e são muito usadas na prática (HABENICHT, 2009). Neste tipo de junta, toda a área colada resiste ao cisalhamento, tornando uma junta muito resistente e aproveitando toda a eficiência do adesivo (PETRIE, 2000).

2.1.6.3 Clivagem e Arrancamento

São os tipos de tensões onde se situam as menores forças de adesão de juntas adesivas. A clivagem ocorre quando forças na extremidade de uma junta rígida atuam para separar os substratos. Já no arrancamento tem-se uma espécie de despelamento, ou descascamento onde forças atuam nas extremidades de um dos substratos puxando-o para a direção oposta (SILVA; MOURA; MAGALHÃES, 2007).

2.1.7 Preparação de Superfícies

Um dos segredos de uma boa adesão está em se ter uma superfície de substrato preparada. Um substrato limpo e com uma boa energia de superfície é elemento chave para adesão (PETRIE, 2000). Óxidos, óleos, poeira e etc, devem ser retirados da superfície do substrato através de uma limpeza simples com álcool isopropílico ou acetona leve ou de forma mais severa através de lixamento. O lixamento ainda pode aumentar a rugosidade da superfície e melhorar a aderência. Essa limpeza, evita a formação da camada fraca que, como visto anteriormente, prejudica o desempenho da junta (SILVA; MOURA; MAGALHÃES, 2007).

A preparação de superfície pode variar de acordo com a base adesiva que se vai aplicar. Sensibilidade a interferências na adesão, também é uma propriedade distintas entre os modelos.

2.1.8 Durabilidade e Tipos de Falhas

2.1.8.1 Durabilidade

O estudo da durabilidade de juntas adesivas estruturais é um assunto de enorme importância visando sua utilização em longo prazo. Muitas falhas das uniões são provocadas por problemas de durabilidade resultantes da exposição a condições hostis (SILVA; MOURA; MAGALHÃES, 2007). A durabilidade considera os efeitos da tensão, da umidade e da temperatura sobre o adesivo e substratos. As tensões cíclicas levam uma junta não durável à falha por fadiga (PETRIE, 2000). Para determinar a durabilidade de uma junta adesiva, submete-se a união a ensaios acelerados de temperatura e umidade. Extrapolando-se os resultados pode-se conhecer o tempo de vida útil do produto.

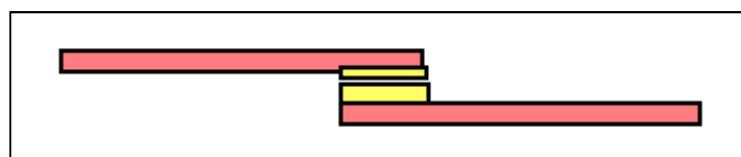
Juntas adesivas estruturais, normalmente, possuem resistência a esforços dinâmicos melhores que tradicionais métodos de união. Entre os fatores que explicam esse comportamento estão o alongamento e a maior área sob união (GOGLIO, ROSSETO, 2007).

2.1.8.2 Tipos de Falhas

Existem muitos tipos de falhas e variam de acordo com os substratos e os adesivos trabalhados. Na união metal-metal as falhas mais comuns são: (LORD CORPORATION, 2012)

Falha Coesiva: É quando as estruturas intermoleculares do adesivo se rompem sem que o adesivo solte do substrato, como mostra a Figura 7. É uma falha preferida em uniões adesivas, pois nota-se que o adesivo teve total aderência ao substrato.

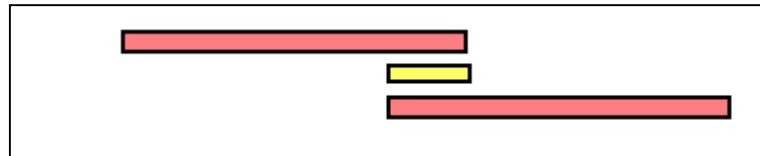
Figura 7 – Representação de falha coesiva



Fonte: Adaptado de Lord Corporation (2012)

Falha Adesiva: É uma falha indesejável à união. Esta falha ocorre quando o adesivo se solta do substrato, deixando a superfície limpa. Essa falha representa a falha de adesão substrato/adesivo, como mostra a Figura 8.

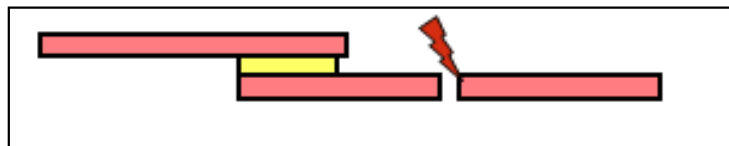
Figura 8 – Representação de falha adesiva



Fonte: Adaptado de Lord Corporation (2012)

Falha do Substrato: Outra falha preferida em uniões adesivas. Ocorre a ruptura do substrato, de acordo com a Figura 9, sem que ocorra a ruptura ou a soltura do adesivo.

Figura 9 – Representação de falha do substrato



Fonte: Adaptado de Lord Corporation (2012)

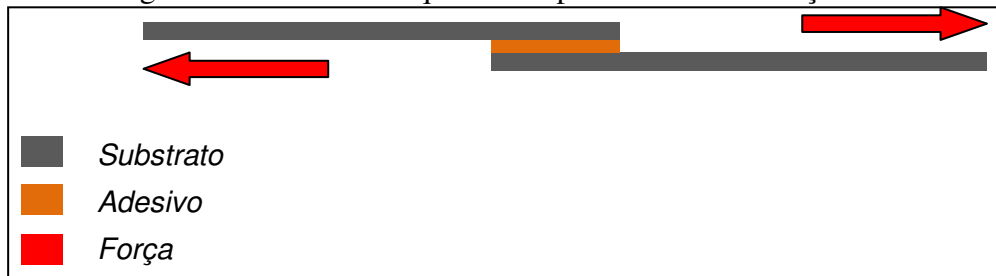
2.1.9 Ensaios Mecânicos

2.1.9.1 Ensaio de Tração Cisalhante

Trata-se do ensaio mais comum para testes simples destes tipos de juntas. O ensaio de tração, regido pela norma ASTM D 1002, consiste em tracionar na direção do corte do adesivo, um corpo de prova unido com o adesivo em questão.

De acordo com esta norma, os substratos devem medir 25,4mm de largura com 101,6mm de comprimento e espessura do próprio material de utilização. Os substratos devem ser unidos com o adesivo em uma área de 25,4mm x 25,4mm (1pol²) e tracionados no sentido do corte, como mostra a Figura 10.

Figura 10 – Desenho esquemático para o ensaio de tração



Fonte: Adaptado de Hibbeler (2009)

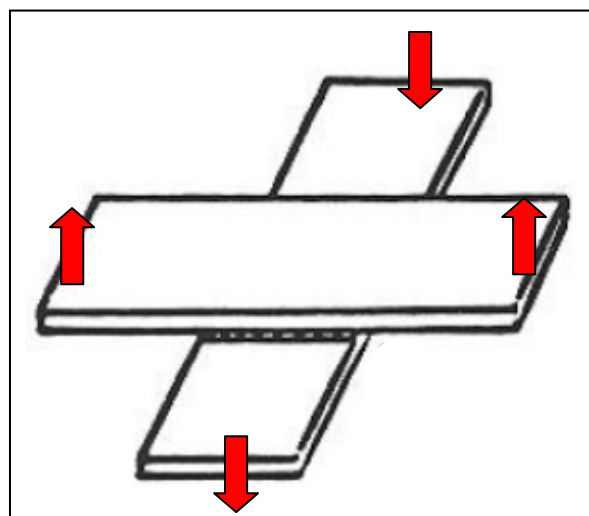
Como resultado deste ensaio, tem-se o valor médio em Newton (N) dos carregamentos cisalhantes suportados pelas juntas.

2.1.9.2 Ensaio de Tração Cruzada

Este ensaio visa testar a tensão de ruptura da junta sob tração pura e é feito de acordo com a norma SAE J1553. Este ensaio foi desenvolvido inicialmente para teste de uniões de materiais compósitos, porém o mesmo pode ser usado para teste metal-metal. A diferença principal é o tipo de falha esperada que para metal-metal é do tipo adesiva. (PETRIE, 2000).

Este ensaio consiste em unir dois substratos com comprimento de 76,2mm, largura de 25,4mm e espessura própria do substrato em questão. Deve-se unir com adesivo os dois substratos, prevendo uma área aderida de 25,4mm x 25,4mm (1pol²). A Figura 11 mostra o sentido do ensaio.

Figura 11 – Desenho esquemático para o ensaio de tração cruzada



Fonte: Petrie (2000)

Espera-se como resultado deste ensaio, uma tensão média de ruptura sob tração pura. Como resultados deste ensaio, carregamentos médios de tração em Newton (N) serão avaliados.

2.1.10 Vantagens e Desvantagens da Utilização de Adesivos

2.1.10.1 Vantagens do uso de adesivos estruturais

- a) Distribuição uniforme das tensões ao longo da área unida;
- b) Redução de peso ante a fixação que usa metais na junta como rebites e soldas;
- c) Amortecimento de Vibrações;
- d) Permite a união de materiais diferentes;
- e) Liberdade de design: Permite a mais variada gama de colagens em superfícies que não necessariamente retas;
- f) O adesivo cria um contato contínuo com as superfícies ligadas;
- g) Se comparado a rebiteagem, reduz peso do produto final;
- h) Ocorre redução de custos de fabricação total, pois não há furações, roscas ou processos posteriores (SILVA; MOURA; MAGALHÃES, 2007).

2.1.10.2 Desvantagens do uso de adesivos estruturais

- a) Alterações de projeto: O projeto de adesão requer solicitações mecânicas de cisalhamento e evitam-se solicitações de arrancamento ou tração pura;
- b) Apresentam limitações a condições extremas como altíssimas temperaturas ou agentes corrosivos severos;
- c) Normalmente não possuem cura instantânea, sendo necessário aguardar o *handling time* para movimentação da peça;
- d) Torna-se necessário a preparação da superfície antes da adesão (SILVA; MOURA; MAGALHÃES, 2007).

2.2 REBITAGEM

Juntas rebitadas são amplamente empregadas na indústria mecânica atual. Rebites são convenientes, de fácil aplicação, são simples de encontrar no mercado e possuem um

comportamento mecânico bastante interessante como alternativa de fixação permanente. Aeronaves, furgões móveis, ônibus e etc, são alguns exemplos de produtos que possuem rebites em sua construção principal ou em seu revestimento externo. São os detalhes construtivos e de aplicação dos rebites que deixam a desejar ante aos modernos sistemas de fixação.

O processo de rebitagem é bastante antigo, podendo ter surgido junto com o ferro e o aço (KULAK; FISHER; STRUIK, 2001). Desde então, vem acompanhando o crescimento tecnológico e se adequando ao mercado atual.

