

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA ADESÃO DA POLIURETANA DERIVADA DE ÓLEO DE  
MAMONA EM AÇO ABNT 1020**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA  
2015

ALEX VITOR MARQUES MOREIRA DA CUNHA  
JÉSSICA TUROLA

**ESTUDO DA ADESÃO DA POLIURETANA DERIVADA DE ÓLEO DE  
MAMONA EM AÇO ABNT 1020**

Proposta apresentada à disciplina de Projeto de Conclusão de Curso 2, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

**Orientador:** Prof. Dr. Rodrigo Lupinacci Villanova

**Co-orientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dra. Elaine C. Azevedo

CURITIBA  
2015

## DEDICATÓRIA

Aos nossos pais.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos nossos pais, Neusa Turola e João Turola, Vitor Cunha e Marlene Cunha, pelo amor, carinho e dedicação à nós transmitidos ao longo de nossas vidas.

Agradecemos aos professores orientadores Elaine Azevedo e Rodrigo Villanova pelos ensinamentos e colaboração para o desenvolvimento deste trabalho.

À Gabriela Seidel, Eduardo Souza e Raquel Freire pela grande ajuda com a preparação das amostras e aos amigos.

Aos professores e amigos do curso de Engenharia Industrial Mecânica e do Departamento Acadêmico de Mecânica da UTFPR.

À Cequi pela PU e à USP pelas peças de metal.

Ao Laboratório de Metrologia da UTFPR, especialmente ao Prof. Walter Mikos e ao Diego Carrillo.

Ao Grupo de Materiais da UTFPR, pela disponibilização dos equipamentos e espaço físico necessário para a realização dos experimentos.

Ao laboratório de microscopia pelas micrografias de MEV

Aos nossos amigos e companheiros de jornada Tuany, Alysson, Hanae e tantos outros, por nos apoiar e aconselhar nos momentos difíceis e celebrar conosco nas horas alegres.

À CAPES, UTFPR, LAPOC e GRMat pelo apoio técnico e financeiro.

## TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "ESTUDO DA ADESÃO DA POLIURETANA DERIVADA DE ÓLEO DE MAMONA EM AÇO ABNT 1020", realizado pelo aluno(s) ALEX VITOR MARQUES MOREIRA DA CUNHA e JÉSSICA TUROLA, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Rodrigo L. Villanova

DAMEC, UTFPR

Orientador

Prof. Eduardo Nascimento

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Prof. Ossimar Maranhão

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 14 de Dezembro de 2015.

## RESUMO

Cunha, Alex; Turola, Jéssica. **Estudo Da Adesão Da Poliuretana Derivada De Óleo De Mamona Em Aço ABNT 1020**. 2015. 84f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Uma das formas de junção de superfícies metálicas é a utilização de adesivos. Estes adesivos podem ser derivados de petróleo, porém com o inconveniente de terem solventes na sua composição, que pode causar problemas ambientais, de saúde e de segurança. O adesivo de poliuretana derivada de óleo de mamona apresenta vantagens quando comparado com os derivados do petróleo, pois é derivado de matéria prima renovável, biodegradável, além de não utilizar solventes na sua composição. Neste trabalho foi analisada a adesividade deste adesivo em aço ABNT 1020 com diferentes rugosidades utilizando ensaios mecânicos de tração uniaxial e de cisalhamento. Pode se concluir que com o aumento da rugosidade ocorreu diminuição da tensão de ruptura.

**Palavras-chave:** Poliuretana, adesivo, rugosidade, óleo de mamona.

## ABSTRACT

Cunha, Alex; Turola, Jéssica. **Study Of Adhesion Of Polyurethane derived from castor oil on Steel ABNT 1020**. 2015. 84f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

One way of joining metal surfaces is the use of adhesives. These adhesives can be derived from petroleum, but with the inconvenience of having solvents in its composition, which can cause environmental, health and safety problems. The polyurethane adhesive derived from castor oil has advantages when compared to petroleum as it is derived from renewable raw, biodegradable material, and do not use solvents in its composition. In this paper it was analyzed the adhesiveness of this adhesive on ABNT 1020 steel with different roughness using mechanical tests of uniaxial tensile and shear. It can be concluded that with increasing of roughness, a decrease on the breakdown tension is noticed.

**Keywords:** polyurethane, adhesion, roughness, castor oil.

## LISTA DE FIGURA

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS FORÇAS ADESIVAS E COESIVAS	16
FIGURA 2 – ÂNGULO DE CONTATO $\theta$	18
FIGURA 3 – PENETRAÇÃO DE QUÍMICOS EXTERNOS PELO MAL MOLHAMENTO DA SUPERFÍCIE	18
FIGURA 4 – RESULTADOS DE AVALIAÇÃO EHS DE 26 SOLVENTES COMUNS	20
FIGURA 5 – CONFIGURAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE PRIMERS	20
FIGURA 6 – FORMAÇÃO DO GRUPO URETANA	21
FIGURA 7 – REAÇÃO QUÍMICA DE FORMAÇÃO DA POLIURETANA A PARTIR DE POLIOL E DIISOCIANATO	21
FIGURA 8 – MACROMOLÉCULA DO ÁCIDO RICINOLEICO	22
FIGURA 9 – (A) SUPERFÍCIE PLANA E (B) SUPERFÍCIE COM PICOS COM O MESMO VALOR DE SA	23
FIGURA 10 – EXEMPLIFICAÇÃO DE PERFIL DE RUGOSIDADE DE UMA SUPERFÍCIE (A) SA E (B) Sz	24
FIGURA 11 – ESQUEMÁTICO DO ENSAIO DE CISALHAMENTO	25
FIGURA 12 – ENSAIO DE CISALHAMENTO EM ADESIVOS	26
FIGURA 13 – REPRESENTAÇÃO DO ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL E DA DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS AGINDO SOBRE O ADESIVO	26
FIGURA 14 – COMPORTAMENTO DO ADESIVO DURANTE ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL E CLIVAGEM	27
FIGURA 15 – FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES DE EXECUÇÃO DO PROJETO	28
FIGURA 16 – SIGNIFICADO DA NOMENCLATURA UTILIZADA	30
FIGURA 17 – PROCEDIMENTO ADOTADO NA EXECUÇÃO DA ETAPA DE PREPARAÇÃO SUPERFICIAL DAS AMOSTRAS	31
FIGURA 18 – (A) ADAPTAÇÃO DAPOLITRIZ PARA POLIMENTO DAS AMOSTRAS DO TIPO 2 (B) ETAPA MANUAL DE POLIMENTO FINAL DAS AMOSTRAS DO TIPO 2	32
FIGURA 19 – PROCESSO DE GRANULOMETRIA FINAL COM AUXÍLIO DE PESO	33
FIGURA 20 – RUGOSIMETRO 3DTALYSURF CCI	34
FIGURA 21 – PROCESSO DE PREPARO DA PU. (A) ADIÇÃO DO PRÉ-POLÍMERO (B) ADIÇÃO DO POLIOL (C) CONJUNTO DESSECADOR/BOMBA DE VÁCUO (D) DESSECADOR COM O ADESIVO	36
FIGURA 22 – PRENSA PARA COLAGEM DE TOPO DAS AMOSTRAS DE METAL	37

FIGURA23– MODELAGEM REPRESENTATIVA DO ENSAIO DE CISALHAMENTO	38
FIGURA 24 - FIXAÇÃO DA AMOSTRA DE ENSAIO DE CISALHAMENTO	39
FIGURA 25 – DIFERENÇA DE ACABAMENTO EM UMA MESMA PEÇA	41
FIGURA 26 – SUPERFÍCIES DAS AMOSTRAS (A) T1L8 (B) T2L8 (C) T1L4 (D) T2L4 (E) T1PO (F) T2PO	42
FIGURA 27 – SUPORTE PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO	43
FIGURA 28 – AMOSTRA DE GABARITO COM A QUANTIDADE CORRETA DE ADESIVO A SER COLOCADA NA AMOSTRA DO TIPO 1	44
FIGURA 29 – CURVA DE RUGOSIDADE X TENSÃO MÁXIMA PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO	45
FIGURA 30 – (A) ARRANJO DE GARRAS 1 (B) ARRANJO DE GARRAS 2	46
FIGURA 31 – CURVAS PARA A MESMA AMOSTRA DO TIPO T2L8 (A) ARRANJO DE GARRAS 1 (B) ARRANJO DE GARRAS 2	47
FIGURA 32 – CURVAS FORÇA X DESLOCAMENTO DOS CORPOS DE PROVA DOS DOIS ADESIVOS	48
FIGURA 33 – CURVA RUGOSIDADE X TENSÃO MÁXIMA PARA CISALHAMENTO	49
FIGURA 34 – SUPERFÍCIES ROMPIDAS (A) T1L8 (B) T1L4 (C)T1PO (D)T2L8 (E)T2L4 (F)T2PO	50
FIGURA 35 – MEV DOS PARES DE AMOSTRAS (A) T1L8 (B) T1L4 (C) T1PO (D) T2L8 (E) T2L4 (F) T2PO	52

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CLASSIFICAÇÃO DE ADESIVOS .....	16
TABELA 2 – POSSÍVEIS FORÇAS PRESENTES NA ADESÃO E NA COESÃO .....	17
TABELA 3– MATERIAIS UTILIZADOS .....	29
TABELA 4 – NOMENCLATURA ADOTADA .....	30
TABELA 5 – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL (SA) .....	40
TABELA 6 – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL (SZ) .....	41
TABELA 7 – RESULTADOS PARA OS ENSAIOS DE TRAÇÃO .....	44
TABELA 8 – RESULTADOS PARA OS ENSAIOS DE CISALHAMENTO .....	47
TABELA 9 – VALORES CRÍTICOS DE T. ....	84

## LISTA DE ABREVIATURAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ASTM – American Standards for Testing and Materials
- COV – Composto Orgânico Volátil
- EHS – Environment, Health and Safety
- EMIC – Equipamento para execução de ensaios de tração uniaxial e cisalhamento
- GQATP – Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros
- GrMaTS – Grupo de Materiais Tribologia e Superfícies
- IQSC – Instituto de Química de São Carlos
- MEV – Microscopia eletrônica de varredura
- NCO – Fórmula química dos isocianatos
- OH – Fórmula química dos álcoois
- PU – Poliuretana
- Sa – média aritmética da altura das irregularidades
- Sz – distância média entre os 5 picos mais altos e os 5 vales mais profundos
- SBR - butadieno-estireno
- Sm - média de espaçamento entre picos
- USP – Universidade de São Paulo
- UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1. ADESIVO.....	15
2.1.1. Classificação de adesivos.....	15
2.1.2. Adesividade .....	16
2.1.3. Solventes e <i>primers</i> .....	19
2.2. POLIURETANA .....	21
2.2.1. Poliuretana derivada de óleo de mamona.....	22
2.3. RUGOSIDADE .....	23
2.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	25
2.4.1. Ensaio de cisalhamento .....	25
2.4.2. Ensaio de tração uniaxial.....	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	28
3.1. MATERIAIS .....	28
3.1.1. Adesivo .....	29
3.1.2. Metal .....	29
3.1.2.1. Nomenclatura .....	30
3.2. MÉTODOS .....	31
3.2.1. Preparação superficial das amostras.....	31
3.2.2. Limpeza superficial das amostras.....	33
3.2.3. Medição da rugosidade.....	34
3.2.4. Preparação do adesivo .....	35
3.2.4.1. Deposição da PU.....	36
3.2.5. Ensaio de tração uniaxial .....	37
3.2.6. Ensaio de cisalhamento .....	38

4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	40
4.1.	MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE .....	40
4.2.	ENSAIO DE TRAÇÃO .....	43
4.3.	ENSAIO DE CISALHAMENTO.....	46
4.4.	ANÁLISE SUPERFICIAL .....	49
5.	CONCLUSÕES .....	53
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	54
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
	APÊNDICE A.....	60
	APÊNDICE B.....	73
	ANEXO A .....	84

## 1. INTRODUÇÃO

A união de peças e materiais em geral está presente em diversas aplicações, desde projetos mecânicos até implantes médicos e odontológicos. Essas junções podem ser feitas de várias formas, sendo que uma delas é através da utilização de adesivos.

Os adesivos, quando utilizados como meio de união de metais, oferecem vantagens em relação a outras técnicas, como melhor resistência à fadiga, versatilidade na união de diferentes substratos e espessuras, e menores custos de fabricação (CALLISTER, 2008). Também proporcionam uma melhor distribuição de tensões por toda a sua superfície (LUCIC *et al.*, 2006), diferente de processos como rebiteagem, uniões soldadas e parafusadas, que têm uma alta porcentagem de concentração de tensões (FLINN, TROJAN, 1994). Além disso, a baixa densidade dos materiais poliméricos proporciona projetos mais eficientes com relação ao peso (POCIUS, 2012).

Adesivos poliméricos utilizam solventes em sua formulação, para obter a fluidez adequada para a aplicação. Como os solventes são cancerígenos (MATSMOTO, 2011) (VILAR, 1998) (AZEVEDO *et al.*, 2009) (RODRIGUES, 2012) (INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER, 1990), uma alternativa de adesivos é a poliuretana derivada de óleo vegetal, que dispensa a utilização de solventes (VILAR, 1998). Entre as opções de óleo vegetal, a que oferece maiores vantagens é o óleo extraído da mamona (AZEVEDO *et al.*, 2009).

O objetivo principal deste projeto foi a avaliação da adesividade da poliuretana derivada de óleo de mamona através de ensaios mecânicos de tração uniaxial e de cisalhamento, em amostras de aço ABNT 1020 com diferentes rugosidades.