No passado o conceito de rebitagem estava ligado a marteladas a quente que deformavam o corpo maciço do rebite prendendo-o a peça e fixando a união. Hoje esse conceito já está bem mais desenvolvido, com corpos cilíndricos não maciços e deformação através de repuxo via mandril, que fixa ao expandir o corpo do rebite e posteriormente soltando o mandril (KULAK; FISHER; STRUIK, 2001).

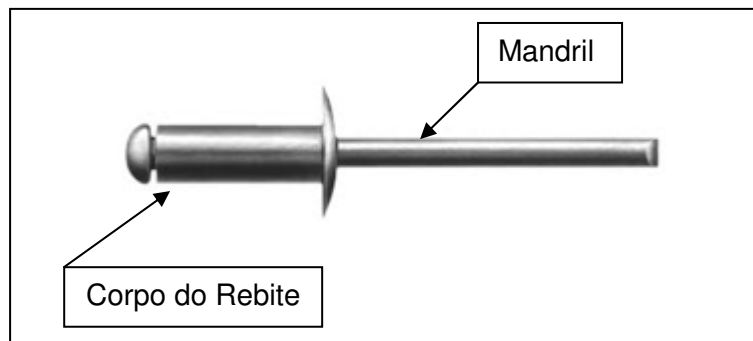
2.2.1 Os Rebites

Define-se rebite, como um elemento de fixação permanente ou semi-permanente, cuja fixação se dá pela expansão ou deformação plástica de uma de suas partes.

Existe uma gama enorme de rebites, cujas características distintas especializam cada tipo nos quesitos de aplicação, resistência mecânica, manutenção e etc. A seguir, será tratado sobre o rebite tipo repuxo aberto, objeto de estudo deste trabalho.

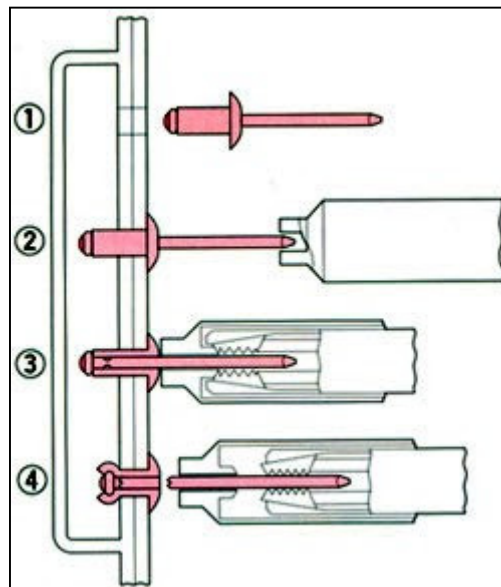
Repuxo aberto é um tipo comum de rebite que se caracteriza por ter a expansão ou deformação plástica através do repuxamento de um mandril para dentro do seu próprio corpo, na direção axial, no sentido oposto ao da aplicação. A palavra aberto caracteriza o posicionamento do mandril. A Figura 12 mostra um exemplo de rebite de repuxo aberto, especificando suas partes principais. O funcionamento do elemento é mostrado na Figura 13. Nesta figura pode-se notar o que ocorre com o mandril e o comportamento do rebite repuxo aberto durante sua expansão (KULAK; FISHER; STRUIK, 2001).

Figura 12 – O rebite de repuxo aberto e seus componentes



Fonte: Emhart Teknologies (2010)

Figura 13 – Esquema de aplicação do rebite de repuxo aberto



Fonte: Emhart Teknologies (2010)

- 1) Introduce-se o rebite no furo até que a flange ou cabeça encoste na superfície da peça
- 2) Introduce-se o rebitador no mandril do rebite
- 3) Aciona-se o rebitador que sugará o mandril forçando-o a passar pelo furo interno do rebite.
- 4) Ao atingir a peça, a extremidade do mandril se quebra, fixando a união.

O rebitador, normalmente é encontrado com acionamento manual, tipo alicate, ou pneumático, tipo pistola.

2.2.2 Função

A função de um rebite de repuxo é suportar carregamentos estáticos e dinâmicos de cisalhamento e tração de uma junta com ele fixada. Rebites de repuxo, por suas características, normalmente são empregados na união de chapas relativamente finas e sobrepostas, com o objetivo de mantê-las rigidamente unidas.

2.2.3 Aplicação

Rebites de repuxo normalmente são aplicados através de dispositivos que prendem o mandril e o puxam contra a ferramenta. Esse dispositivo pode ser manual, pneumático ou robotizado. A aplicação de rebites é um conceito simples e bastante conveniente às linhas de produção.

2.2.3.1 Requisitos para aplicação de rebites de repuxo aberto

Para obter o melhor desempenho possível em uma junta rebitada, são necessários alguns controles na aplicação:

- a) Respeitar as tolerâncias de furo indicadas em norma para cada bitola de rebite. Um rebite aplicado em furo folgado pode criar outras componentes de força na junta, podendo fragilizar a estrutura.
- b) Controlar a força de rebitagem do dispositivo. Se a força for excessiva, o rebite pode deformar a junta plasticamente ou até quebrá-la em casos mais graves. Por outro lado, se a força for muito reduzida, o mandril pode não quebrar no local definido e trazer graves problemas à junta, (KULAK; FISHER; STRUIK, 2001)

2.2.4 Materiais

A escolha do material mais indicado do rebite e mandril está diretamente ligada às resistências necessárias à junta. Os materiais mais comuns na construção de rebites repuxo são aço, aço inox e alumínio, distribuídos nas seguintes configurações, de acordo com as necessidades da junta:

2.2.4.1 Aço/Aço

Usado em juntas rebitadas de alta resistência ao cisalhamento. Devem receber proteção corrosiva superficial e, devido à tensão de escoamento do aço, são de difícil aplicação com ferramentas manuais. Normalmente o mandril e o rebite são fabricados com aços com teor de carbono entre 0,06% e 0,1%. Aços com baixo teor de carbono se deformam mais fácil em condições normais de aplicação. Em alguns casos estes materiais sofrem o tratamento térmico de recozimento visando melhorar sua deformação (EMHART TEKNOLOGIES, 2001).

2.2.4.2 Alumínio/Alumínio

Usados em juntas de baixa resistência ao cisalhamento. O rebite em alumínio traz altas velocidades de deformação com baixas forças. Indicado para peças fabricadas em materiais compósitos. O alumínio, normalmente de liga 5050 a 5056 não sofre com agentes corrosivos como o aço, portanto tratamentos superficiais não são necessários. O alumínio é um material bastante nobre, o que pode encarecer muito a união (EMHART TEKNOLOGIES, 2001).

2.2.4.3 Alumínio/Aço

É o tipo mais comum de rebite que une altas velocidades de aplicação, através do rebite de alumínio, com o baixo custo e conveniência do mandril de aço. Por ser mais resistente que o rebite, o mandril expande completamente o rebite antes da soltura.

2.2.4.4 Aço Inox/Aço Inox

Apresenta boa resistência mecânica e é resistente a corrosão, sendo uma boa alternativa para fixações expostas a agentes corrosivos severos. Normalmente são encontrados fabricados com aço inoxidável série 304 e 316.

2.2.5 Cálculos de Projeto

Uniões que utilizam rebites de repuxo como elemento fixador, em geral são projetadas para serem expostas a esforços de cisalhamento simples e trações baixas e médias. Considerando o cisalhamento simples e tração pura como esforços a serem suportados, utilizam-se valores de carregamentos em Newton (N) para expressão de dados.

2.2.6 Normas e Ensaio

Rebites de repuxo são construídos de acordo com a norma DIN 7337. Esta norma rege o dimensional de suas partes e componentes, bem como dimensional de furação e espessura rebitável. Esta norma, também especifica as tensões mínimas de cisalhamento e tração que cada rebite deve suportar.

Os ensaios que analisam a força de união de juntas rebitadas são os mesmos que analisam uniões adesivadas. O ensaio de tração cisalhante verificará a força de união ao cisalhamento e o ensaio de tração cruzada verificará o mesmo esforço sob tração pura.

2.2.7 Vantagens e Desvantagens da utilização de Rebites

2.2.7.1 Vantagens do uso de rebites

- a) A rebitagem é um sistema de fixação antigo, porém muito conceituado. Inclusive, ainda muito usado na fixação da fuselagem de aeronaves;
- b) Fixação imediata, a união pode ser movimentada logo após a aplicação;
- c) Processo de aplicação simples e mecânico;
- d) Aplicação geralmente uniforme, sem variações com temperatura e ambiente em geral;
- e) Processo não produz escórias ou cavacos, não sendo necessário acabamento final;
- f) Alta velocidade de produção;
- g) Sua produção pode ser facilmente automatizada e robotizada.

2.2.7.2 Desvantagens do uso de rebites

- a) Concentra a força de união em uma área pequena;
- b) Necessita furação que é concentrador de tensões;
- c) Por ser um elemento metálico, transmite a vibração da união;
- d) Sofre com a ação da oxidação;
- e) Maquinário para aplicação tem custo relativamente alto;
- f) Aumento de peso na estrutura;
- g) A cabeça e o remanche do rebite adicionam relevos às superfícies unidas.

3 DESENVOLVIMENTO E PROPOSTA DE ESTÁGIO

3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

3.1.1 Adesão Estrutural versus Rebitagem

Do ponto de vista técnico, espera-se de uma junta sobreposta de chapas metálicas, que ela possa suportar os carregamentos solicitados durante a vida útil do produto. Do ponto produtivo, que a junta seja de construção rápida e precisa, de maneira a reduzir ao máximo os custos de produção.

O processo de rebitagem é um dos processos mais comuns utilizados na união de chapas metálicas sobrepostas. Seguindo a linha de pensamento acima citada, o processo de união utilizando adesivos surge como uma alternativa viável e que, muitas vezes, agrega benefícios técnicos e produtivos à junta.

A rebitagem requer a furação das chapas e exige que os furos estejam concêntricos de modo a promover o alinhamento das mesmas. Durante o processo de furação por brocas ou por corte podem ocorrer deformações ao longo da espessura da chapa trazendo, em alguns casos, a ineficiência da união. O furo ainda é concentrador de tensão e pode originar trinca sob fadiga. Outro fator importante a ser considerado, é que os carregamentos ficam concentrados em áreas muito pequenas, que são, logicamente, as áreas onde o rebite se encontra. Aumentar a área sob carregamento exige muitos furos com pouco espaçamento entre eles. Nestes casos devido a paredes muito pequenas, pode-se fragilizar a junta. Entre os fatores positivos da rebitagem destaca-se a fixação instantânea da peça, podendo ser movimentada ou carregada logo após a união.

A grande maioria dos adesivos estruturais requer que a peça mantenha-se imóvel durante o tempo necessário para que ocorra a reação de adesão. Este parece ser o fator primordial que freia a substituição de rebites por adesivos, mas já há muitas maneiras de resolver esse problema e usufruir dos muitos benefícios da adesão estrutural.

A aplicação do adesivo varia de acordo com os tipos de substratos utilizados e a energia de superfície dos mesmos exigindo uma limpeza e, ou preparação desta superfície. Por outro lado não exige furos resultando em ganho de processo produtivo e aumento de força suportada. O aumento de cargas pode ser explicado, também, pela maior área sob carregamento na adesivagem. Outros fatores ainda somam pontos na adesivagem, como absorção de vibração e proteção contra agentes corrosivos.

3.1.2 O Processo de Rebitagem de Chapas Metálicas

3.1.2.1 Rebite

O tipo de rebite escolhido para o estudo do problema é o repuxo aberto. Este rebite é o mais utilizado no mercado por ter um preço acessível e atender a uma gama imensa de produtos com a conveniência da aplicação manual.

Como material do rebite, escolheu-se o Alumínio/Aço. Também o mais utilizado na indústria esse conjunto agrega o preço e praticidade do aço como material do mandril e a facilidade de deformação do alumínio compondo o rebite. Dessa forma tem-se uma aplicação rápida e de baixo custo.

O tamanho do rebite escolhido foi a bitola de 4,8mm e o comprimento de 8mm. De acordo com a norma DIN 7337, é tamanho indicado para a fixação de chapas sobrepostas de aço com baixo teor de carbono que formam um sanduíche de aproximadamente 3mm. O Quadro 2, que foi copiado da norma DIN 7337 justifica tal escolha.

Quadro 2 – Tabela de espessura rebitável para rebites Alumínio/Aço

d_1	2,4*)	3	3,2	4	4,8	5	6*)
l	Grip length range						
4	0,5 to 2	0,5 to 1,5	—	—	—	—	—
6	2 to 4	1,5 to 3,5	1,5 to 3	2 to 3	—	—	—
8	4 to 6	3,5 to 5,5	3 to 5	3 to 4,5	—	—	2 to 4
10	—	5,5 to 7	5 to 6,5	4,5 to 6	—	—	4 to 6

Fonte: DIN 7337 (1991)

A Figura 14 mostra o rebite escolhido.

Figura 14 – Imagem do rebite escolhido



Fonte: Arquivos Macrosul (2012)

3.1.2.2 Processos necessários para a rebitagem

O Quadro 3 mostra os passos necessários no processo de rebitagem. No ANEXO C, esta mesma sequência é apresentada com imagens que exemplificam o processo.

Quadro 3 – Passos necessários no processo de rebitagem

Passo	Processo	Objetivo
1	Furação	Confeccionar um furo com diâmetro necessário para a inserção do rebite
2	Sobreposição da junta, deixando os respectivos furos concêntricos	Posicionar as chapas para união
3	Inserção do rebite no furo	Promover a rebitagem
4	Acoplamento da ferramenta de rebitagem (rebitador)	Promover a Rebitagem
5	Rebitagem e retirada da ferramenta	

Fonte: Arquivos Macrosul (2013)

A Figura 15 mostra a junta já rebitada.

Figura 15 – Junta rebitada



Fonte: Arquivos Macrosul (2012)

3.2 PROPOSTA DE INTERVENÇÃO

A finalidade deste trabalho será estudar o comportamento mecânico de uma junta sobreposta de chapas de aço carbono com espessuras de 1,5mm unidas com rebite e com adesivos. Como citado anteriormente, a carga suportada pela junta adesiva é dependente do tipo de superfície substrato. Dessa forma, a análise da adesão será feita em superfícies laminadas, lixadas e polidas, utilizando uma área de 645,16mm² (uma polegada quadrada) de modo a ligar o valor da força ao tipo de superfície. Os resultados obtidos serão usados como conclusão de viabilidade técnica para substituição de dos rebites pelo adesivo. Se os resultados forem satisfatórios ao adesivo, serão ensaiados outros corpos de prova para a determinação da área ótima de adesão que possui a mesma força suportada por uma unidade de rebite. Este trabalho também fará um breve estudo de custos de produto e processo entre as juntas com o objetivo de demonstrar os benefícios produtivos da união.

3.2.1 O Adesivo

O Adesivo escolhido como objeto deste estudo foi o modelo MAXLOK T6/MX da fabricante Lord. Esse adesivo de base acrílica modificada é o produto mais indicado para a adesão de materiais metálicos e não exige um controle muito grande na preparação de superfície, tornando-se conveniente para uso na indústria mecânica em geral. Além disso, possui uma cura rápida que facilita seu uso em linhas de produção. Trata-se de um produto de fabricação nacional, bicomponente e aplicado através de bisnagas. O boletim técnico com as descrições do adesivo usado foi exposto no Anexo H.

3.2.2 O Processo de Adesão de Substratos

O processo de adesão de uma junta metálica adesiva, segue os passos de processo descritos no Quadro 4. Este mesmo processo foi detalhado com imagens no ANEXO D deste trabalho.

Quadro 4 – Passos para o processo de adesão de substratos

Passo	Processo	Objetivo	Procedimento
1	Preparação da Superfície	Retirar da superfície impurezas, óleos e graxas que podem reduzir ou impedir a adesão.	Passar um pano embebido em álcool isopropílico na região da adesão.
2	Descarte da parte inicial do adesivo	Garantir que o adesivo tenha seus componentes A e B bem misturados para promover a união.	Expurgar um cordão de pelo menos 10mm de comprimento antes da colagem.
3	Aplicação do adesivo	Inserir o mecanismo de fixação	Aplicar o adesivo na região limpa em apenas um dos substratos da junta.
4	Sobreposição da Junta	Para posicionar os substratos	Sobrepor o substrato com o adesivo sobre o substrato que será aderido. Pressionar para distribuir o adesivo em toda área de união.

Fonte: Arquivos Macrosul (2012)

3.3 MÉTODO DE ANÁLISE

Para a comparação da forças de união entre a junta colada e a rebitada foram executados dois ensaios distintos: Tração Cisalhante e Tração Cruzada. Estes ensaios foram escolhidos, pois reproduzem os dois carregamentos mais comuns em uniões de chapas metálicas que utilizam rebites e adesivos como fixadores.

Para os rebites, de acordo com a norma DIN 7337, espera-se que o mesmo suporte um mínimo de 1400N sob carregamento cisalhante, exposto no Quadro 5 e um mínimo de 1200N sob carregamento de tração, exposto no Quadro 6.

Quadro 5 – Força mínima de rebites sob cisalhamento

Material do Corpo do Reite	Diâmetro						
	2,4	3	3,2	4	4,8	5	6
	Minimum shear force, in N						
Alumínio	300	500	600	800	1400	1600	2500
Aço	—	800	1000	1500	2400	2600	3300
Inoxidável A2	—	1600	1800	2500	3800	4200	—

Fonte: DIN 7337 (1991)

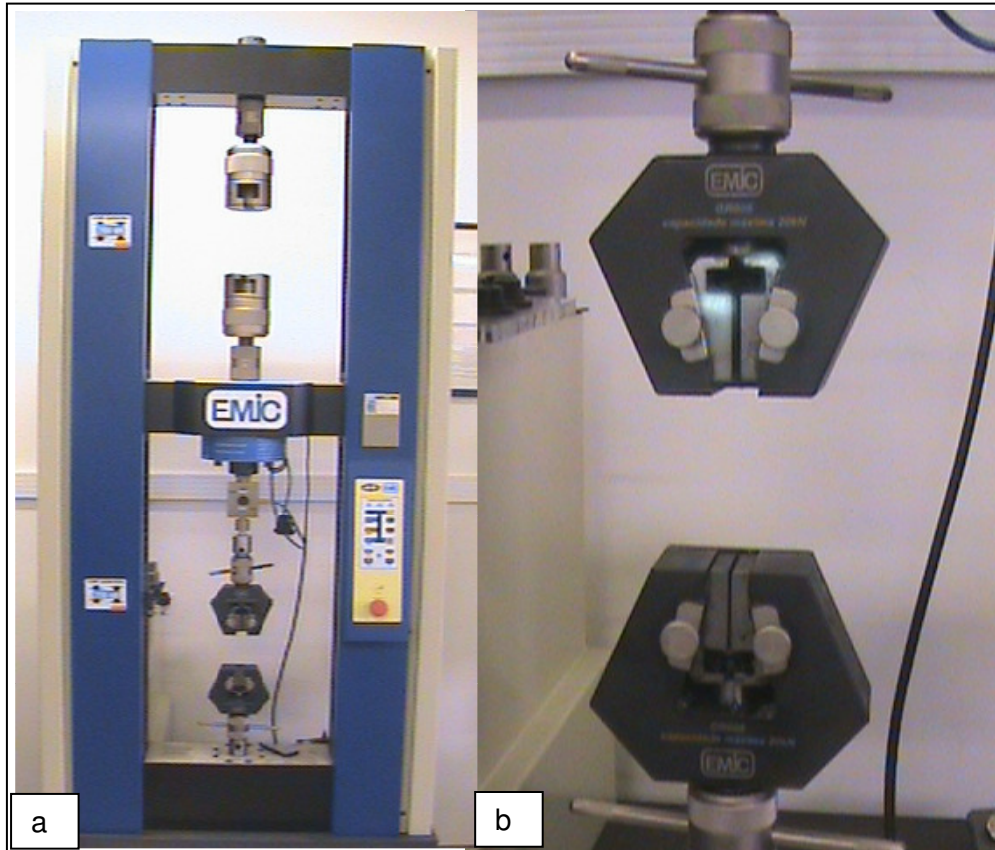
Quadro 6 – Força mínima de rebites sob tração

Material do Corpo do Reite	Diâmetro						
	2,4	3	3,2	4	4,8	5	6
	Minimum tensile force, in N						
Alumínio	300	400	500	800	1200	1300	2000
Aço	—	900	1100	2000	3000	3200	3800
Inoxidável A2	—	2000	2300	3500	4500	5000	—

Fonte: Adaptado de DIN 7337 (1991)

Para o ensaio de tração cisalhantes, foram construídos 24 corpos de prova, sendo 6 para juntas rebitada, 6 para junta adesiva de superfície laminada, 6 para junta adesiva de superfície lixada e 6 para junta adesiva de superfície polida. Este ensaio foi executado de acordo com a norma ASTM D 1002 que especifica que os corpos de prova deverão medir 25,4mm de largura com 101,6mm de comprimento. A espessura utilizada é a do material de estudo que é de 1,5mm. O equipamento usado foi uma máquina universal de ensaios de tração e compressão da marca EMIC, com capacidade de carga máxima de 20 toneladas. A célula de carga utilizada para o ensaio dos corpos de prova é de carga máxima de 2 toneladas e a velocidade de ensaio de 1,27mm/minuto, de acordo com a própria norma. A Figura 16 mostra o equipamento utilizado (a) e os dispositivos de agarramento para o ensaio de tração cisalhante (b).