No capítulo dois são apresentados conceitos de adesivos e suas classificações, adesividade, solventes e *primers*, em seguida fala-se sobre a poliuretana de maneira geral, focando na de óleo de mamona. O capítulo três mostra os materiais que foram utilizados e como foram feitos os ensaios, preparação das amostras e aplicação do adesivo.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo serão apresentados os conceitos teóricos relacionados a utilização de polímeros como adesivos para metais. São apresentadas informações acerca da poliuretana e da poliuretana derivada de óleo de mamona, bem como sobre adesivos, a influência do acabamento superficial no desempenho de adesivos, e os parâmetros que foram analisados nos ensaios propostos neste projeto.

### **2.1.ADESIVO**

O termo adesivo se refere a uma substância que pode se apresentar em diferentes estados, sólido, líquido ou pastoso. Seu objetivo é a união de duas superfícies sólidas (substrato), porém, a qualidade desta união depende de fatores como a adesividade e o grau de molhamento entre adesivo/substrato (PIZZI, MITTAL, 2003).

#### **2.1.1. Classificação de adesivos**

Os adesivos podem ser classificados de diversas maneiras: quanto à obtenção, função, composição química, modo de aplicação ou reação, forma física, custo e uso final, entre outros (PETRIE, 2006). Na Tabela 1 são apresentadas diferentes classificações de adesivos.

Tabela 1 – Classificação de adesivos

Classificação de adesivos		Exemplo
1) Obtenção	Natural	Borracha natural
	Semi-sintético	Poliuretana
	Sintético	Feltro
2) Função	Estrutural	Epóxi
	Não Estrutural	Copolímero de SBR
3) Composição química	Termofixo	Poliéster
	Termoplástico	Acetato de celulose
	Elastômero	Borracha natural
	Híbrido	Epoxi-fenólica
4) Método de reação	Reação química	Acrílico
	perda de solvente ou água	Acetato de polivinilo
	resfriamento de um fundido	Poliâmidas
5) Forma Física	Múltiplas partes sem solvente (líquido ou pastoso)	acrílico modificado
	Uma parte sem solvente (líquido ou pastoso)	Poliuretana
	sólido (pó, fita, filme, etc)	durex
6) Uso final		Junção de materiais

Fonte: Adaptado de Petrie (2006)

### 2.1.2. Adesividade

A adesividade está ligada aos parâmetros que definem a qualidade da junção adesivo/aderente, dentre eles estão: rugosidade, fluidez, interação química, molhamento. As forças presentes nessa junção podem ser de natureza coesiva ou adesiva, como mostrado esquematicamente na Figura 1.

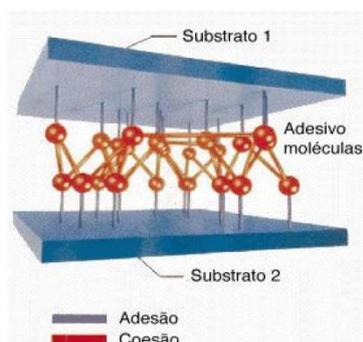


Figura 1 – Representação esquemática das forças adesivas e coesivas

Fonte: HandbookLoctite (1995, p.22)

As forças coesivas dependem das características do próprio adesivo. São as forças de ligação química que mantém unida as moléculas do adesivo. As forças adesivas são as que dependem das propriedades e da interação atômica entre o substrato e o adesivo. Os dois tipos de força mantêm, ou não, a união entre os materiais.

As possíveis forças presentes, tanto de adesão quanto coesão, são caracterizadas na Tabela 2.

**Tabela 2 – Possíveis forças presentes na adesão e na coesão**

<b>Tipo de força</b>	<b>Fonte da força</b>	<b>Energia de ligação (KJ/mol)</b>	<b>Descrição</b>
Forças primárias ou de curto alcance	Forças covalentes	60-700	Diamante ou polímeros reticulados. Altamente direcional.
	Iônicas ou eletrostáticas	600-1000	Cristais. Menos direcional que covalentes.
	Metálicas	100-350	Força em juntas soldadas.
Forças secundárias ou de van der Waals	Dispersão	0.1-40	Aparece pelas interações entre dipolos temporários. Conta por 75-100% da coesão molecular. As forças caem a 6ª potência da distância.
	Polar	4-20	Aparece pelas interações entre dipolos permanentes. Diminui a 3ª potência da distância.
	Ligação de hidrogênio	Até 40	Resultam do compartilhamento de prótons entre dois átomos possuindo pares de elétrons emprestados. Maior alcance que a maioria das uniões polares e de dispersão.

Fonte: Adaptado de Petrie (2006)

Outra característica importante na interação adesivo/substrato é o grau de molhamento entre eles. O molhamento é a capacidade de um material ser “molhado” por um líquido (FOX, *et al.*, 2006), ou seja, o quanto um material entra em contato com outro.

Diz-se que uma superfície é molhada por um líquido quando o ângulo de contato, Figura 2, do líquido com a superfície é menor que  $90^\circ$ . Este ângulo de contato ( $\theta$ ) está presente na interação entre diferentes materiais como entre líquidos, líquidos e gases, líquidos/gases e sólidos (FOX, *et al.*, 2006). No caso da PU derivada de óleo de mamona, essa interação se dá entre líquido (adesivo no momento da aplicação) e sólido (amostra).

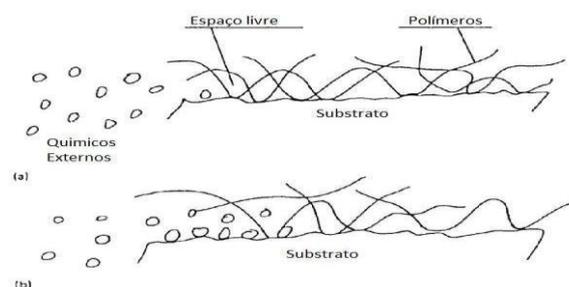


**Figura 2 – Ângulo de contato  $\theta$**

**Fonte: Pocius (2012, p. 104)**

Quanto maior a energia de superfície do substrato com relação ao adesivo, melhor será a interação adesiva. O molhamento é tão melhor quanto as forças adesivas que juntam adesivo/aderente, são maiores que as forças coesivas, que mantém as moléculas do adesivo unidas (KEYSER, 1972). O grau de molhabilidade, *a priori*, é medido pelo ângulo formado entre adesivo e aderente (ângulo de contato), e é tanto maior quanto mais próximo de  $0^\circ$  este ângulo estiver.

Uma das consequências de um molhamento ineficaz é o surgimento de espaços livres na interface adesivo/aderente podendo, assim, dependendo do ambiente de projeto, fazer com que químicos externos penetrem nestes espaços, Figura 3, comprometendo a aderência da junta mecânica (PETRIE, 2006).



**Figura 3– Penetração de químicos externos pelo mal molhamento da superfície**

**Fonte: Adaptado de Petrie (2006)**

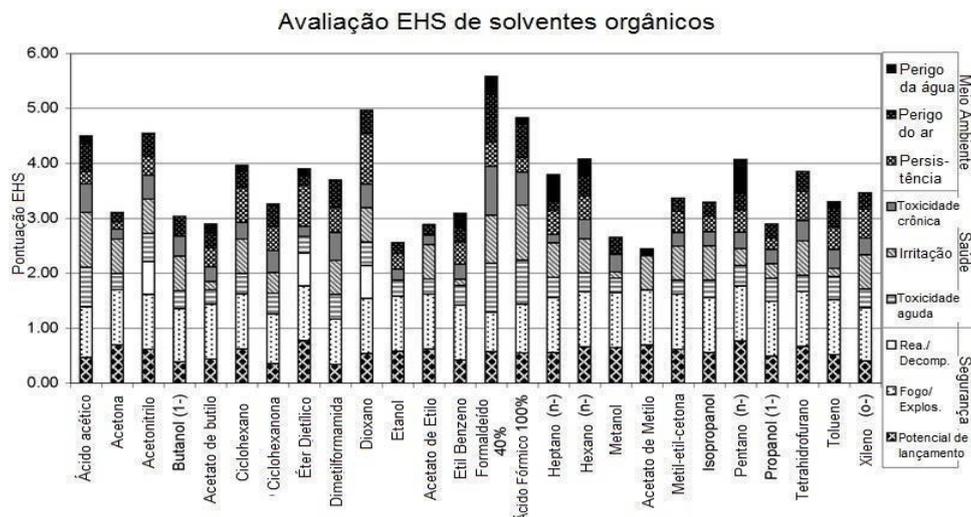
### 2.1.3. Solventes e *primers*

Quando as condições de projeto não fornecem a oportunidade de escolha de uma junta adesivo/aderente efetiva, é possível utilizar alguns agentes que irão ajudar na interação química entre as duas partes do conjunto. É para desempenhar este papel que são utilizados os solventes e *primers*.

Solventes são utilizados em processos químicos para ajudar em transferência de massa e calor, e para facilitar separações e purificações. São compostos orgânicos voláteis (COV) e, portanto, demandam uma grande preocupação ambiental pois, podem formar ozônio e poluir o ar atmosférico através de processos de oxidação do ar por radical livre (LANCASTER, 2002). Os efeitos mais agudos do ozônio estão ligados aos pulmões, com problemas respiratórios como ataques de asma e infecção pulmonar. Os solventes podem atingir o organismo por inalação, ingestão e exposição dérmica.

Solventes com uma alta sensibilidade ambiental incluem: benzeno, que é um potencial cancerígeno (ATIKINSON,2009) sendo que a inalação de 20000 ppm é fatal de 5 a 10 minutos (AHMAD,2007), xilenos (produção de ozônio), formaldeído (tóxico e altamente precursor de ozônio) e CFCs. (WYPUCH, 2001)..Exposições de pouca duração também podem causar irritação nos olhos, tosse e desconforto para respirar (OTA, 1989) (HORVATH, MCKEE1994) (LIPPMAN, 1991).

A Figura 4 mostra uma análise EHS, *Environment, Health and Safety*, (Meio ambiente, saúde e segurança) de 26 solventes comumente utilizados, desenvolvida por Fischer e colaboradores, quanto maior o valor no gráfico para cada uma das nove categorias, mais prejudicial é a substância (CAPELLO *et al.*, 2007).

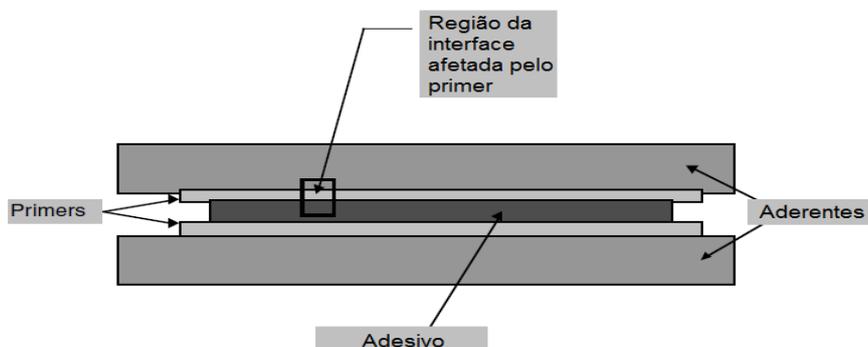


**Figura 4 – Resultados de avaliação EHS de 26 solventes comuns**

Fonte: Adaptado de Capello *et al.* (2007).

Os *primers* servem basicamente, para melhorar a interação entre adesivo/aderente. Enquanto solventes são dissolvidos no adesivo e mudam sua composição química para melhor interação com o substrato, *primers* não se misturam com nenhum dos componentes, formando uma camada entre o adesivo e o aderente, Figura 5, e fazendo uma espécie de ataque químico nos dois componentes para promover uma melhor junção. As características dessa junção dependem, apenas, de sua interação com o adesivo e com o aderente, diminuindo, assim, a importância da relação adesivo/aderente (PETRIE, 2006).

*Primers* apresentam basicamente os mesmos riscos que os solventes quanto aos problemas ambientais e de saúde. Por isso é sempre mais recomendável encontrar uma alternativa que não utilize nenhum desses dois componentes quando se faz junções.



**Figura 5 – Configuração da utilização de primers**

Fonte: Adaptado de Petrie (2006)

## 2.2. POLIURETANA

A poliuretana foi desenvolvida por Otto Bayer em 1937, sendo obtida a partir da reação química de poliadição de um isocianato, fórmula química NCO com um poliol, derivado do petróleo de fórmula química OH, gerando a ligação química uretana, Figura 6, (VILAR, 1998) (RODRIGUES, 2005). A escolha destes componentes é feita conforme sua aplicação final, sendo assim, possível variar as propriedades físicas e químicas da poliuretana (VILAR, 1998).

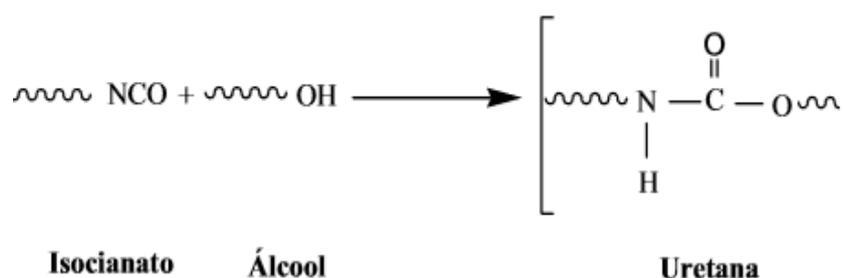


Figura 6 – Formação do grupo uretana

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2005)

A reação de um diisocianato com um poliol, Figura 7, forma a poliuretana.