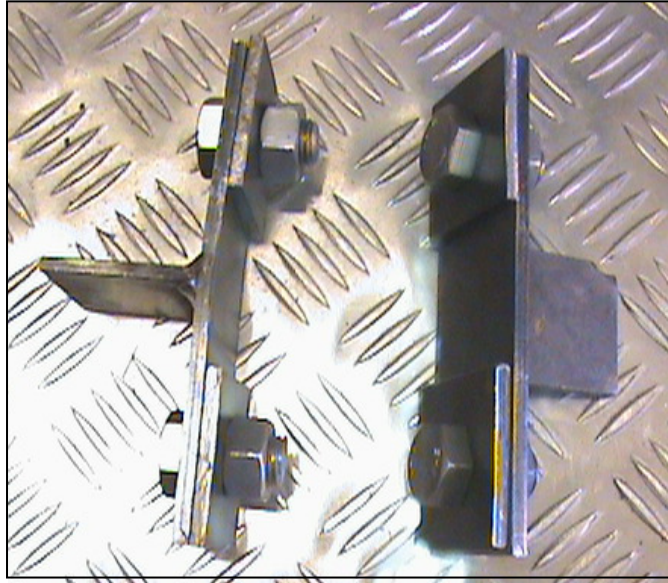
Figura 16 – Equipamento de ensaio de tração cisalhante e dispositivos de agarramento



Fonte: Arquivos Macrosul (2012)

O ensaio de tração cruzada exige a mesma quantidade de amostras para cada tipo de junta. A norma que rege este ensaio é a SAE J1553 que especifica que os corpos de prova devem medir 76,2mm de comprimento, largura de 25,4mm e espessura própria do substrato em questão que é de 1,5mm. O equipamento e célula de carga são os mesmos do ensaio de tração cisalhante, apenas modificando o dispositivo de agarramento que é próprio para este ensaio. A Figura 17 mostra o dispositivo de agarramento a ser usado. Neste ensaio, a velocidade é 10 vezes maior, de 12,7mm/min.

Figura 17 – Dispositivos de agarramento para o ensaio de tração cruzada.



Fonte: Arquivos Macrosul (2012)

Ambos os ensaios trouxeram valores de carregamentos em Newton (N) que geraram gráficos específicos para o estudo comparativo.

A preparação dos corpos de prova seguiu o especificado nas respectivas normas.

De maneira a correlacionar a rugosidade do material com o carregamento suportado, uma medição de rugosidade superficial foi feita nas superfícies laminada, lixada e polida.

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.3.1 Análise de rugosidade dos substratos das juntas adesivas

A leitura da rugosidade das superfícies dos substratos foi determinada usando um equipamento perfilômetro Ambios xp-2, do Laboratório de Laser e Óptica, localizado no Instituto da Física (IF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS),

Para as juntas laminada, lixada e polida, obtiveram-se os seguintes resultados, respectivamente:

Ra: 0,263 μm - Rq: 0,339 μm - Rt: 2,033 μm - Rz: 1,029 μm - Rmax: 2,033 μm

Ra: 0,321 μm - Rq: 0,429 μm - Rt: 2,787 μm - Rz: 1,227 μm - Rmax: 2,738 μm

Ra: 0.006 μm - Rq: 0.014 μm - Rt: 0.119 μm - Rz: 0.018 μm - Rmax: 0.102 μm

Os gráficos de rugosidade foram expostos no Anexo I.

3.3.2 Corpos de prova

Os corpos de prova foram construídos obedecendo às normas ASTM D 1002 e SAE J1553, conforme descritos no capítulo anterior, para os ensaios de tração cisalhante e tração cruzada, respectivamente. A preparação da superfície foi apenas a limpeza com álcool isopropílico.

A sequência de figuras mostra os corpos de prova das juntas rebitadas. Figura 18 para a junta sob esforço cisalhante e a Figura 19 para junta sob esforço de tração pura.

Figura 18 – Corpo de prova de junta rebitada – Ensaio de cisalhamento



Fonte: O autor (2013)

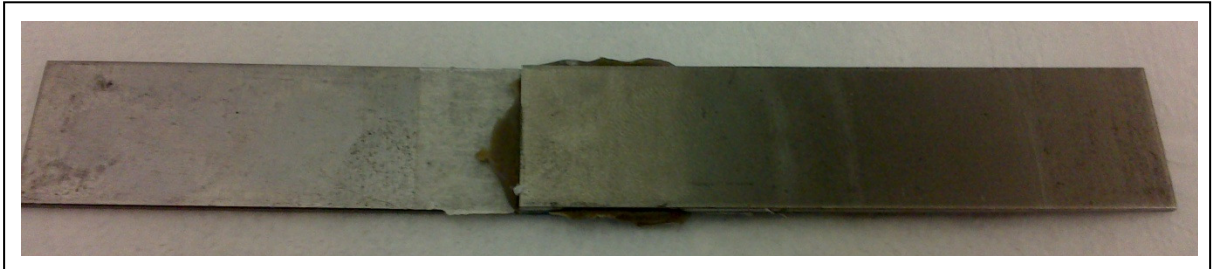
Figura 19 – Corpo de prova de junta rebitada – Ensaio de tração pura



Fonte: O autor (2013)

O mesmo foi feito para as juntas adesivas, cujas imagens são mostradas na sequência de figuras a seguir. Estão, respectivamente, nas Figuras 20 e 1 a junta adesiva para o ensaio de cisalhamento e a junta adesiva para o ensaio de tração pura.

Figura 20 – Corpo de prova de junta adesiva – Ensaio de Cisalhamento



Fonte: O autor (2013)

Figura 21 – Corpo de prova de junta adesiva – Ensaio de tração pura



Fonte: O autor (2013)

As juntas foram então submetidas aos ensaios de tração cisalhante e tração cruzada seguindo o seguinte cronograma descrito pelo Quadro 7, a seguir.

Quadro 7 – Cronograma de ensaios

Sequência do Ensaio	Tipo de Junta - Ensaio	Tipo de Superfície	Número de Corpos de prova
1	Rebitada - Tração Cisalhante	Laminada	6
2	Adesiva - Tração Cisalhante	Laminada	6
3	Adesiva - Tração Cisalhante	Lixada	6
4	Adesiva - Tração Cisalhante	Polida	6
5	Rebitada - Tração Cruzada	Laminada	6
6	Adesiva - Tração Cruzada	Laminada	6
7	Adesiva - Tração Cruzada	Lixada	6
8	Adesiva - Tração Cruzada	Polida	6

Fonte: O autor (2013)

3.3.3 Tempos de Processo

Os tempos de processo de rebitagem e de adesão foram medidos usando um cronômetro, sendo 3 as tomadas de tempo de cada operação. Os resultados serão expostos no próximo capítulo, uma vez que a quantidade de rebites e de adesivo que comparados, depende exclusivamente dos resultados obtidos nos ensaios propostos por este trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

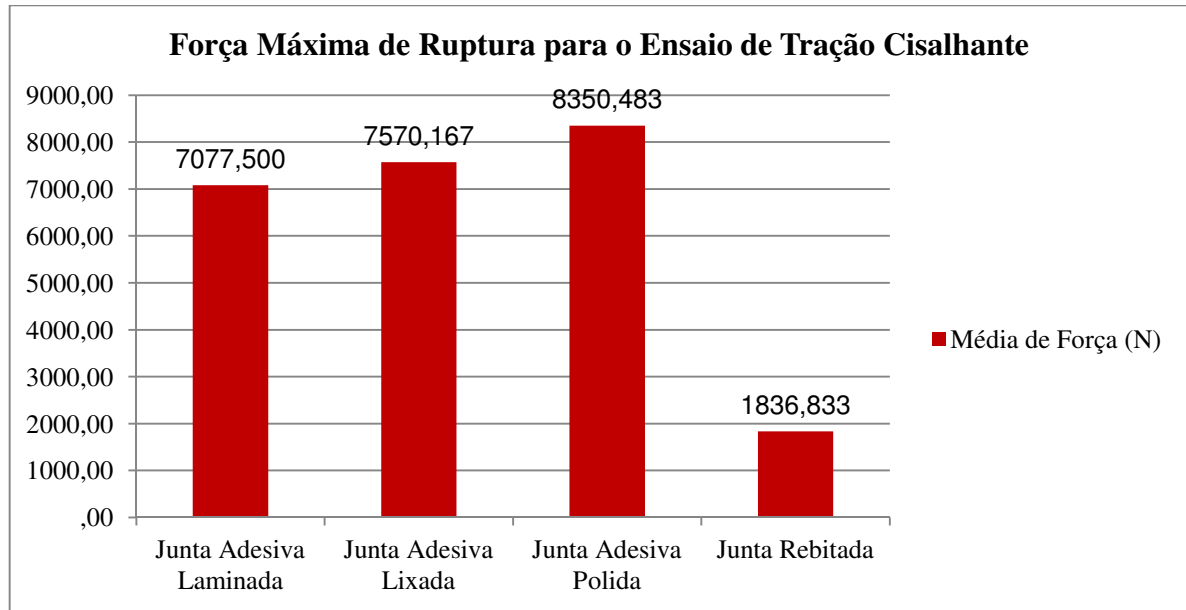
4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO CISALHANTE

Os resultados do ensaio de tração cisalhante da junta laminada e da junta lixada seguiram o previsto. O intertravamento mecânico exercido sobre a superfície do substrato e adesivo definiu a força média da junta, causando uma falha coesiva. Na junta laminada, de acordo com o Gráfico 1, a força média foi de 7.077,5N. O efeito do lixamento da superfície foi positivo à junta. Com uma carga média de ruptura de 7.570,2N, a junta lixada se mostrou 6,5% mais resistente a esse esforço do que a junta laminada, tendo sua falha também coesiva. Neste caso a maior área de contato de superfície, devido à maior altura de picos e vales, foi fundamental no aumento encontrado.

Um dos resultados seguiu contra o previsto: Para a junta polida, esperava-se uma falha adesiva, uma vez que a rugosidade da superfície estava muito baixa, eliminando picos e vales e reduzindo a área de contato do adesivo. Em não havendo resistências laterais de intertravamento mecânico, esperava-se que o adesivo se desprendesse da superfície do substrato causando uma falha adesiva mesmo com uma carga baixa.

O que ocorreu foi o inverso, as forças médias de ruptura encontradas no ensaio de tração cisalhante da junta polida foram cerca de 9,3% maiores que a junta lixada e 15,2% mais altas que a junta laminada, obtendo valores médios de ruptura de 8.350,5N. Neste caso, há a hipótese de que outras duas teorias foram mais efetivas que a influência do intertravamento mecânico. A Teoria da Molhabilidade pode ter garantido que a adesão neste tipo de superfície fosse perfeita e que a força da junta se concentrasse na força coesiva do adesivo. Essa teoria explica que ao polir-se a superfície do aço carbono, aumentou-se a energia da superfície e o ângulo de contato de gota do adesivo sobre o substrato. Assim, pela redução da distância de contato, forças de van der Waals atuariam aumentando a força adesiva da junta. O rompimento com valores de carregamento maiores que das juntas laminadas e lixadas pode ser devido à Teoria da Camada Fraca. Para juntas laminadas e lixadas, a alta rugosidade superficial faria com que bolhas de ar ficassem aprisionadas nos vales e, posteriormente, migrassem para a camada adesiva. Esses contaminantes formariam uma camada fraca que reduziria o desempenho coesivo da junta. Uma vez polida, a superfície com baixíssima rugosidade superficial, impediria o aprisionamento de ar elevando a força coesiva da junta.

Gráfico 1 – Médias de cargas encontradas no ensaio de tração cisalhante



Fonte: O autor (2013)

O Quadro 8 apresenta os valores individuais de carregamentos encontrados no ensaio de tração cisalhante, bem como média, desvio padrão e erro relativo percentual dos dados. Os baixos valores de erros percentuais mostram tendência uniforme de valores.

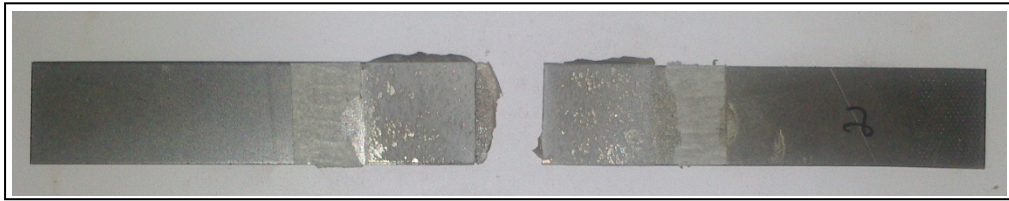
Quadro 8 – Valores de carregamento para o ensaio de tração cisalhante

Tipo de Junta	Valores de Carregamento (N)						Estatística		
	1	2	3	4	5	6	Média	Desvio Padrão (N)	Erro
Junta Adesiva Laminada	7334	6984	6740	6993	7312	7102	7077,5	501,2	7,1%
Junta Adesiva Lixada	7691	7734	7513	7436	7612	7435	7570,2	287,6	3,8%
Junta Adesiva Polida	8136	8436	8134	8347	8396	8654	8350,5	440,9	5,3%
Junta Rebitada	1738	1846	1918	1813	1829	1877	1836,8	136,7	7,4%

Fonte: O autor (2013)

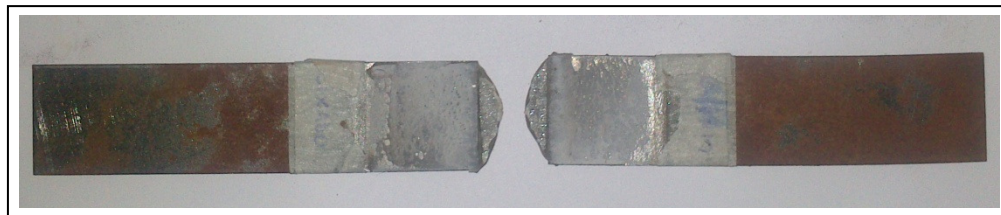
A sequência de imagens a seguir, mostra um exemplo das falhas encontradas nas juntas após os ensaios. As Figuras 22 e 23 e 24 mostram as falhas das juntas adesivas laminada, lixada e polida, respectivamente.

Figura 22 – Falha da junta adesiva laminada – Ensaio de cisalhamento



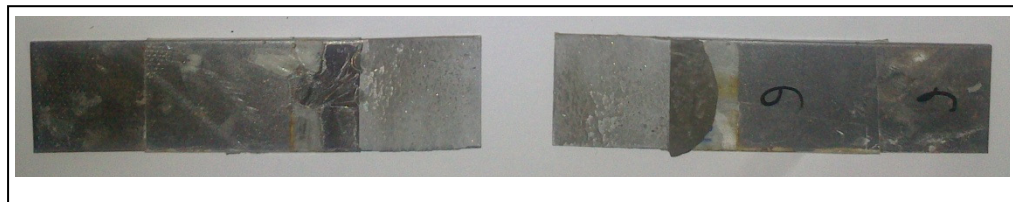
Fonte: O autor (2013)

Figura 23 - Falha da junta adesiva lixada – Ensaio de cisalhamento



Fonte: O autor (2013)

Figura 24 - Falha da junta adesiva polida – Ensaio de cisalhamento



Fonte: O autor (2013)

Ao compararem-se os valores de carregamento máximo encontrados em juntas adesivas com os carregamentos encontrados na junta rebitada, nota-se uma diferença muito expressiva. Uma polegada quadrada de adesão superficial é no mínimo 74% mais resistente que uma junta com um rebite. De acordo com o Gráfico 1 a força média suportada pelo rebite sob o esforço de tração cisalhante foi de 1.836,8N. Neste caso, admite-se, inicialmente, menor área de contato e baixa resistência do material do rebite como fatores de ruptura. Entende-se que a área sob esforço da junta adesiva é bem maior que a área sob esforço da junta rebitada. Previsto isso, um dos objetivos deste trabalho é encontrar a área de colagem que se equipara, em termos de força de união a um rebite de alumínio. Esse estudo é exposto após o resultado de todos os ensaios. A Figura 25 mostra a falha da junta rebitada de cisalhamento e tração, respectivamente.

Figura 25 - Falha da junta rebitada – Ensaio de cisalhamento



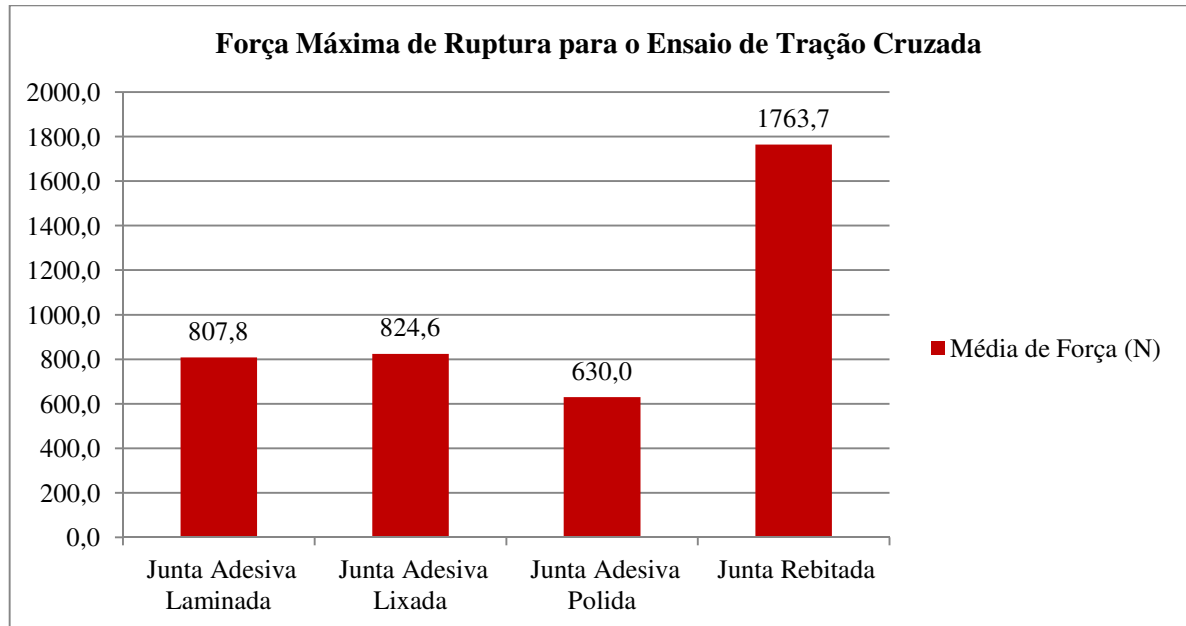
Fonte: O autor (2013)

4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO CRUZADA

O ensaio de tração cruzada que representa um esforço de tração quase pura, seguiu os resultados previstos. A junta rebitada obteve um melhor comportamento do que as juntas adesivas. De acordo com o Gráfico 2, a junta rebitada, obteve um esforço médio de ruptura de 1.736,7N. Aproximadamente 53% mais resistente que a junta adesiva de melhor comportamento, mesmo possuindo uma área resistente ao esforço muito maior que a área da junta rebitada. A força suportada pelo rebite se deve à resistência de seu próprio material e às extremidades de interferência. Nota-se que o rebite obteve um comportamento similar sob tração pura e tração cisalhante. A falha encontrada é exposta na Figura 26.

Já às juntas adesivas, atribui-se o comportamento ruim perante o esforço apresentando neste ensaio, cerca de 10 vezes menor que sob cisalhamento, à característica dos adesivos de não suportarem bem esforços de tração pura. Sob este carregamento as juntas lixadas e laminadas obtiveram praticamente o mesmo comportamento, suportando, ao redor de 800N com falha coesiva. Já a junta polida, obteve um resultado muito inferior, com uma carga média de ruptura de 630N. As falhas encontradas, também coesivas, são mostradas na sequência de Figuras 27, 28 e 29, respectivamente.

Gráfico 2 – Cargas médias para o ensaio de tração pura



Fonte: O autor (2013)

O Quadro 9 apresenta os valores individuais dos carregamentos obtidos no ensaio de tração pura. Nota-se que o erro percentual para a junta adesiva polida é bastante elevado devido ao elevado desvio padrão dos resultados.

Quadro 9 – Valores de carregamentos para o ensaio de tração pura

Tipo de Junta	Valores de Carregamento (N)							Estatística	
	1	2	3	4	5	6	Média	Desvio Padrão (N)	Erro
Junta Adesiva Laminada	789	815	850	810	789	794	807,8	52,3	6%
Junta Adesiva Lixada	801	834	798	845	823,5	846,2	824,6	47,3	6%
Junta Adesiva Polida	673	634	537,5	640	595	701,5	630	129,9	21%
Junta Rebitada	1734	1756	1687	1871	1789	1745	1763,7	139,0	8%

Fonte: O autor (2013)

Figura 26 - Falha da junta rebitada – Ensaio de tração pura



Fonte: O autor (2013)

Figura 27 – Falha da junta adesiva laminada – Ensaio de tração pura



Fonte: O autor (2013)

Figura 28 - Falha da junta adesiva lixada – Ensaio de tração pura



Fonte: O autor (2013)

Figura 29 - Falha da junta adesiva polida – Ensaio de tração pura



Fonte: O autor (2013)

4.3 EQUIVALÊNCIA DE FORÇA DE UNIÃO

De posse dos dados de forças de união das juntas adesivas e rebitadas, construiu-se uma tabela de equivalência usando rebite versus área colada. Uma vez que a força de união de uma junta adesiva está diretamente ligada à área colada, um simples cálculo de proporção é suficiente para especificação do proposto. O Quadro 10 mostra os resultados obtidos para forças cisalhantes e o Quadro 11 para tração pura, para cada tipo de superfície, tendo como base, os valores encontrados durante os ensaios.