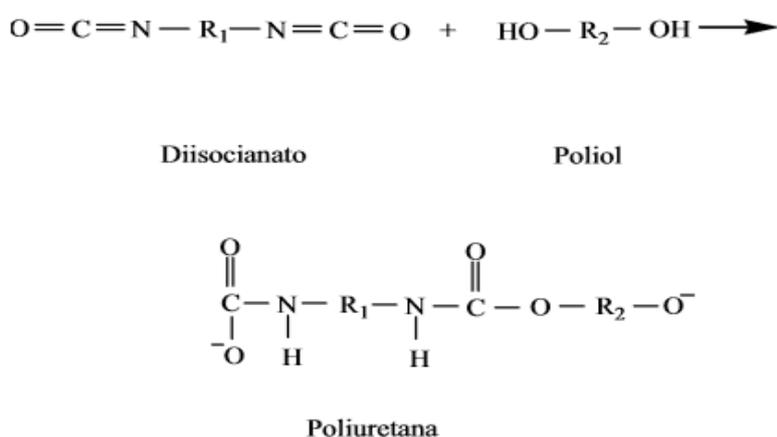


Figura 7 – Reação química de formação da poliuretana a partir de poliol e diisocianato

Fonte: Adaptado de Vilar (1998)

A poliuretana é o polímero mais versátil que se tem conhecimento. Algumas de suas aplicações são: espuma flexível e rígida, camisinha, sola de sapato,

adesivos, tintas e revestimentos, selantes, lubrificantes, esmaltes, resinas, isolantes acústicos, entre outros (VILAR, 1998) (VASCO, 2012).

A maior desvantagem de se utilizar a PU derivada de petróleo é o fato dela causar câncer devido aos solventes que necessariamente devem ser adicionados (VILAR, 1998) (MATSMOTO, 2011) (DUSMAN, 2012) (AZEVEDO, 2008) (RODRIGUES, 2012) (INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER, 1990).

Com o objetivo de se desenvolver componentes não tóxicos, surgiram as pesquisas utilizando óleos vegetais como poliols de adição ao isocianato, que pode ser derivada de óleos como: óleo de milho, soja, girassol, canola, amendoim, oliva, mamona (PETROVIC *et al.*, 1999). Com exceção da mamona, as outras opções também podem ser transformadas em alimentos, fazendo-a melhor opção para esta aplicação.

### 2.2.1. Poliuretana derivada de óleo de mamona

O desenvolvimento da poliuretana derivada do óleo de mamona é estudado desde 1984 pelo Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros (GQATP) da USP (AZEVEDO *et al.*, 2009), que pesquisam aplicações como cimento ósseo, lubrificantes mecânicos, resinas, entre outras (AZEVEDO *et al.*, 2009). O óleo de mamona é um poliols poliéster natural, sendo composta por 89% de triglicéride do ácido ricinoleico, Figura 8.

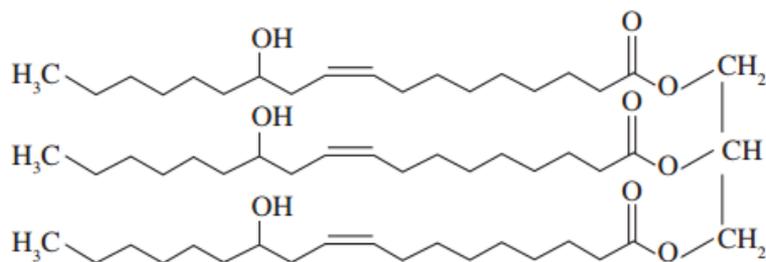


Figura 8 – Macromolécula do ácido ricinoleico

Fonte: Adaptado de Azevedo (2009)

O adesivo de PU derivada do óleo de mamona pode ser classificado como semi-sintético por se tratar de um produto natural que sofreu modificação

química (MANO, 1999). A função dele é estrutural, por ter alta resistência mecânica e permanência, normalmente suportando tensões acima de 690 kPa e resistindo aos mais variados ambientes. No âmbito de sua composição química, o adesivo se trata de um termofixo (PETRIE, 2006), caracterizado por possuir alta dureza e resistência (CALLISTER, 2008).

### 2.3. RUGOSIDADE

Rugosidade superficial é a medida de alívio topográfico da superfície (BENNETT, MATTSSON, 1993), e representa diferenças bem localizadas na superfície do substrato em um nível microscópico (BRAUNECKER, 2008).

A rugosidade pode trazer muitos benefícios para a adesão, dependendo do seu grau ela pode: aumentar a área de contato, fazendo com que haja uma melhor distribuição de tensão; melhorar a interação entre os componentes; gera uma ancoragem entre adesivo e substrato; além de ajudar com uma melhor dissipação de energia proveniente de solicitações que a junta venha a sofrer (VILLENAVE, 2005).

A medição da rugosidade foi feita utilizando dos parâmetros  $S_a$  e  $S_z$  para uma noção mais completa do perfil da superfície. Enquanto a  $S_a$  é a rugosidade média de toda a superfície analisada, pode acontecer que haja algum tipo de mascaramento nos valores encontrados se os picos e os vales tiverem uma distribuição uniforme, podendo haver superfícies pouco ou muito rugosas e na média terem valores iguais, o que está representado na Figura 9.

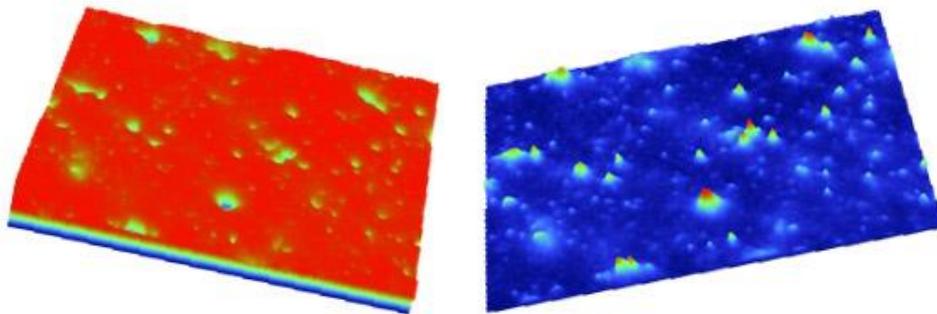
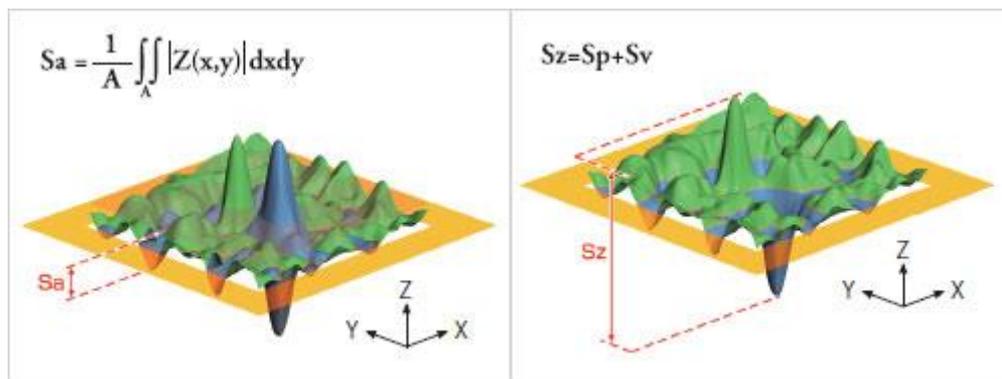


Figura 9 – (a) superfície plana e (b) superfície com picos com o mesmo valor de  $S_a$   
Fonte: Michigan Metrology (2010)

Para auxiliar a incerteza de  $S_a$  que entra a medida de  $S_z$ , que segundo a ISO 25178-2 se trata da diferença entre o maior pico e o maior vale da superfície analisada, dando uma maior noção das diferenças de profundidade (FACCIO,2002). Na figura abaixo são exemplificados os fatores  $S_a$  e  $S_z$ .



**Figura 10 – Exemplificação de perfil de rugosidade de uma superfície (a)  $S_a$  e (b)  $S_z$**   
**Fonte: Olympus (2013)**

Uma teoria que exemplifica como a rugosidade pode ser benéfica para a aderência, se em proporção adequada, é a teoria do intertravamento mecânico que diz basicamente que quando o adesivo líquido entra em possíveis buracos e poros que a amostra possa ter, após acontecer a solidificação, são criadas forças mecânicas que dão uma resistência a mais junto com as forças moleculares (FLINN, TROJAN, 1994). Mas até que ponto esta rugosidade será benéfica para a junção depende principalmente do grau de molhabilidade do adesivo no substrato, porque quanto mais profundos os “buracos” gerados pelo lixamento, melhor deverá ser a interação adesivo/aderente para conseguir penetrar em toda a superfície. Por isso, a proposta deste projeto é avaliar o desempenho do adesivo depositado sobre substratos de diferentes metais com diferentes acabamentos superficiais, a fim de avaliar os resultados em função da rugosidade da superfície e da molhabilidade do adesivo.

## 2.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para a análise das propriedades mecânicas de juntas adesivas podem ser utilizadas as mais variadas técnicas de ensaio, no presente trabalho foram utilizados os ensaios de cisalhamento e tração uniaxial por se tratarem de esforços comumente encontrados em aplicações mecânicas.

### 2.4.1. Ensaio de cisalhamento

Grande parte das falhas que ocorrem, na engenharia, são causadas por excesso de carga cisalhante (CANEVAROLO, 2004). Com o objetivo de identificar a carga máxima cisalhante que o adesivo de poliuretana derivada de óleo de mamona suporta, o ensaio de cisalhamento, que gera a curva característica do material, será realizado.

A carga de cisalhamento impõe uma tensão equilibrada por toda a superfície da junção, paralela a carga aplicada. Sempre que possível, juntas devem ser formadas de maneira a fazer com que a maior parte de carga da junta seja transmitida como carga de cisalhamento (SHIELDS, 1984).

O ensaio de cisalhamento é caracterizado por ter a tensão aplicada sempre paralela ao plano cisalhante, Figura 11, cuja representação é a tensão aplicada em função do deslocamento ocorrido até o momento da falha (VIECILI, 2003).

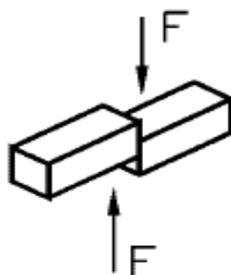
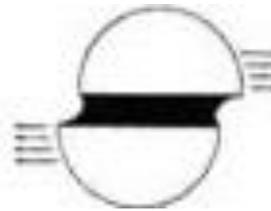


Figura 11 – Esquemático do ensaio de cisalhamento

Fonte: Adaptado de Fonseca (1991)

O comportamento do adesivo, quando se aplica este tipo de carga é mostrado na Figura 12.

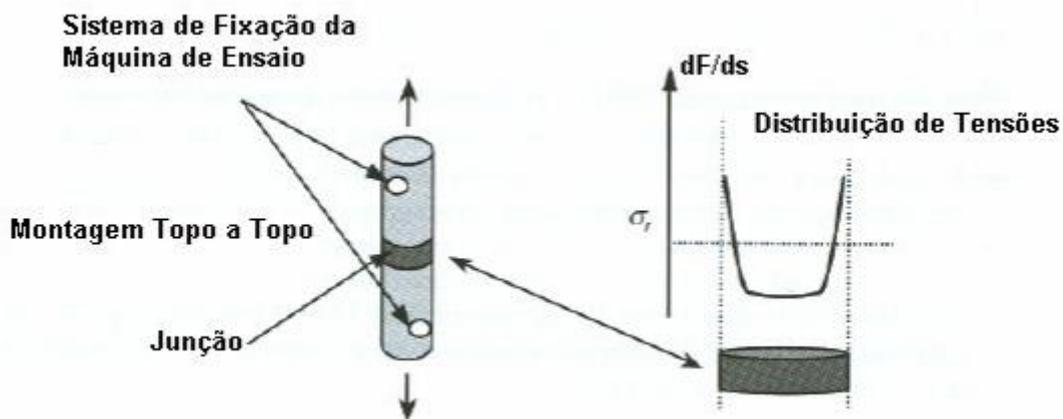


**Figura 12 – Ensaio de cisalhamento em adesivos**

Fonte: Adaptado de Silva (2006)

#### 2.4.2. Ensaio de tração uniaxial

O ensaio de tração é baseado na aplicação de esforços perpendiculares ao plano da seção resistente, de modo que o adesivo seja tracionado, conforme mostrado na Figura 13. Seus resultados são apresentados na forma de gráfico da tensão aplicada em função do deslocamento ocorrido até o momento da ruptura.

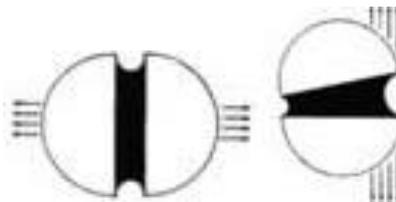


**Figura 13 – Representação do ensaio de tração uniaxial e da distribuição de forças agindo sobre o adesivo**

Fonte: Villenave (2005)

As forças da junção quando carregadas em tração ou cisalhamento são comparáveis. De novo, a tensão é distribuída igualmente sobre a área da junção,

mas não é sempre possível ter certeza de que este é o único esforço presente. Se a carga aplicada estiver um pouco deslocada (clivagem), então o benefício de uma carga igualmente distribuída é perdido e a junção poderá falhar mais facilmente, como mostra a Figura 14 onde pode-se observar o deslocamento em camadas até seu rompimento.