Quadro 10 – Cálculo de área adesiva equivalente a um rebite – Cisalhamento

Para Carregamentos de Cisalhamento do Adesivo - Tração Cisalhante da Junta				
Força do Rebite (N)	Tipo de Junta Adesiva	Força da Junta Adesiva (N)	Área Média de Adesão (mm ²)	Área Colada equivalente (mm ²)
1836,8	Laminada	7077,5	25,57	6,64
	Lixada	7570,2	25,07	6,08
	Polida	8350,5	25,39	5,58

Fonte: O autor (2013)

Quadro 11 – Cálculo de área adesiva equivalente a um rebite - Tração

Para Carregamentos de Tração do Adesivo - Tração Pura da Junta				
Força do Rebite (N)	Tipo de Junta Adesiva	Força da Junta Adesiva (N)	Área Média de Adesão (mm ²)	Área Colada equivalente (mm ²)
1763,7	Laminada	807,8	25,28	55,19
	Lixada	824,6	25,3	54,11
	Polida	630,0	25,16	70,44

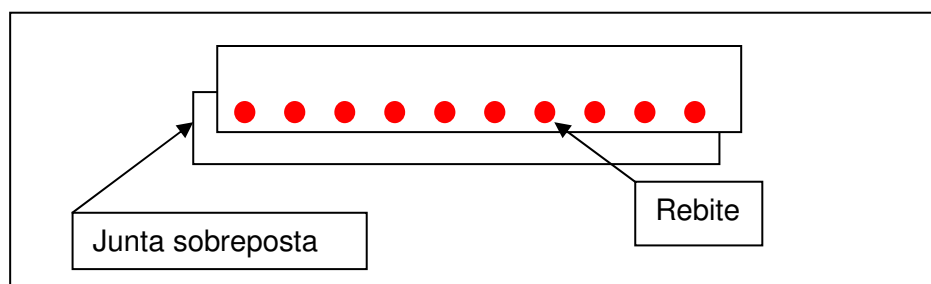
Fonte: O autor (2013)

Nota-se para o segundo quadro, que a are colada deve ser quase dez vezes maior, uma vez que a solicitação mecânica seja de tração pura.

4.4 TEMPOS DE PROCESSO

Para medição dos tempos de processo entre as duas juntas, foi criado um parâmetro de comparação, usando os dados de forças de união obtidos nos apontamentos anteriores. Esse parâmetro considera como base, uma junta rebitada com 10 rebites alinhados e separados a cada 10 mm, como mostra a Figura 30. Para que o ensaio reproduzisse a situação real da junta, a medição foi feita considerando, novamente, uma junta sob cisalhamento e uma sob tração com superfície laminada, sendo a menos custosa em termos operacionais.

Figura 30 – Esquema indicativo da junta rebitada proposta



Fonte: O autor (2013)

Para a junta sob cisalhamento, tomando como base os dados obtidos nos ensaios realizados anteriormente e desprezando forças externas atuantes sobre a junta, a quantidade de dez rebites é equivalente a uma força de 18.368N.

Para obter esta mesma carga, também de acordo com os dados obtidos nos ensaios anteriores, a área de adesão necessária sobre uma superfície laminada é de 66,41mm² para equivalência em forças de cisalhamento e 551,94mm² para equivalência em força de tração.

Considerando que o bico misturador utilizado desenvolve uma largura aproximada de cordão de 3mm, o comprimento do cordão, para cisalhamento deve ser de 22,1mm e 183,8mm para tração.

Para fins de aproximação, utilizou-se um cordão de 25mm e 185mm de comprimento, respectivamente. O Quadro 12 descreve os tempos de processo encontrados para cada junta.

Quadro 12 – Comparação de tempos de processo para as juntas do estudo

Processo		Junta Rebitada	Junta Adesiva sob Cisalhamento	Junta Adesiva sob Tração	
Furação	TEMPO DE PROCESSO (s)	35,8	0	0	
Posicionamento e sobreposição		8,2	0	0	
Preparação de Superfície		0	6,7	6,7	
Inserção dos Rebites e Rebitagem		68	0	0	
Purga Inicial do Adesivo		0	5,9	5,9	
Aplicação do Adesivo		0	8,7	22,7	
Fechamento da junta		0	14,9	14,9	
Outros processos pertinentes		52	42	42	
Produtividade			70%		
		Total em segundos (s):	234,3	111,7	131,7

Fonte: O autor (2013)

52,3% menor 43,7% menor

*Todos os processos foram medidos com os equipamentos já prontos e em mãos, os tempos de preparação de equipamento e ações necessárias ao objetivo final, foram medidas e incluídas no campo "Outros processos pertinentes".

Este estudo mostra que o tempo necessário para furação e rebitagem é expressivamente maior que o tempo necessário para aplicar o adesivo que promoverá a mesma força de união. Para a junta adesiva os tempos mais expressivos estão compreendidos na aplicação do adesivo e fechamento da junta. O tempo medido servirá de base para o cálculo de custo produtivo que é exposto a seguir.

4.5 CUSTOS PRODUTIVOS

Para análise de custo dos processos de rebiteagem e adesão, foram utilizadas as mesmas bases de forças e tempos de processo mostrados anteriormente. Os custos são expostos através do Quadro 13.

Quadro 13 – Tabela de cálculo de custos das juntas do estudo

	Parâmetro	Junta Rebitada	Junta Adesiva sob Cisalhamento	Junta Adesiva sob Tração
Mão de Obra (R\$/h)	R\$ 35,00	R\$ 2,28	R\$ 1,09	R\$ 1,28
Produtividade	70%			
Rebites (R\$/pç)	R\$ 0,0245	R\$ 0,24	R\$ -	R\$ -
Adesivo Lord MAXLOK T6/MX (R\$/Kg)	R\$ 60,00	R\$ -	R\$ 0,022	R\$ 0,162
Total		R\$ 2,52	R\$ 1,11	R\$ 1,44
Furadeira Pneumática Profissional (R\$/pç)	R\$ 280,00	R\$ 280,00	R\$ -	R\$ -
Rebitador Manual Profissional (R\$/pç)	R\$ 65,00	R\$ 80,00	R\$ -	R\$ -
Aplicador de Adesivos Manual Profissional (R\$/pç)	R\$ 280,00	R\$ -	R\$ 280,00	R\$ 280,00
Total Geral		R\$ 362,52	R\$ 281,11	R\$ 281,44

Fonte: O autor (2013)

O Quadro 13 mostra duas distintas diferenças nos custos de cada processo e uma forte tendência de redução no uso de adesivos estruturais. A mão de obra de aplicação é cerca de 56% menor que o processo através de rebiteagem. Explica-se essa diferença, principalmente pelo tempo necessário em processos que antecedem a rebiteagem, como por exemplo, a furação, não necessários no processo através de adesivos estruturais. Na análise do custo do elemento de fixação, nota-se que, para esforços de tração cisalhante, a quantidade de adesivo necessária para manter a mesma força de união de 10 rebites foi de 0,37g, custando

pouco mais de R\$ 0,02. Já na junta sob esforço de tração pura, a quantidade de adesivo foi um pouco maior, de 2,7g, custando aproximadamente R\$ 0,16. Em ambos os casos, o elemento adesivo foi mais barato que os 10 rebites da junta.

A segunda diferença expressiva de preços está no investimento inicial de ferramental. Para o processo de rebitagem, são necessários pelo menos duas ferramentas obrigatoriamente: uma furadeira e um rebitador que somados custam, de acordo com o Quadro 13, cerca de R\$ 360,00. No processo com de adesão estrutural, o equipamento necessário restringe-se a um aplicador de adesivos manual de cerca de R\$ 280,00, trazendo uma redução de pelo menos 33% no investimento inicial de ferramentas.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos a partir da execução dos ensaios propostos por este estudo, pode-se conhecer o potencial da adesão estrutural na união de chapas sobrepostas de aço carbono. Em comparação com uma junta rebitada de mesma característica, o adesivo com uma polegada quadrada de área adesiva se mostrou em média 77% mais resistente sofrendo o esforço de tração cisalhante da junta. Sob esforços de tração pura, a junta adesiva resultou valores cerca de dez vezes mais baixos em relação ao cisalhamento, mostrando ser 57% mais resistente sob o mesmo esforço, se comparado a junta rebitada.

Este estudo verificou também possíveis diferenças de adesão entre 3 tipos de superfície: laminada, lixada e polida, de maneira a encontrar uma relação entre a rugosidade da superfície do substrato com o potencial de adesão do adesivo. Neste caso, notou-se um incremento de forças de união na superfície lixada, em relação à superfície laminada de cerca de 5% com o aumento da área de contato e do intertravamento mecânico. A superfície polida, embora com menor rugosidade superficial, se mostrou cerca de 9% mais resistente que a junta lixada. Uma hipótese para tal, poderia ser a baixa rugosidade superficial que teria reduzido a distância entre o adesivo e o substrato fazendo com que forças físico-químicas pudessem atuar sobre a junta, aumentando a molhabilidade do substrato pelo adesivo e com isso garantindo a adesão no substrato. O incremento na força coesiva da junta poderia ser justificado pela Teoria da Camada Fraca. A baixa rugosidade do substrato previne o aprisionamento de bolhas de ar nos vales da superfície que, por sua vez, não são enviados à camada adesiva, prevenindo a formação da camada fraca. Efeito que limitou a força máxima coesiva das juntas laminadas e lixadas. Sob esforços de tração pura, a superfície laminada e lixada apresentaram resultados muito parecidos. Destaque para a superfície polida, que resultou cerca de 26% menos resistente que as outras, apresentando pequenas falhas adesivas na colagem da junta.

Outra proposta deste estudo verificou a área de colagem com adesivo estrutural, necessária para promover a mesma força de união de uma junta rebitada com um rebite, usando como base os valores de forças encontrados nos ensaios. Neste caso, o estudo trouxe resultados médios de 6mm² de área para esforços de cisalhamento puro da junta e valores médios de 65mm² de área colada para esforços de tração pura.

Com a área adesiva necessária encontrada, tempos de processo de cada operação para os processos de rebitagem e adesão e com o consumo de adesivo e rebites de cada junta, foi possível calcular brevemente custos do processo de rebitagem e adesão. Neste caso, ambas juntas adesivas sob cisalhamento e tração se mostraram mais baratas que juntas rebitadas,

concluindo-se que processos que antecedem a rebitagem e investimentos de ferramentas são as maiores influências no alto custo do processo.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Objetivando qualificar os resultados encontrados neste estudo e visando aprimorar o conhecimento sobre adesão em juntas metálicas, os seguintes temas poderiam ser abordados em trabalhos vindouros.

- Análise do comportamento de juntas adesivas de aço carbono sob outros carregamentos como torção, fadiga e compressão, de maneira a confirmar seu potencial na indústria mecânica.
- Avaliar o comportamento da adesão sobre juntas adesivas de aço carbono com superfície polida, objetivando o estudo das forças físico-químicas que atuam sobre a mesma e sua relação com o potencial de adesão.
- Avaliar o comportamento da adesão de juntas metálicas em aço inoxidável, comparando-as com juntas de aço inoxidável soldadas, de maneira a comprovar o potencial da adesão sobre o substrato e eliminar os inúmeros problemas causados pela soldagem do inox.