**Figura 14 – Comportamento do adesivo durante ensaio de tração uniaxial e clivagem**

**Fonte: Adaptado de Silva (2006)**

Também é importante que os aderentes sejam espessos, e não suscetíveis a uma deformação apreciável sob a carga aplicada. Se isso não for possível, então novamente, a tensão não será uniforme (SHIELDS, 1984) e o rompimento poderá ocorrer no adesivo e nas interfaces superior ou inferior adesivo / aderente.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas as etapas do projeto.

#### 3.1. MATERIAIS

Os materiais utilizados neste projeto foram: o adesivo de poliuretana derivada de óleo de mamona e amostras de aço ABNT 1020 em duas geometrias diferentes. A sequência de execução das atividades é apresentada na Figura 15 na forma de fluxograma.

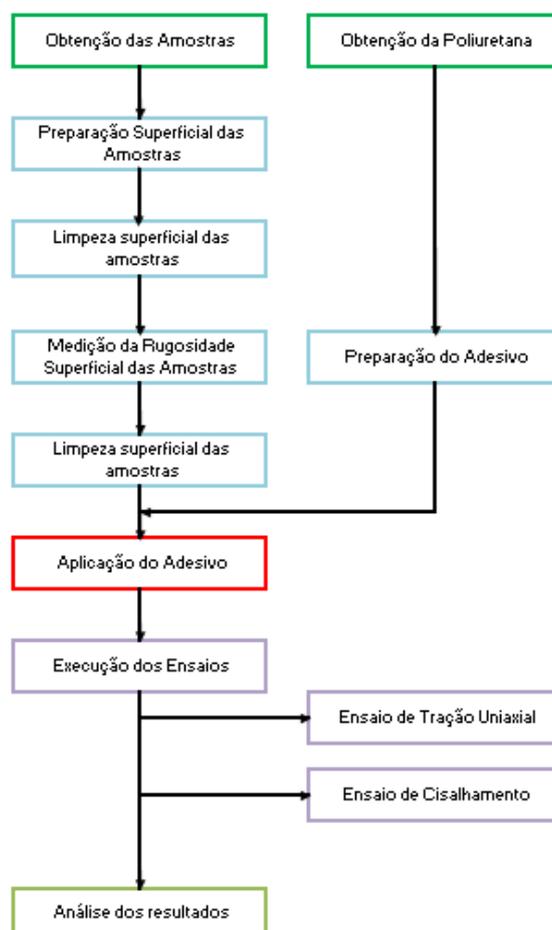


Figura 15 – Fluxograma das atividades de execução do projeto

Fonte: Autoria própria

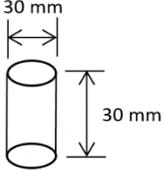
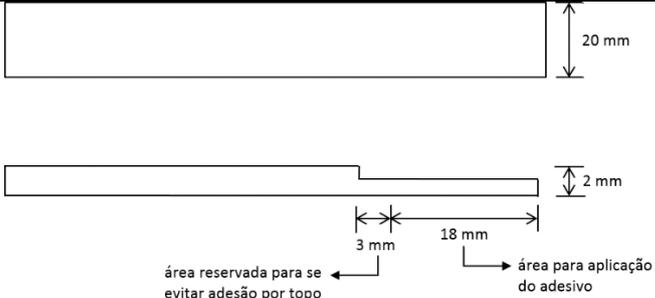
### 3.1.1. Adesivo

O adesivo utilizado é a poliuretana derivada do óleo de mamona Polibond®, fornecida pela empresa Cequil Central de Ind. Des. De Polímeros Ltda de Araraquara – SP. É composta por um pré-polímero, obtido de difenil metano diisocianato (MDI) e por um polioli poliéster trifuncional, derivado do óleo de mamona, tendo como sua maior concentração o ácido ricinoleico (Azevedo *et al.*, 2009).

### 3.1.2. Metal

As amostras metálicas obtidas são de aço ABNT 1020, cuja geometria é alterada conforme o ensaio a ser realizado, Tabela 3. Os modelos e medidas dos corpos de prova foram baseados na literatura e nas normas ASTM D3983-93 e ASTM D897-95a.

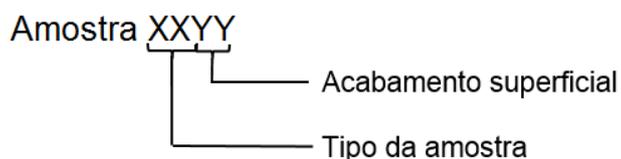
Tabela 3– Materiais utilizados

Tipo	Ensaio	Geometria	Material	Qtde
1	Tração uniaxial			
2	Cisalhamento		Aço ABNT 1020	84

Fonte: Autoria própria

### 3.1.2.1. Nomenclatura

A nomenclatura adotada na identificação das amostras seguiu a lógica mostrada na Figura 16.



**Figura 16 – Significado da nomenclatura utilizada**

**Fonte: Autoria própria**

O primeiro símbolo presente na nomenclatura é o tipo da amostra, ou seja, Tipo 1 (T1) ou Tipo 2 (T2), de acordo com a geometria da amostra, Tabela 3. Em seguida é representado o acabamento superficial da amostra em questão que poderá ser polido (PO), lixado em granulometria 800 (L4) ou lixado em granulometria 80 (L8). A Tabela 4 mostra essa nomenclatura sucintamente.

**Tabela 4 – Nomenclatura adotada**

Nomenclatura	Geometria	Acabamento superficial
Amostra T1PO	Tipo 1	Polido
Amostra T1L4		Lixa 800
Amostra T1L8		Lixa 80
Amostra T2PO	Tipo 2	Polido
Amostra T2L4		Lixa 800
Amostra T2L8		Lixa 80

**Fonte: Autoria própria**

## 3.2. MÉTODOS

Nesta seção são explicados os métodos de execução que foram aplicados neste projeto, seguindo a sequência da Figura 15. Desde a preparação da superfície, os processos de limpeza que foram necessários, a medição de rugosidade, a cola do adesivo e finalmente os testes mecânicos com sua posterior análise superficial através do MEV.

### 3.2.1. Preparação superficial das amostras

A preparação superficial das amostras segue as etapas mostradas na Figura 17.

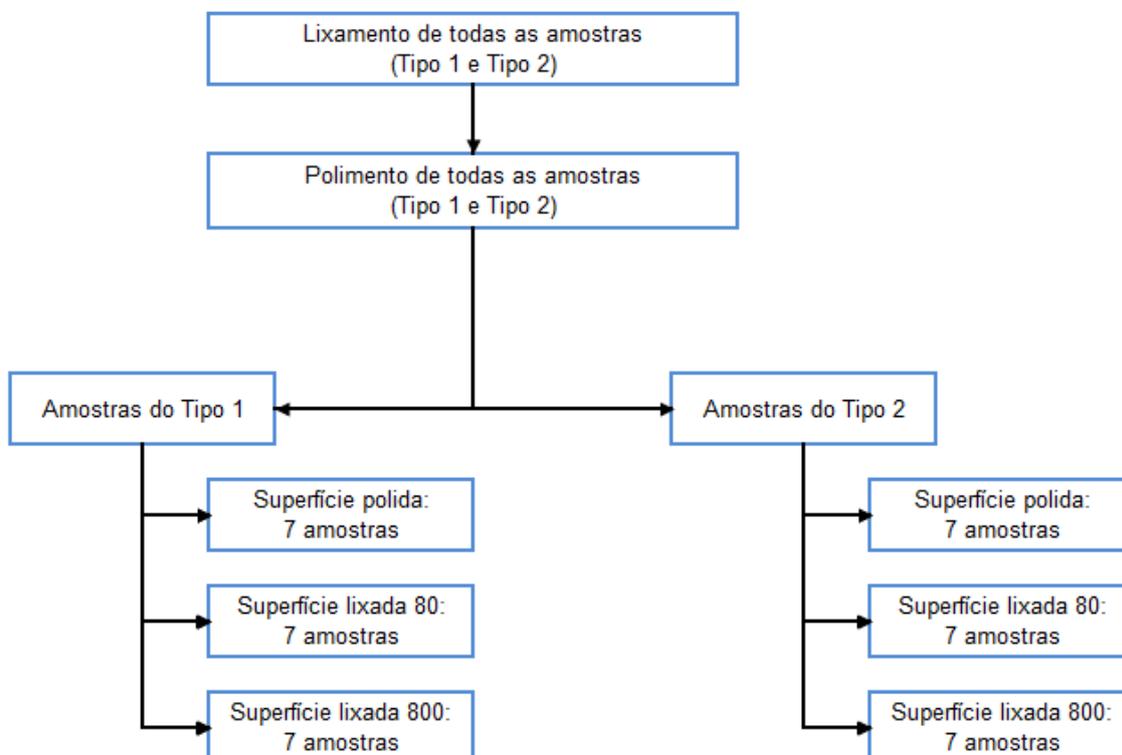
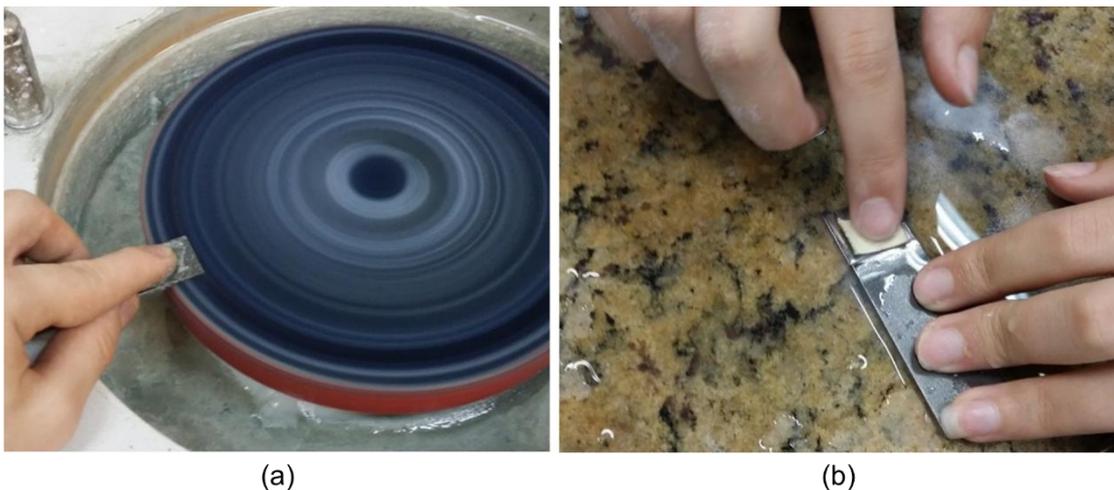


Figura 17 – Procedimento adotado na execução da etapa de preparação superficial das amostras

Fonte: Autoria própria

As amostras foram divididas em três grupos de 14, como mostra a Figura 17. Em ambos os tipos de amostras o primeiro grupo compõe amostras cuja superfície é polida, o segundo grupo compõe amostras com superfície lixada na granulometria 80 e o terceiro grupo com amostras lixadas em granulometria 800.

O processo se iniciou com o lixamento de todas as amostras. Para esta etapa, foi utilizada a seguinte sequência de granulometria de lixas: 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, e 2000. Em seguida, todas as amostras foram polidas, com alumina 1  $\mu\text{m}$ . As amostras do tipo 1, o polimento foi feito através do uso de politriz no laboratório de materiais e as amostras do tipo 2 o processo foi feito em duas etapas, a primeira fazendo uma adaptação na politriz, como mostrado na Figura 18, que garantiu apenas o polimento da parte mais externa da superfície. Para a parte mais interna, que não conseguiu ser polida na primeira etapa, foi feita de forma manual, como mostra a Figura 18b.



**Figura 18 – (a) Adaptação da politriz para polimento das amostras do tipo 2 (b) Etapa manual de polimento final das amostras do tipo 2**

**Fonte: Autoria própria**

As amostras dos grupos 2 e 3 foram lixadas logo após o polimento, sendo que para isso foi utilizado um peso de cerca de 3kg para garantir uma carga constante no lixamento de todas as amostras, Figura 19.



**Figura 19 – Processo de granulometria final com auxílio de peso**

**Fonte: Autoria própria**

### **3.2.2. Limpeza superficial das amostras**

O objetivo da limpeza superficial das amostras é a eliminação da camada adsorvida e de sujidades presentes, além de resíduos de vaselina usada para evitar corrosão superficial, respeitando a seguinte sequência:

- a) Limpeza pós preparação superficial (lixamento):
  - I. Limpeza por saponificação: remoção das sujidades maiores por aplicação de detergente neutro comum;
  - II. Enxague: remoção da limpeza da etapa anterior;
  - III. Aplicação de álcool isopropílico;
  - IV. Secagem das amostras por ar quente: eliminação do álcool;
  - V. Aplicação de vaselina;
  
- b) Limpeza antes ao ensaio de rugosidade:
  - I. Remoção do excesso de vaselina utilizando algodão;
  - II. Aplicação de álcool isopropílico;
  - III. Secagem das amostras por ar quente: eliminação do álcool;
  - IV. Execução do ensaio de rugosidade;

- V. Aplicação de vaselina;
- c) Limpeza antes aplicação do adesivo:
  - VI. Remoção do excesso de vaselina utilizando algodão;
  - VII. Aplicação de álcool isopropílico;
  - VIII. Secagem das amostras por ar quente: eliminação do álcool;
  - IX. Aplicação do adesivo;

A limpeza por saponificação consiste em promover reação química do produto de limpeza com a sujidade da superfície do substrato (SILVA, 2008). A princípio usaríamos a acetona para retirar a sujidade que o detergente não é capaz de remover, porém como houve problemas na compra da acetona, já que a polícia militar controla este tipo de produto, optamos por prolongar as etapas anteriores somadas ao uso do álcool isopropílico. A secagem por ar quente elimina o álcool que reage com o adesivo podendo comprometer sua adesão no substrato.

### 3.2.3. Medição da rugosidade

As medições das rugosidades superficiais foram realizadas utilizando o rugosímetro 3DTalysurf CCI, Figura 20, do Laboratório de Metrologia da UTFPR. Foram feitas três medições em cada amostra para garantir a uniformidade dos resultados abrangendo toda a área dos corpos de prova.



**Figura 20 – Rugosímetro 3DTalysurf CCI**

**Fonte: Microtop, 2012**

Segundo Mario F. Triola, quando temos uma amostra pequena ( $n < 30$ ) e se pode calcular o desvio padrão das amostras e não o da população, temos que:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (1)$$

Onde,

$s$  = Desvio padrão

$n$  = Número de amostras

$x_i$  = Média de cada uma das amostras variando de 1 a  $n$

$\bar{x}$  = Média de todas as amostras

E, considerando o grau de confiança  $3\sigma$  (99,75%) e o grau de liberdade como sendo  $(n-1)$ , obtemos da Tabela 9, Anexo A, o valor de  $t$  de student para cálculo do erro, utilizando assim a fórmula a seguir:

$$\varepsilon = t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

#### 3.2.4. Preparação do adesivo

Foi utilizado o adesivo de poliuretana derivada do óleo de mamona, Polibond fornecido pela **Cequil – Araraquara - SP**. A poliuretana é apresentada na forma bicomponente composta de um polioli e de um pré-polímero. As amostras foram preparadas com a adição do pré-polímero e polioli na proporção de 1:1 em peso. O tempo de mistura dos componentes foi de 3 minutos com agitação manual. A retirada de bolhas formadas no processo foi feita utilizando a sucção por bomba de vácuo. Figura 21d, durante 10 minutos, Figura 21c. É necessário salientar que, apesar do grande auxílio na remoção de bolhas, o processo não é totalmente efetivo e é possível notar a presença de algumas bolhas residuais quando ocorre a fratura, o que também pode influenciar nos resultados obtidos, pois essas bolhas atuam como concentradores de tensões onde o rompimento é mais fácil.



**Figura 21 – Processo de preparo da PU. (a) adição do pré-polímero (b) adição do polioli (c) conjunto dessecador/bomba de vácuo (d) dessecador com o adesivo**

**Fonte: Cunha (2013)**

### 3.2.4.1. Deposição da PU

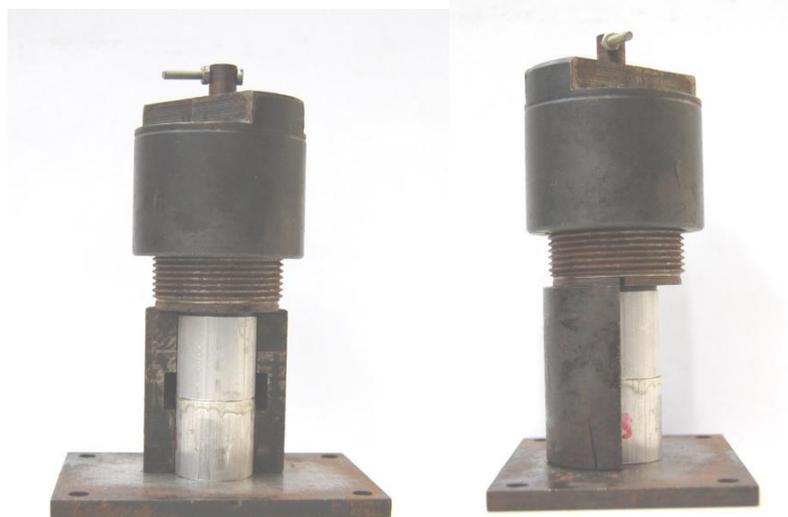
Antes da deposição da PU foi feita uma nova limpeza para garantir a integridade da superfície e evitar possível comprometimento da junta adesiva.

A deposição do adesivo nas amostras foi feita manualmente. O processo seguiu o seguinte procedimento:

- I. As amostras foram separadas em pares e por tipo.
- II. Para um dos pares, a PU foi aplicada em uma das amostras e logo em seguida seu par foi encaixado:
- III. Nas amostras de ensaio de cisalhamento foi aplicado 0,06g de PU.
- IV. Nas amostras de ensaio de tração foi aplicado 0,08g de PU, calculado através de proporção pela área da aplicação.

- V. Com o par colado, um peso de 1 kg (NORAZWANI, 2014) foi depositado sobre as amostras do tipo 2 de maneira a garantir que o adesivo se espalhasse uniformemente e haja o molhamento efetivo.
- VI. Para as amostras do tipo 1 é utilizado a prensa especial para colagem de topo representada na Figura 22.
- VII. O tempo de cura, segundo o fabricante, foi de 24 horas.

Esta é a etapa considerada crítica, por se tratar de um processo manual que leva em conta a precisão da quantidade de adesivo aplicado e de uma pressão ótima para cura que garanta o espalhamento e molhamento efetivos do adesivo no substrato, e evite resíduos de adesivo nas laterais das amostras, o que pode mudar os resultados das tensões por se tratar de um esforço a mais não contabilizado no ensaio.



**Figura 22 – Prensa para colagem de topo das amostras de metal**

**Fonte: Azevedo *et al.* (2009)**

### **3.2.5. Ensaio de tração uniaxial**

Para o ensaio de tração uniaxial, foi usada a máquina de tração EMIC do Laboratório de Materiais da UTFPR.

Houve a necessidade de instalar um dispositivo na EMIC onde as amostras foram fixadas, permitindo, assim, que o ensaio fosse realizado. Esse dispositivo tornou-se necessário uma vez que as amostras ensaiadas não possuíam o padrão das amostras de ensaio de tração, comumente utilizadas. O ensaio seguiu a norma ASTM D897-95a, com velocidade de 1,3 mm/min e carga de 2T.

### 3.2.6. Ensaio de cisalhamento

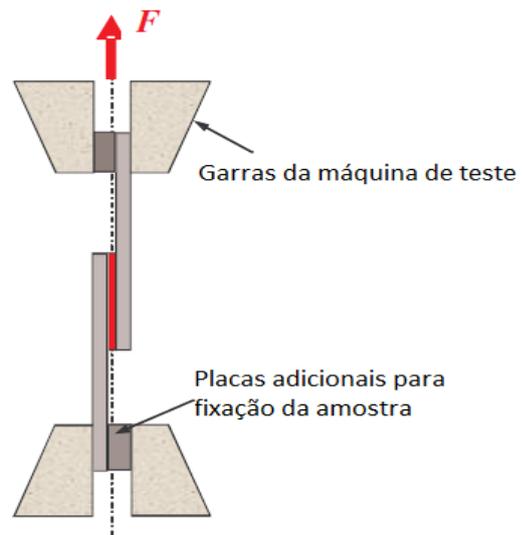
O ensaio de cisalhamento consiste na aplicação de forças opostas, em Newtons (N), conforme esquema representativo da Figura 23. Foram realizados 5 ensaios para cada tipo de amostra, de acordo com a norma ASTM D1002-05, com velocidade de 1,3 mm/min e carga de 2T.



**Figura 23– Modelagem representativa do ensaio de cisalhamento**

**Fonte: Autoria própria**

O equipamento utilizado foi a máquina de tração EMIC, como no de tração uniaxial, porém houve a necessidade de se instalar um dispositivo de adaptação, conforme Figura 24.



**Figura 24 - Fixação da amostra de ensaio de cisalhamento**

**Fonte: Adaptado de Lucic (2006,p. 599)**

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados colhidos nos ensaios bem como a discussão destes dados. Começando pela rugosidade, são apresentados valores médios para cada geometria/acabamento, desvio padrão e erro com o auxílio de t de student. Logo após serão discutidos os ensaios, os valores encontrados para as forças de rompimento e possíveis falhas no processo. E por último serão analisadas as superfícies finais após o rompimento das amostras.

### 4.1. MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE

Nesta seção são apresentados os resultados das medições de rugosidade das amostras na granulometria final, a fim de verificar e comparar a influência da rugosidade superficial na aderência do adesivo.

A Tabela 5 mostra as médias, desvio padrão e erros calculados a partir dos resultados obtidos na medição de rugosidades para  $S_a$ ,

**Tabela 5 – Resultados das medições de rugosidade superficial ( $S_a$ )**

AMOSTRA	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	ERRO
T1PO	1.798	0.548	0.316
T1L4	3.202	1.318	0.760
T1L8	8.481	2.081	1.202
T2PO	0.077	0.038	0.022
T2L4	0.112	0.0425	0.025
T2L8	0.421	0.257	0.148

Fonte: Autoria própria

E na Tabela 6 os resultados para  $S_z$ .

**Tabela 6 – Resultados das medições de rugosidade superficial (Sz)**

AMOSTRA	MÉDIA ( $\mu\text{m}$ )	DESVIO PADRÃO ( $\mu\text{m}$ )	ERRO ( $\mu\text{m}$ )
T1PO	0.515	0.319	0.184
T1L4	2.144	0.706	0.408
T1L8	7.995	2.141	1.236
T2PO	2.140	0.798	0.461
T2L4	3.039	1.169	0.675
T2L8	13.266	5.116	2.953

Fonte: Autoria própria

Com os valores da Tabela 5 e Tabela 6 é possível notar, como já previsto, que o desvio padrão e os erros para as amostras do tipo 2 foram maiores que para as do tipo 1. Isso se deu pelo fato do processo empregado para a preparação das amostras do tipo 2 ter sido totalmente manual. Foi possível perceber também que, quando colocado na granulometria final, as amostras não se encontravam 100% planas, o que causou uma variação de rugosidade em uma mesma amostra, por sofrer diferentes pressões em contato com a lixa, Figura 25.



**Figura 25 – Diferença de acabamento em uma mesma peça**

Fonte: Autoria própria

Por se tratar de uma média da rugosidade de toda a superfície analisada, o que pode ter feito com que o fator  $S_a$  tenha sido menor nas amostras do tipo 2 com relação as do tipo 1 é de que a lixa da granulometria final não conseguiu atingir toda a região superficial, tornando, na média, valores de rugosidade menores que os esperados. Por isso foi importante a utilização de um segundo fator, o  $S_z$ , que analisa a diferença entre pontos de máximo e mínimo, podendo se notar de forma mais adequada as diferenças de profundidade.

Através da utilização do rugosímetro 3D foi possível gerar fotos da rugosidade superficial das amostras, apresentadas na Figura 26. As amostras do tipo 1 apresentaram pequenas crateras que podem ter surgido durante o processo de polimento, uma vez que os panos utilizados já tinham um desgaste prévio e possíveis micropartículas de materiais anteriormente polidos. Há a possibilidade ainda, de o material das amostras apresentar baixa qualidade.

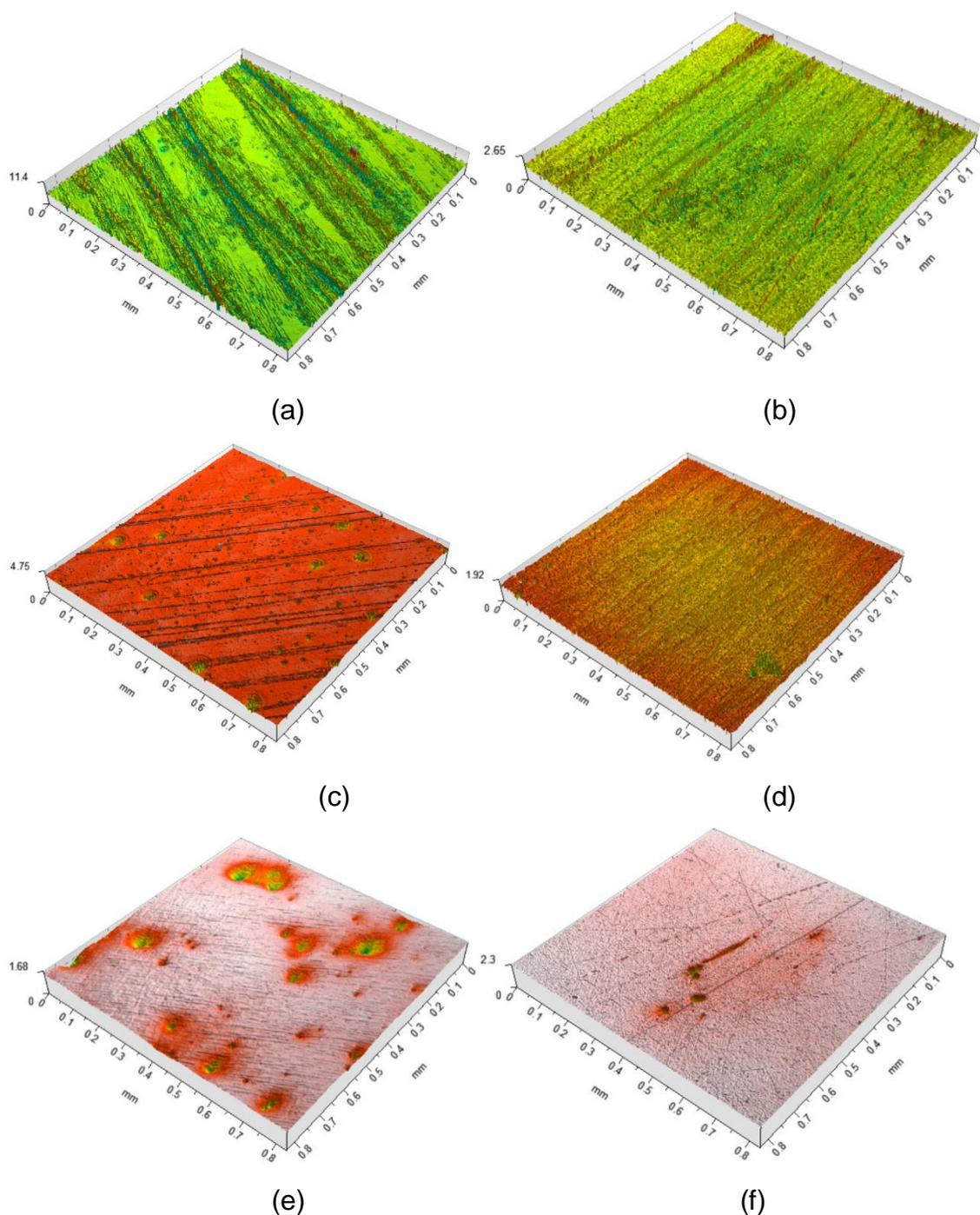


Figura 26 – Superfícies das amostras (a) T1L8 (b) T2L8 (c) T1L4 (d) T2L4 (e) T1PO (f) T2PO

Fonte: Autoria própria

## 4.2. ENSAIO DE TRAÇÃO

Para os ensaios de tração se utilizou de um suporte especial como já citado no item 3.2.5. Na Figura 27 é mostrada a utilização do suporte.