REFERÊNCIAS

- A & S ADESIVOS E SELANTES. **Banco de dados**. 2011 Disponível em: <http://www.adesivoseselantes.com.br/edicao30_adesivos.asp>. Acesso em: 21 ago. 2012.
- BUCKLEY, D. H. **Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication**, Tribology Series 5, 1 Ed. NASA, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, USA, 1981.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 7337 Break Mandrel Blind Rivets**. August 1991.
- FRUET, T. F. **Análise para substituição da solda ponto de uma carroceria de chapas finas de aço carbono e aço galvanizado por adesivo estrutural**. Trabalho de Conclusão de Curso, UCS, Caxias do Sul-RS, 2011
- GARCIA, F. G.; et al. Evaluación de la adherencia de uniones adhesivas metálicas com adhesivos epoxídicos modificados. **Revista Polímero: ciência e tecnologia**, São Carlos, SP, v. 18, n. 1, jan.-mar. 2008.
- GARY, F B. Metal/cyanide-containing wastes; Treatment technologies : By S.A.K. Palmer, M.A. Breton, T.J. Nunno, D.M. Sullivan and N.F. Suprenant, Noyes Data Corp., Park Ridge, NJ, 1988, ISBN No. 0-8155-1179-5, 721 pp., \$. **Journal of Hazardous Materials**. 1990;24:96.
- GASPARIN, A. L. **Adesão metal-polímero: Dispositivos de medição e correlações físico-químicas**. Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre-RS, 2011.
- GOGLIO, L.; ROSSETTO, M. Impact rupture of structural adhesive joints under different stress combinations. **International Journal of Impact Engineering**, n.35, p. 635-643, 2007
- HABENICHT, G. **Applied adhesive bonding**, 1. Ed. Weiheim, Germany., Wiley, 2009.
- JENNINGS, C. W. **Surface Roughness and Bond Strength of Adhesives**, 1 Ed. Albuquerque, New Mexico, 1972.
- J. J. BIKERMAN, **The Science of Adhesive Joints**, Academic Press, New York, 1961.
- KULAK, G. L.; FISHER, J. W.; STRUIK, J. H. A, F. **Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints**. 2. ed. Chicago, USA. AISC, 2001.
- LORD CORPORATION. **Banco de dados**, acesso restrito a funcionários, São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.lordwebhome.com.br/>>. Acesso em: 10 ago. 2012. *Utilizado cadastro de Tiago Faccio Fruet, Executivo de Contas RS da Lord Corporation .
- MACROSUL. **Banco de dados interno**, acesso restrito a funcionários. Caxias do Sul, 2012. Disponível em: <<http://www.macrosul.com.br/intranet/empresa>>. Acesso em: 17 ago. 2012.
- M. NARDIN, A. EL MALIKI, and J. SCHULTZ, **J. Adhesion** 40: 93 (1993).

PACKHAM, E. D. **Handbook of Adhesion**, 2. ed. Bath, United Kindon., John Wiley & Sons, 2005.

PETRIE, E.W. **Handbook of Adhesives and Sealants**, 1. ed. New York, N.Y., McGraw-Hill, 2000.

PETRIE, E. W. **Epoxy adhesive Formulations**, 1. ed New York, N.Y., McGraw-Hill, 2006.

QUINI, J. G. **Adesivos estruturais uretânicos aplicados a combinações de compósitos, plásticos e metais**. Tese de Doutorado, IPEN, São Paulo-SP, 2011.

SILVA, L. F. M.; MAGALHÃES, A. G.; MOURA, M. F. S. F. **Juntas adesivas estruturais**. Coimbra, Portugal: Publindústria, 2007.

SKEIST, I, **Handbook of Adhesives**, 4.ed. New York, N.Y., Reinhold Publishing Corporation, 1965.

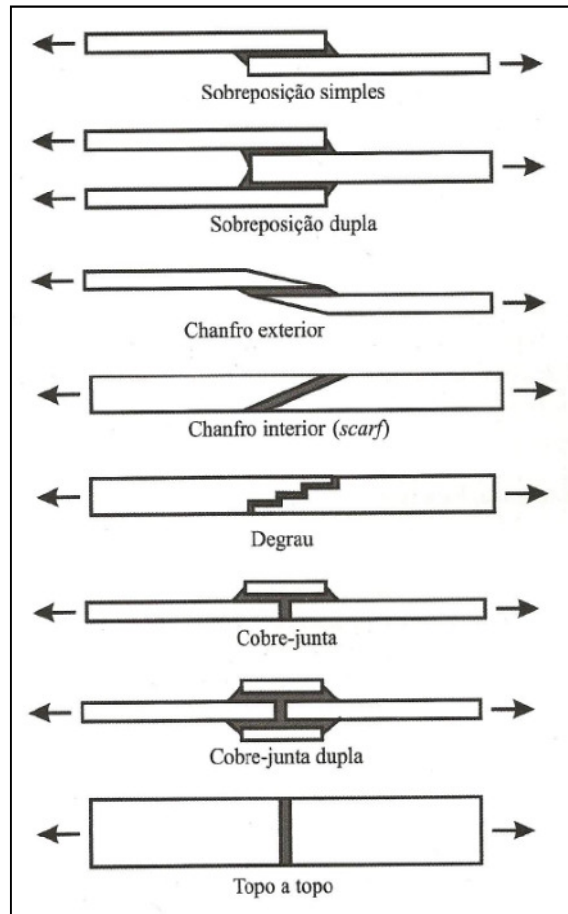
SKEIST, I. **Handbook of Adhesives**. 3. ed. New York: Chapman & Hal, 1989.

ANEXO A – QUADRO PARA SELEÇÃO DE ADESIVOS ESTRUTURAIS

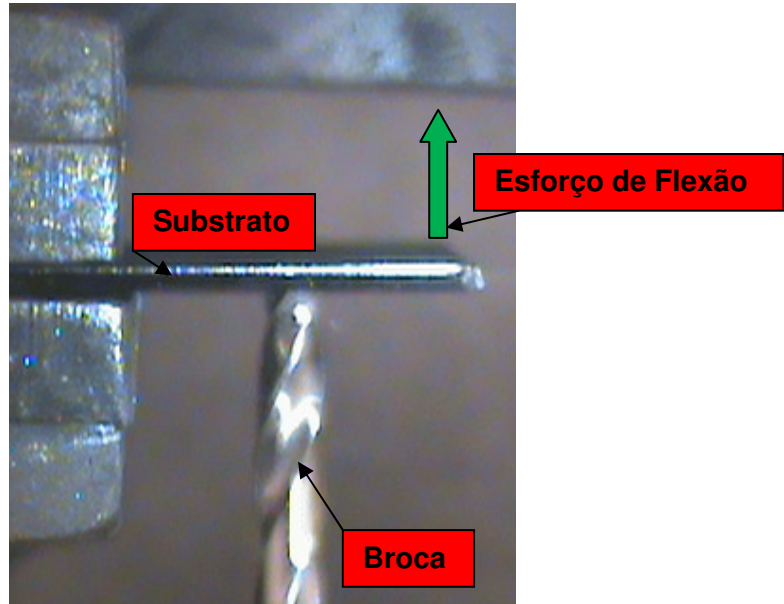
	Alumínio ou Aço ao branco, incluindo Inoxidável	Aço Galvanizado	Metal (pré-acabado)	PRFV/GRP	SMC	Borracha (1)	Termoplásticos de Engenharia (policarbonato, acrílicos, ABS, PVC) (5)
Alumínio ou Aço ao branco, incluindo Inoxidável	Acrílico	Acrílico Epóxi	Acrílico Epóxi	Acrílico Epóxi	Acrílico Epóxi	Epóxi	Poliuretano
Aço Galvanizado		Acrílico Poliuretano	Acrílico	Acrílico	Acrílico	(*)	(*)
Metal (pré-acabado)			Acrílico Epóxi Poliuretano	Acrílico Epóxi Poliuretano	Acrílico Epóxi Poliuretano	Epóxi Poliuretano	Acrílico Poliuretano
			PRFV/GRP	Acrílico Epóxi Poliuretano	Acrílico Epóxi Poliuretano	Epóxi Poliuretano	Acrílico Poliuretano
				SMC	Acrílico Epóxi Poliuretano	Epóxi Poliuretano	Acrílico Poliuretano
					Borracha (1)	Epóxi Poliuretano	Poliuretano
						Termoplásticos de Engenharia (policarbonato, acrílicos, ABS, PVC) (5)	Acrílico Poliuretano

ANEXO B – QUADRO COMPARATIVO ENTRE BASES ADESIVAS

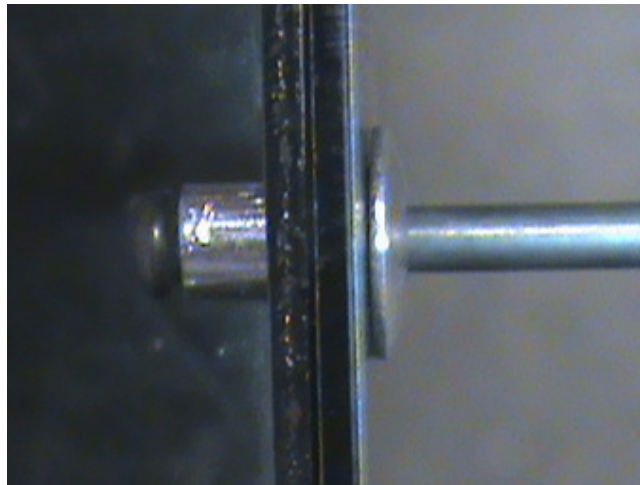
Propriedades	Epoxi	Acrílicos mod.	Uretanos
Resistência mecânica	★★★★★	★★★★★	★★★
Resistência química	★★★★★	★★★	★★
Resistência térmica	★★★★★	★★★	★
Resistência ao impacto	★★	★★★★★	★★★★★
Resistência ao meio ambiente	★★★★★	★★★★★	★★
Cura a T ambiente	★	★★★★★	★★★★★
Preparação da superfície	★★	★★★★★	★★★★★
Odor	★★★★	★★	★★★★★