**Figura 27 – Suporte para o ensaio de tração**

**Fonte: Autorial própria**

Na Tabela 7 são apresentados os valores obtidos para as forças máximas suportadas pelas amostras do tipo 1 após seus devidos ensaios, assim como sua média e desvio padrão. Gráficos mais detalhados para cada ensaio podem ser encontrados no Apêndice A.

**Tabela 7 – Resultados para os ensaios de tração**

Força máxima nos ensaios de tração					
Pares T1L8	Força (N)	Pares T1L4	Força (N)	Pares T1PO	Força (N)
1	685	1	1450	1	1025
2	2628	2	2883	2	2883
3	2087	3	2537	3	2241
4	162	4	2947	4	3667
5	1342	5	3437	5	3323
6	1631	6	1766	6	5836
7	1480	7	1157	7	1999
Média	1430.71	Média	2311.00	Média	2996.29
Desvio Padrão	824.66	Desvio Padrão	858.36	Desvio Padrão	1532.12

**Fonte: Autoria própria**

As possíveis razões para o alto desvio padrão nos resultados obtidos foram: falta de balança precisa causando variação na quantidade de adesivo aplicado nas amostras, nesse tipo de amostra houve a necessidade de utilizar uma balança com precisão de 0,01g. Foi utilizado assim do artifício de uma proporção de quantidade de adesivo coloca nas amostras em relação a uma espécie de gabarito, mais leve, com a quantidade correta de adesivo, Figura 28.



**Figura 28 – Amostra de gabarito com a quantidade correta de adesivo a ser colocada na amostra do tipo 1**

**Fonte: Autoria própria**

Também pode-se comentar que o processo de retirada de bolhas produzidas pela reação química do adesivo possa não ter sido eficaz, gerando concentradores de tensões, como já explicado no item 3.2.4, fazendo com que

as amostras contivessem bolhas de forma não uniforme, assim fazendo com que umas tivessem maior concentração de tensões que outras. E por último temos o tempo para aplicação do adesivo em cada amostra, como a colagem foi feita por etapas em vários corpos de prova por vez, é possível que a viscosidade do adesivo tenha diminuído conforme o tempo que levou para ser pesado e aplicado em cada par, o que pode ter causado diferentes graus de molhamento pela perda de fluidez.

Esperava-se que aumentando a rugosidade superficial das amostras a força suportada aumentaria, uma vez que a área de contato adesivo/aderente seria maior. Porém os resultados obtidos, Figura 29, mostraram que a força foi maior nas amostras com superfície polida. Com estes resultados podemos partir da hipótese da complexidade que está ligada com o processo de molhamento do adesivo no substrato, que não é apenas a maior área de contato que vai garantir a maior resistência nem o intertravamento mecânico vistos no item 2.3. A rugosidade alta pode ter feito com que o adesivo não tenha conseguido uma penetração efetiva devido à alta profundidade dos sulcos gerados, penetração esta também ligada a fluidez do adesivo na hora da aplicação.

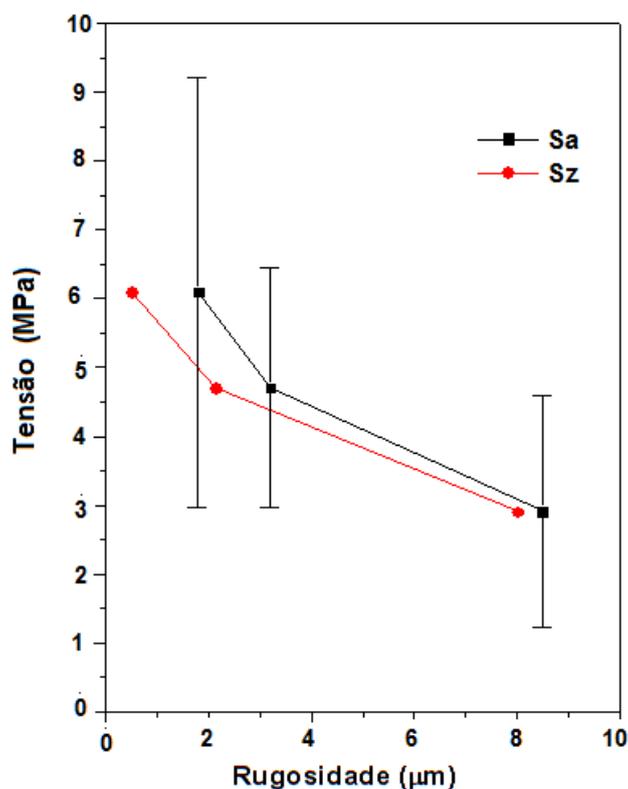


Figura 29 – Curva De Rugosidade x Tensão Máxima para o ensaio de tração

Fonte: Autoria própria

### 4.3. ENSAIO DE CISALHAMENTO

A princípio o ensaio de cisalhamento foi executado utilizando o arranjo apresentado na Figura 30a, porém os mordedores não geraram força suficiente para prender as amostras, o que fez com que as mesmas escorregassem, dando a impressão que estava ocorrendo deformação elástica com a aplicação de pouca força e gerando gráficos com curvas com alguns patamares de força intermitente com grande grau de uma suposta deformação, Figura 31a. Após esse erro ser percebido, mudou-se a forma com que a amostra era presa na máquina de ensaio, Figura 30b, porém o torque exercido para a fixação das garras nas amostras teve que ser aplicado com cuidado para o não rompimento com um esforço desnecessário, o que acabou acontecendo com 2 amostras as quais tiveram seus resultados desprezados. Na Figura 31b é possível observar que com o arranjo 2 foi obtida uma curva mais condizente com o ensaio e o comportamento do adesivo.

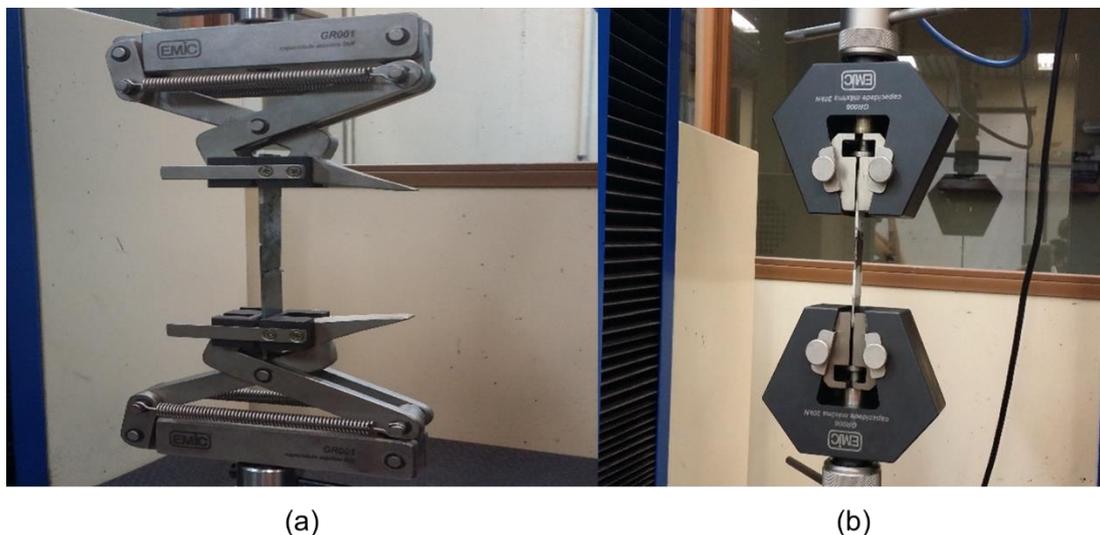
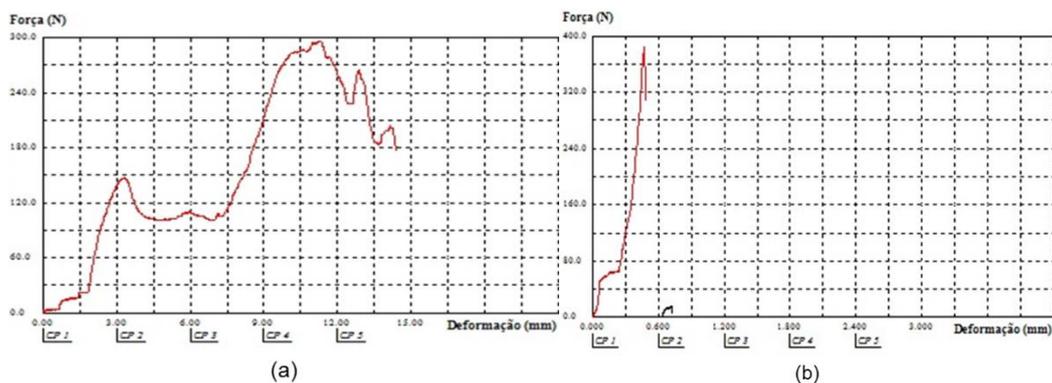


Figura 30 – (a) arranjo de garras 1 (b) arranjo de garras 2

Fonte: Autoria própria



**Figura 31 – Curvas para a mesma amostra do tipo T2L8 (a) arranjo de garras 1 (b) arranjo de garras 2**

**Fonte: Autoria própria**

Na Tabela 8 são apresentados os valores de tensão máxima encontrados para o conjunto de amostras que não fraturaram, assim como a média e desvio padrão, calculados como já especificado no item 4.1. Os gráficos Força x Deformação com maior detalhamento podem ser encontrados no Apêndice B.

**Tabela 8 – Resultados para os ensaios de cisalhamento**

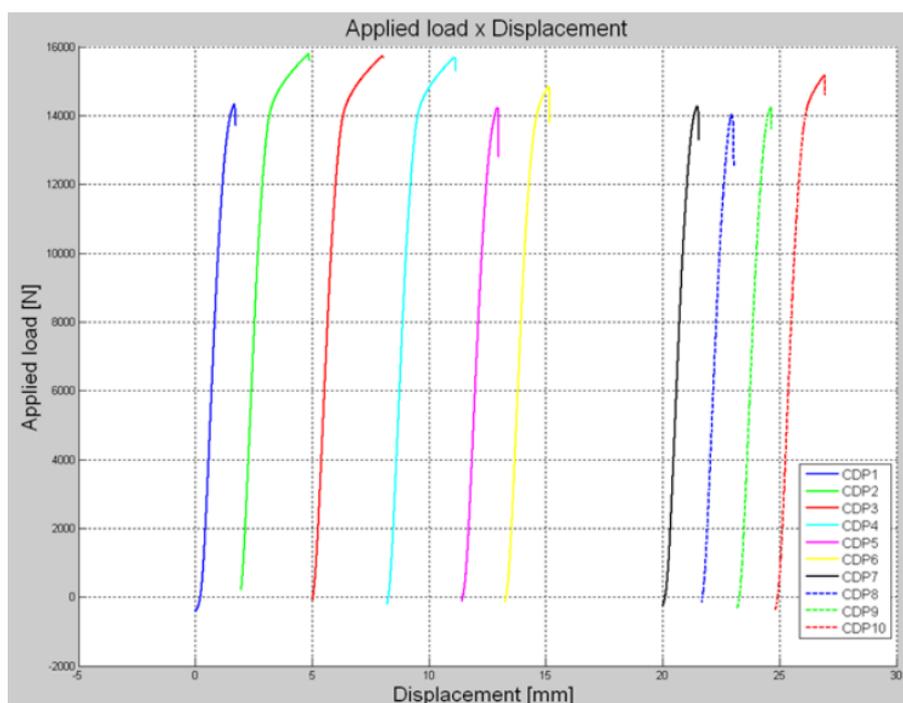
Força máxima nos ensaios de cisalhamento					
Pares T2L8	Força (N)	Pares T2L4	Força (N)	Pares T2PO	Força (N)
1	52	1	446	1	789
2	130	2	814	2	36
3	596	3	845	3	768
4	545	4	235	4	1139
5	49	5	254	5	1199
6	27	6	223	6	999
7	rompeu	7	rompeu	7	558
Média	233.17	Média	469.50	Média	784
Desvio Padrão	264.11	Desvio Padrão	290.66	Desvio Padrão	399.03

**Fonte: Autoria própria**

Como é possível perceber, houve uma grande discrepância entre os resultados obtidos, como ocorreu nas amostras do Tipo 1. Além das razões já discutidas nos resultados do ensaio de tração, há também o fator preparação superficial das amostras que neste caso foi feita de maneira manual e causou diferenças de planicidade entre amostras e até em uma mesma amostra, como visto no processo de aplicação rugosidade final no item 4.1. Estas diferenças

não eram percebidas a olho nu e foram só identificadas nas etapas posteriores, no processo de granulometria final e colagem. Assim, mesmo com um peso uniforme na aplicação de pressão para cura, o molhamento aconteceu de forma diferente dependendo do paralelismo dos conjuntos de amostras.

A Figura 32 mostra curvas Força x Deslocamento geradas pelo adesivo AF163-2K.045WT utilizado na junção de estrutura aeronautica. Embora os valores suportados sejam maiores que os de PU derivada do óleo de mamona, pode-se comparar o formato das curvas obtidas nos ensaios, Figura 31b, que mostram que o comportamento do adesivo ao ensaio ocorreu de forma correta.



**Figura 32 – Curvas Força x Deslocamento dos corpos de prova dos dois adesivos**

**Fonte: GOTTSCHALK *et al.*, 2013**

De maneira análoga aos resultados encontrados nos ensaios de tração, na Figura 33, houve um aumento da força conforme a rugosidade diminuía, sendo estes resultados contrários aos esperados pela teoria estudada e suas possíveis razões já vistas no item anterior.

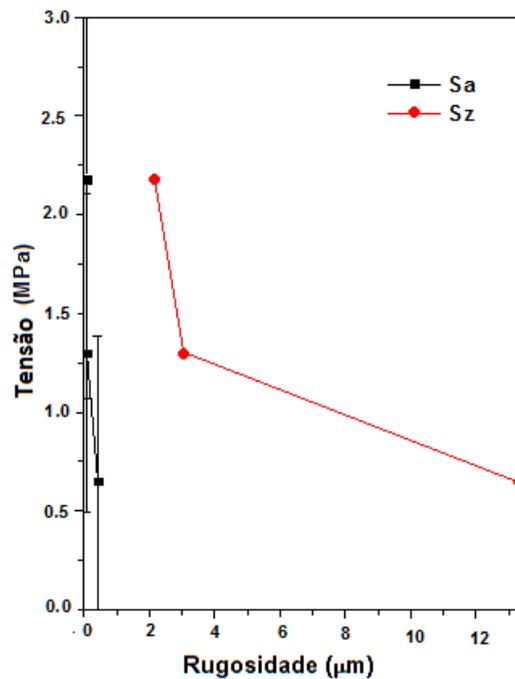


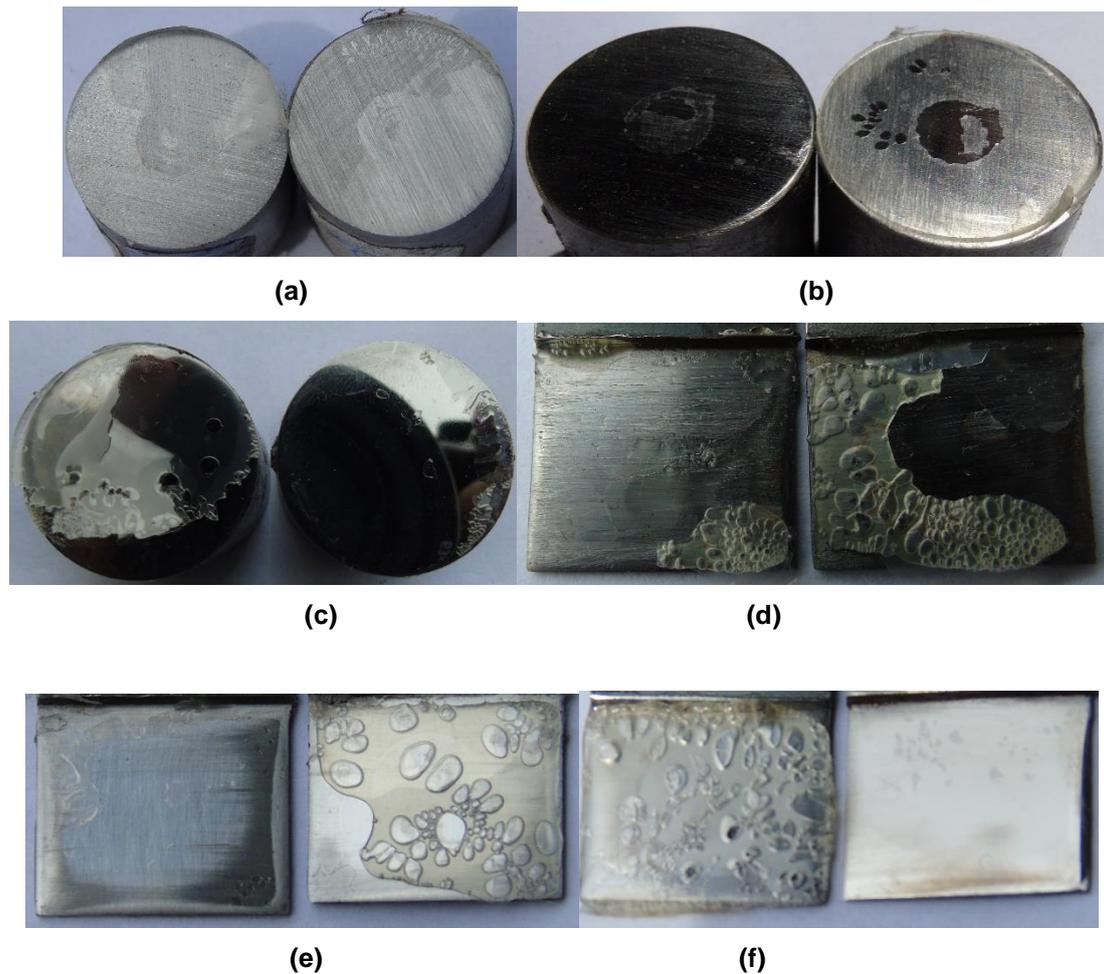
Figura 33 – Curva Rugosidade x Tensão Máxima para cisalhamento

Fonte: Autoria própria

#### 4.4. ANÁLISE SUPERFICIAL

Para entender melhor como ocorreu a falha no momento de ruptura ao ser realizado o ensaio, é importante analisar a superfície de pares para todas as condições. Para isso foram tiradas fotos para uma análise a olho nu e micrografias a partir do MEV para uma análise microscópica.

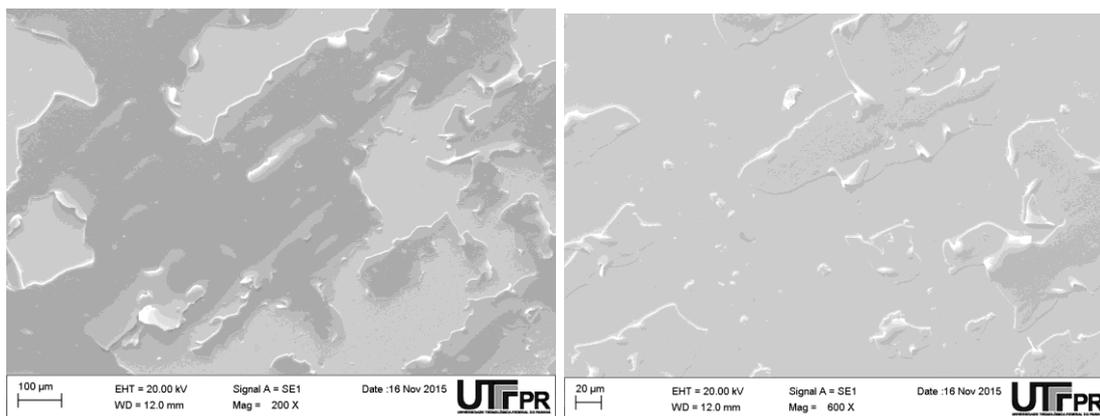
Na figura abaixo é possível observar pares dos corpos de prova após fratura para as diferentes condições de acabamento e geometria.



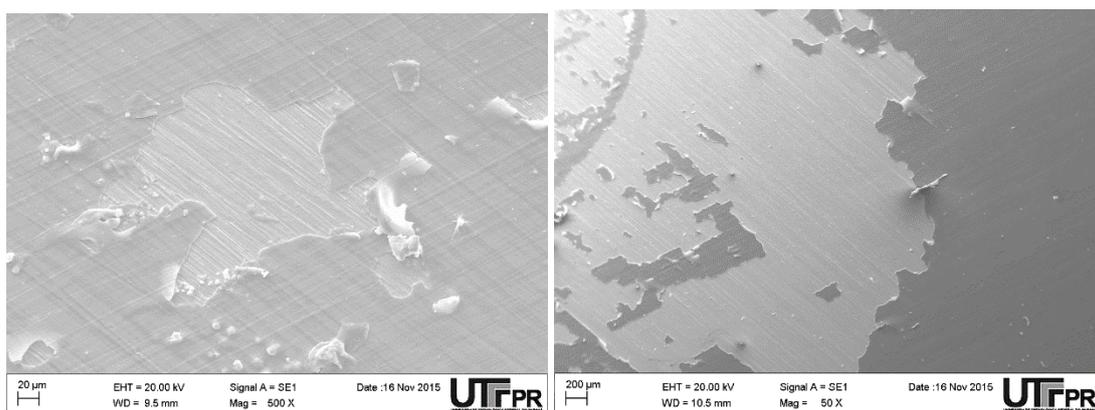
**Figura 34 – Superfícies rompidas (a) T1L8 (b) T1L4 (c)T1PO (d)T2L8 (e)T2L4 (f)T2PO**

**Fonte: Autoria própria**

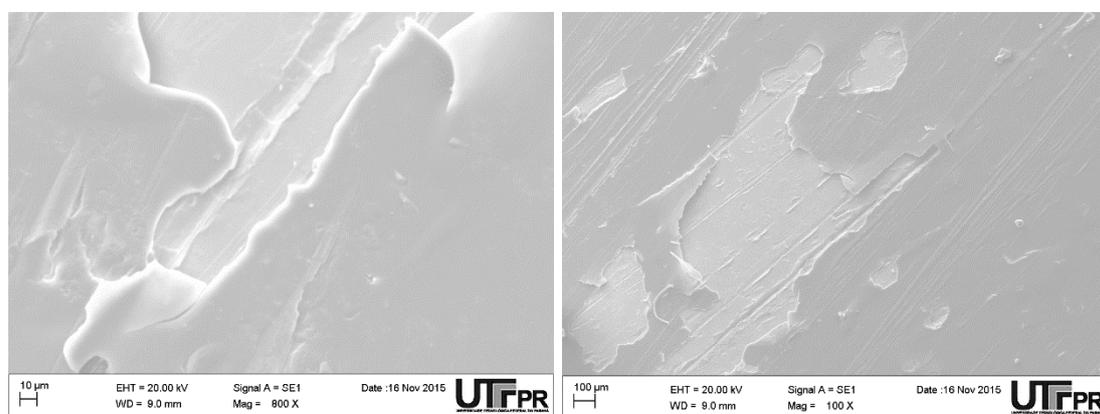
Em todos os pares de amostra é bem nítido que os resquícios de adesivos nas amostras ficaram divididos, pode-se então afirmar que todas as falhas tiveram uma característica predominantemente adesiva. Como já explicado na seção 2.1, existem as forças adesivas, que mantem a união entre adesivo e aderente e as forças coesivas, que mantém a integridade do próprio adesivo. O que leva a conclusão que o esforço de rompimento atuou em sua grande maioria na quebra das forças adesivas, pode-se atribuir a fraca intensidade dessas forças ao molhamento não efetivo, as bolhas residuais que fazem com que a área de contato diminua ou a própria compatibilidade do adesivo em questão com o material analisado. A predominância de bolhas pode ser observada mais nitidamente nas amostras do tipo 2.