ANEXO C – TIPOS COMUNS DE JUNTAS ADESIVAS

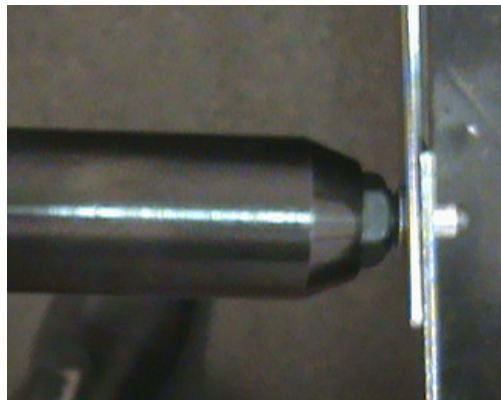
ANEXO D – PROCESSO DE REBITAGEM



FURAÇÃO



POSICIONAMENTO DO REBITE

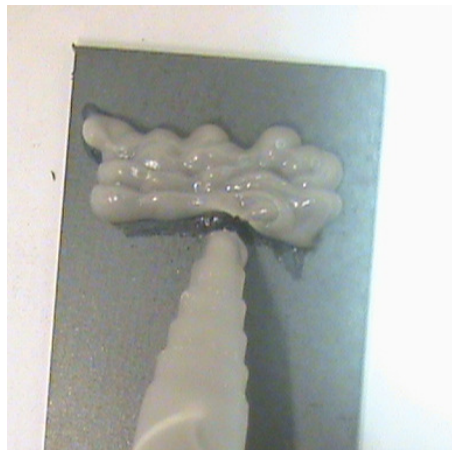


ACOPLAMENTO DO REBITADOR

ANEXO E – PROCESSO DE ADESÃO



PURGA ADESIVA ANTES DA APLICAÇÃO



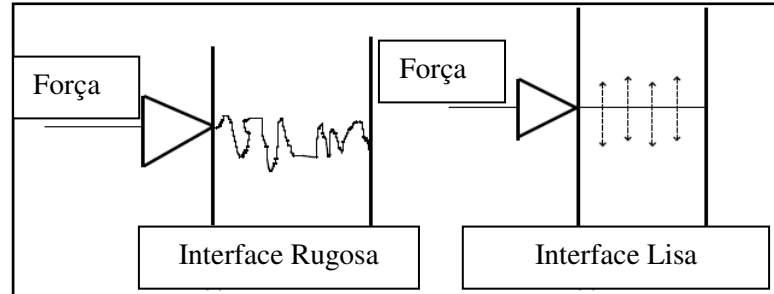
APLICAÇÃO DO ADESIVO



JUNTA ADESIVADA

ANEXO E – Influência das rugosidade superficial

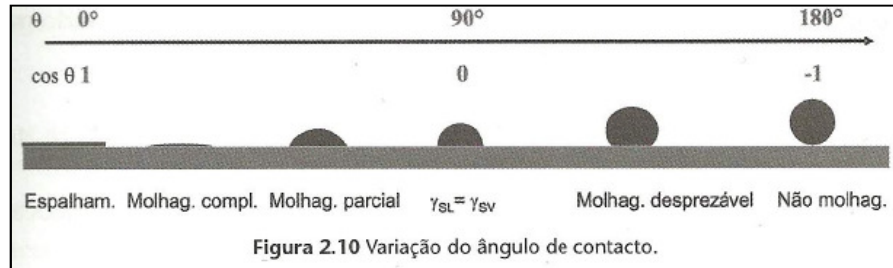
Esquema demonstrativo de interface entre dois materiais aderentes



Fonte: Petrie, 2000

ANEXO G – Ângulo de gota e molhabilidade

Relação entre o ângulo de gota e a molhabilidade



Fonte: Silva, Moura e Magalhães (2007)

ANEXO H – Dados do Adesivo escolhido

Características técnicas típicas do adesivo e ativador MAXLOK T6/MX

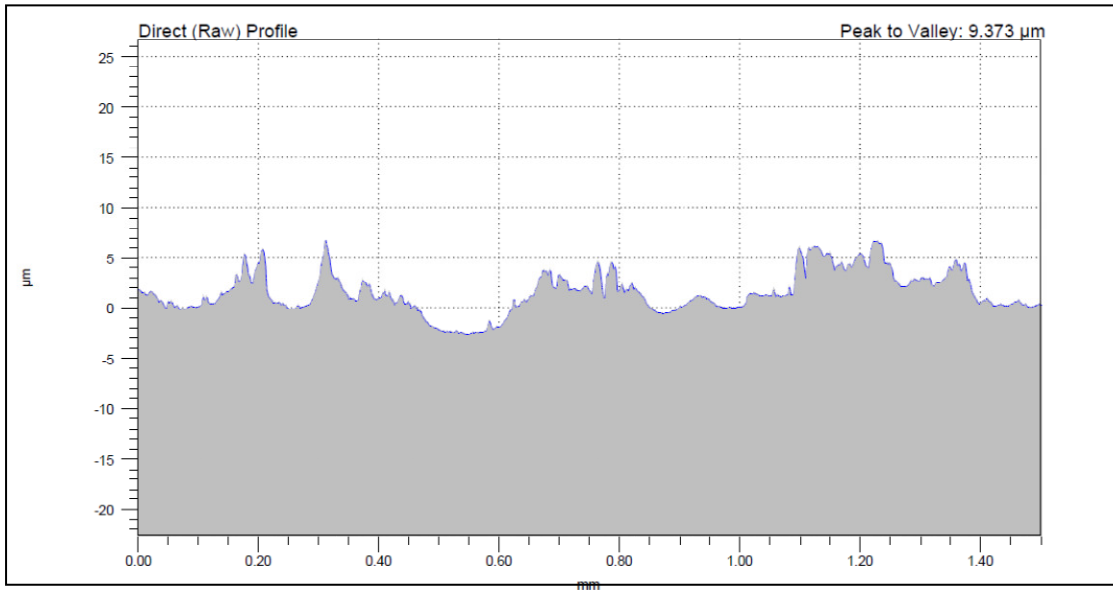
TYPICAL PROPERTIES*			
	MX ACCELERATOR	T3 ADHESIVE	T6 ADHESIVE
Appearance	Gray Paste	Off-white to Tan Paste	Off-white to Tan Paste
Viscosity, cP @ 77°F (25°C) Brookfield	100,000-500,000	70,000-220,000	70,000-220,000
Density, lb/gal	11.6-12.2	9.0-9.6	8.4-8.9
Density, kg/m³	1390-1462	1078-1150	1007-1066
Flash Point, °F (°C)	201 (94)	59 (15)	59 (15)
Working Time, min @ 77°F (25°C)	--	3-5	6-9
Handling Time, min @ 77°F (25°C)	--	6-8	20-24

* Data is typical and not to be used for specification purposes.

Fonte: Lord Corporation (2012)

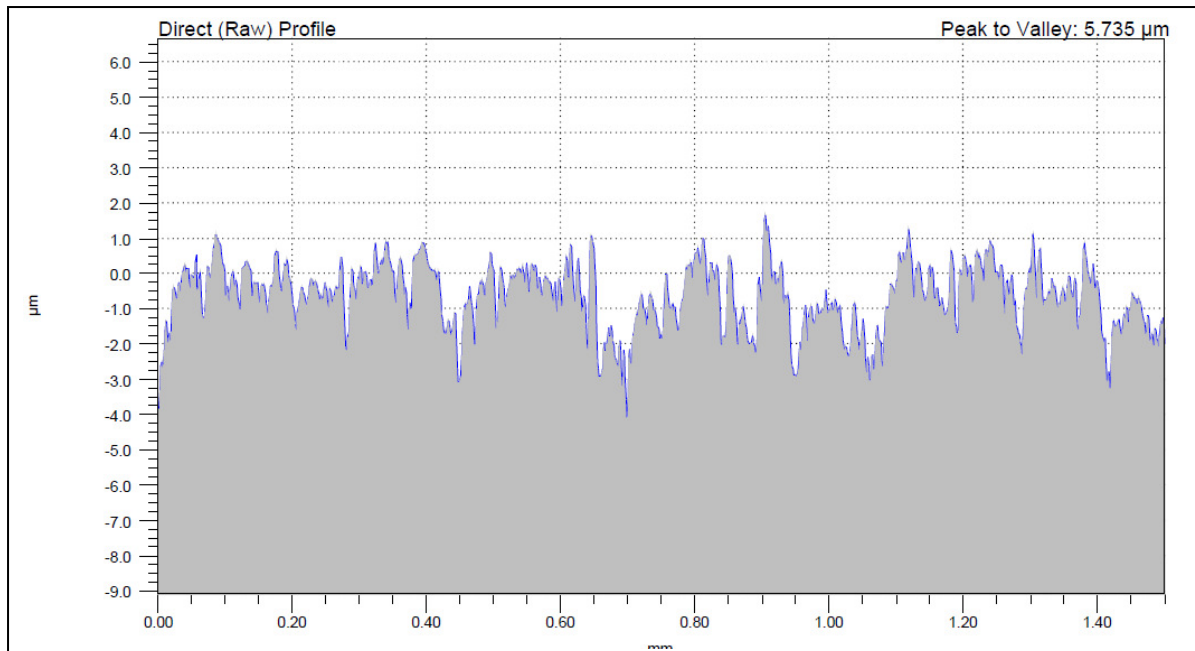
ANEXO I – Gráficos de Rugosidade Superficial

Rugosidade da Superfície Laminada



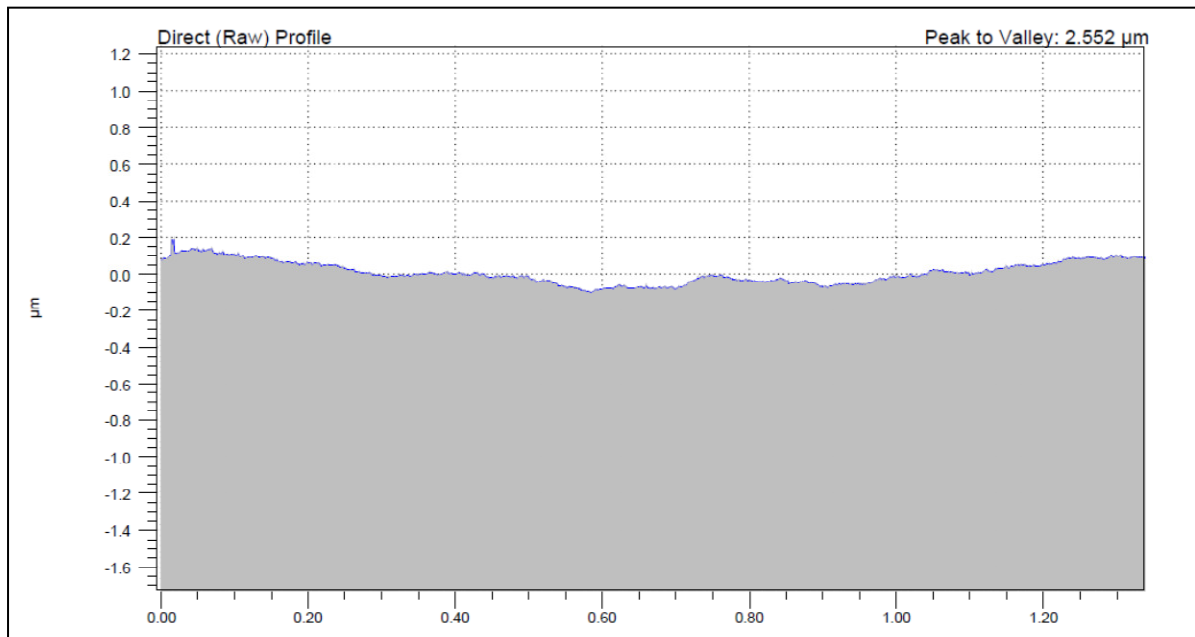
Fonte: O autor (2013)

Rugosidade da Superfície Lixada



Fonte: O autor (2013)

Rugosidade da Superfície Polida



Fonte: O Autor (2013)