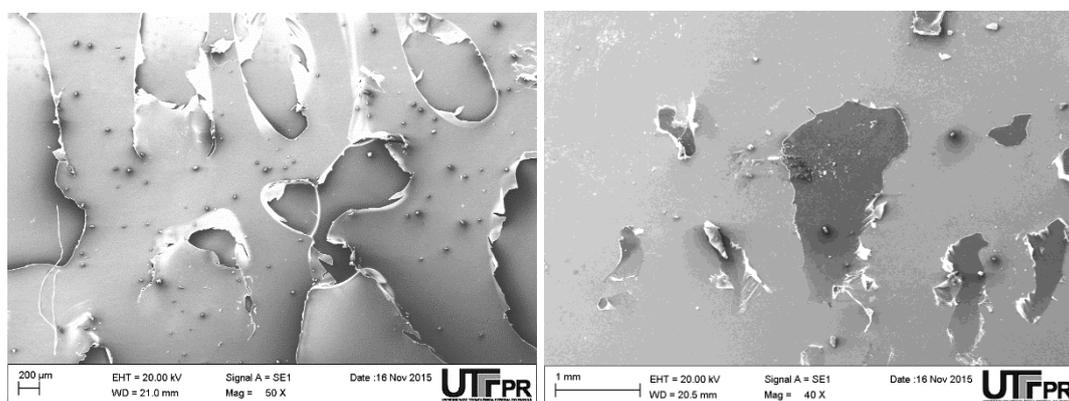
(a)



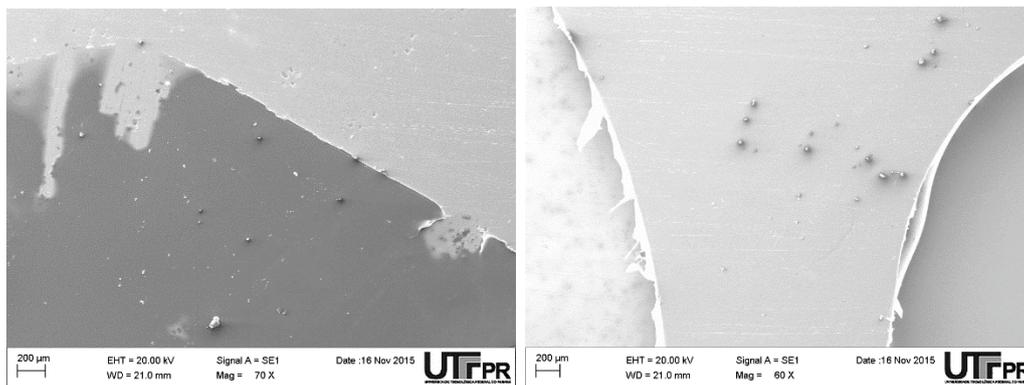
(b)



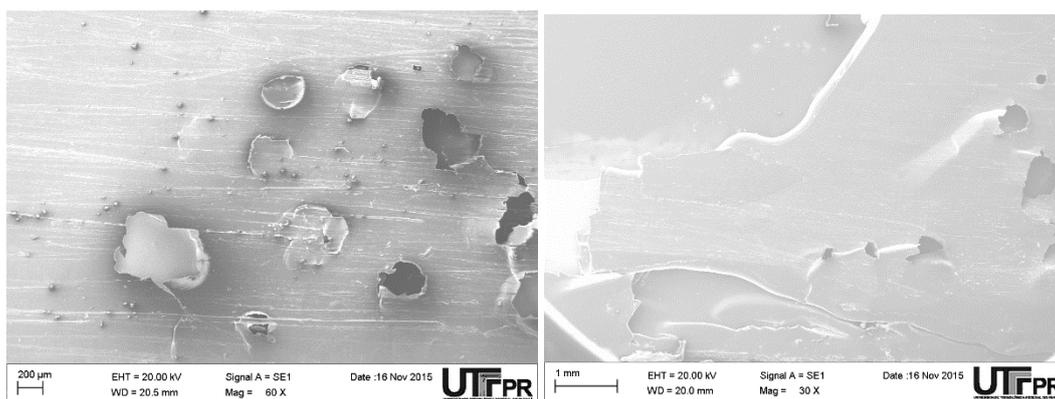
(c)



(d)



(e)



(f)

**Figura 35 – MEV dos pares de amostras (a) T1L8 (b) T1L4 (c) T1PO (d) T2L8 (e) T2L4 (f) T2PO**

**Fonte: Autoria própria**

Com as micrografias obtidas através do MEV, é possível observar que as amostras com granulometria 800 apresentam uma maior adesão a superfície em termos visuais, enquanto as amostras com acabamento em granulometria 80 e polida se encontram com uma maior porção do adesivo despreendido da superfície, mostrando que há uma possibilidade das forças que mantinham a união adesivo/ aderente unidas menores. Isto também reitera o que pode ser visto por exemplo na amostra T1PO da Figura 34 onde a evidência do despreendimento de uma grande fração do adesivo após o rompimento pode ser facilmente identificada a olho nu.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados em ambos os tipos de amostras (tração e cisalhamento) mostraram que a força suportada foi inversamente proporcional à rugosidade superficial, ou seja, diminuindo a rugosidade aumentou-se a força.

Além disso, analisando as superfícies após o rompimento foi possível notar que a maior proporção de falha foi de natureza adesiva, o que mostrou que a ligação entre adesivo e aderente era mais fraca que a coesiva do adesivo em questão.

A análise microscópica mostrou que os corpos de prova com a granulometria 800 mantiveram maior área ainda em contato com o adesivo após o rompimento, o que pode indicar que em outras circunstâncias estes corpos de prova aguentaria uma carga maior e ocorreria maior porção de falha coesiva que adesiva.

É possível ver também que a granulometria 80 foi grosseira demais e não permitiu a boa penetração do adesivo nos sulcos gerados, logo se pode concluir que o adesivo em questão teve uma boa adesividade na granulometria 800 e polida.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho pode derivar-se em outros, como:

- Estudar o comportamento mecânico do adesivo em outros tipos de superfícies metálicas.
- Estudar o comportamento mecânico do adesivo com a união de peças com rugosidades distintas
- Estudar o comportamento mecânico do adesivo com outras técnicas de obtenção de rugosidade
- Estudar o comportamento mecânico do adesivo em substratos que sofreram tratamentos térmicos

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MEASURING. **Annual Book of ASTM Standards**, ASTM International, New York, 2014.

AZEVEDO, E. C. ; CLARO NETO, Salvador ; CHIERICE, Gilberto Orivaldo ; LEPIENSKI, C. M. **Aplicação de indentaçãoinstrumetnada na caracterizaçãomecânica de poliuretananaderivada de óleo de mamona**. Polímeros (São Carlos. Impresso), v. 19, p. 336-343, 2009.

BERENSON, Mark L.; STEPHAN, David; LEVINE, David M.; KREHBIEL, Timothy C. **Estatística: teoria e aplicaçõesusando Microsoft Excel em português**. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2012. xxv,804 p.

BENNETT, Jean M.; MATTSSON, Lars. **Introduction to Surface Roughness and Scattering**,Pg 3, OSA, Washington. DC, 1993

BRAUNECKER, Bernhard. **Advanced Optics Using Aspherical Elements**, Pg 62, SPIE , Bellingham, WA, 2008

CALLISTER JR, William D. **Ciência e engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Livros Técnicos e Científicos, 2008.

CANEVAROLO, S. V. (Org.). **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. 1. ed. São Paulo: ARTLIBER, 2004. v. 1.

CAPELLO, Christian; FISCHER, Ulrich; HUNGERBÜHLER, Konrad. **What is a green solvent? A comprehensive framework for the environmental assessment of solvents**. **Green Chemistry**, v. 9, n. 9, p. 927-934, 2007.

CEQUIL. **CEQUIL – Central de Ind. E Des. De Polímeros Ltda**. 2006.[http://www.construquil.com.br/arquivos/pdf/ficha\\_tecnica\\_polibond.pdf](http://www.construquil.com.br/arquivos/pdf/ficha_tecnica_polibond.pdf)

CUNHA, A. V. M. M. ; Azevedo, Elaine Cristina ; Nascimento. E. M. ; CLARO NETO, Salvador . **Estudo da influencia da rugosidade de alumínio na adesão em ensaio de cisalhamento.**2013.

DE ENGENHARIA QUÍMICA, Programa. Uma revisão sobre os processos de polimerização em suspensão. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 17, n. 2, p. 166-179, 2007.

FACCIO, Ian. **Investigações sobre o acabamento superficial de usinagens com altíssima velocidade de corte.** 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3132/tde-23072003-135507/>>. Acesso em: 2015-07-14.

FLINN, Richard A.; TROJAN, Paul K. Engineering materials and their applications. **Engineering Materials and Their Applications, 4th Edition, by Richard A. Flinn, Paul K. Trojan, pp. 1056. ISBN 0-471-12508-3. Wiley-VCH, December 1994.**, v. 1, 1994.

FONSECA, E. C. **Ensaio de cisalhamento direto com sucção controlada em solos não saturados.**Rio de Janeiro/RJ, 1991.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip. **Introdução à mecânica dos fluidos.** Livros Técnicos e Científicos, 2006.

GOTTSCHALK, Ricardo M.; SOLLERO, Paulo. **INTEGRIDADE DE JUNTAS COLADAS EM ESTRUTURAS AERONÁUTICAS.** XIX Congresso Interno De Iniciação Científica. Campinas/SP, 2011.

HENKEL Ltd. - **Nanoceramic technology bonderite NT1: Global Launch Manual.** Alemanha, jun, 2006.

HORVATH, S.M.; MCKEE, D.J. **Tropospheric Ozone: Human Health and Agricultural Impacts**, *CRC Press/Lewis Publishers*, Boca Raton, FL, Chapter 3, 1994.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER et al. Some organic solvents, resin monomers and related compounds, pigments and occupational exposures in paint manufacture and painting. **IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans**, v. 47, 1990.

KEYSER, Carl A. **Ciencias de materiales para ingenieria**. Limusa. Mexico. MX, 1972.

KINLOCH, A. J. The science of adhesion. **Journal of materials science**, v. 15, n. 9, p. 2141-2166, 1980.

KULA, Daniel; TERNAUX, Élodie. **Materiologia: o guia criativo de materiais e tecnologias**. São Paulo, SP: Senac, 2012. 344 p

LIPPMAN, M., **Environ. Sci. & Technol.**, 25(12), 1954, (1991).

**Loctite Handbook** - Second Edition - Loctite, 1995. 451p

LUCIC, M.; STOIUC, A. & KOPAC, J. - **Investigation of aluminum single lap adhesively bonded joints** - *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, v. 15, 79-87. Polônia, 2006.

MANO, Eloisa B. **Introdução a polímeros**, v. 2. Editora Blucher, 1999.

MATSMOTO, Renata. **Câncer de mama e exposição ocupacional e ambiental a solventes**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Faculdade de Saúde Pública. Departamento de Saúde Ambiental.

MICHIGAN METROLOGY. **Michigan Metrology Surface  
Texture Parameters Glossary.30 de 07 de**

2010.[http://www.michmet.com/3d\\_s\\_height\\_parameters.htm](http://www.michmet.com/3d_s_height_parameters.htm)(acesso em 15 de 11 de 2015).

MICROTOP. **3D Optical Profiler Talysurf CCI MP**. 26 de 10 de 2012. <http://www.microtop.ro/en/product/3d-optical-profiler-talysurf-cci-mp.html> (acessado em 15 de 11 de 2015)

OLYMPUS. **Roughness (3D) parameter**. 30 de 05 de 2013.[http://www.olympusims.com/en/knowledge/metrology/roughness/3d\\_parameter/](http://www.olympusims.com/en/knowledge/metrology/roughness/3d_parameter/)(acesso em 15 de 11 de 2015).

OTA (U.S. Congress, Office of Technology Assessment). **Catching Our Breath: Next Steps for Reducing Urban Ozone**, OTA-O-412, *U.S. Government Printing Office*, Washington, DC. July, 1989.

PETRIE, Edward, **Handbook of Adhesives and Sealants**, McGraw-Hill Professional; 2 edition (December 12, 2006).

PETROVIC, Z.S.; GUO, Andrew; FULLER Rachel; JAVNI, Ivan. **Thermosetting resins from vegetable oils**. In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE, 57., 1999, New York. Proceedings... 1 CD-ROM.

PIZZI, Antonio; MITTAL, Kashmiri L.; **Handbook of Adhesive Technology**. CRC Press, 2003.

PLEPIS, A. M. G. **Caracterização térmica e viscoelástica de resinas poliuretanas derivadas de óleo de mamona**. TesedeDoutorado, São Carlos-SP: USP-IQSC, 1991.

POCIUS, Alphonsus V. **Adhesion and adhesives technology: an introduction**. Carl HanserVerlagGmbHCo KG, 2012.

RODRIGUES, Jucélia Maria Emerenciano. **Preparação de poliuretana à base de óleo de mamona**. 2005.

SHIELDS, John. **Adhesiveshandbook**. Elsevier, 2013.

SILVA, Andre Luiz da Costa E.; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. Edgard Blücher, 2008.

SILVA, Bianca Bairros Rabello da. **Desenvolvimento de adesivos de poliuretano a base de óleo de mamona**. 2006.

TRIOLA, Mario F. **Introdução à estatística: atualização da tecnologia**. 11. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2013. xxviii, 707 p

VASCO, Marina Cardozo. **Avaliação da adesividade de poliuretana derivada de óleo de mamona em superfície metálica por indentação instrumentada**. 2012.

VIECILI, Cristiano. **Determinação dos parâmetros de resistência do solo de Ijuí a partir do ensaio de cisalhamento direto**. Projeto de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil–UNIJÚÍ–Ijuí, 2003.

VILAR, Walter Dias. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. Vilar consultoria, 1998.

VILLENAVE, Jean-Jacques. **Assemblage par collage**. Paris:Dunod, 2005.

WIRPSZA, ZYGMUNT. **Polyurethanes: chemistry, tecnologia, and applications**.Ellis Horwood, 1993.

WLADIKA, Walmir Eros. **Especificação e aplicação de materiais**. Curitiba: Base, 2010. 368 p

WYPYCH, George (Ed.). **Handbook of solvents**. ChemTec Publishing, 2001.

















































## ANEXO A

### DISTRIBUIÇÃO T DE STUDENT

**Tabela 9 – Valores críticos de t.**

Graus de liberdade	Probabilidade acumulada					
	0.75	0.90	0.95	0.975	0.99	0.995
1	1.0000	3.0778	6.3138	12.7062	31.8207	63.6574
2	0.8165	1.8856	2.9200	4.3027	6.9646	9.9248
3	0.7649	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8409
4	0.7407	1.5332	2.1318	2.7764	3.7469	4.6041
5	0.7267	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0322
6	0.7176	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.7111	1.4149	1.8946	2.3646	2.9980	3.4995
8	0.7064	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554
9	0.7027	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.6998	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	2.1693
11	0.6974	1.3634	1.7959	2.2010	2.7181	3.1058
12	0.6955	1.3562	1.7823	2.1788	2.5810	3.0545
13	0.6938	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123
14	0.6924	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768
15	0.6912	1.3406	1.7531	2.1315	2.6025	2.9467

Fonte: Adaptado de David M. Levine *et al.* (2012)