

**Estudo da adesão entre polímeros elastoméricos e substratos  
rígidos em ensaios de cisalhamento.**

**Paulo Henrique Zamarchi**

Relatório da Dissertação Final apresentada à

**Escola Superior de Tecnologia e Gestão**

**Instituto Politécnico de Bragança**

Para a obtenção do grau de Mestre em

**Engenharia Industrial - Engenharia Mecânica**

Este Trabalho foi efetuado sob orientação de:

**Doutor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro**

**Doutor Bruno Bellini Medeiros**





# **Estudo da adesão entre polímeros elastoméricos e substratos rígidos em ensaios de cisalhamento**

**Paulo Henrique Zamarchi**

Dissertação Apresentada à  
**Escola Superior de Tecnologia e Gestão**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

Para a Obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Industrial**

No Âmbito da Dupla Diplomação Com a  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**

Orientadores

Prof. Dr. João Eduardo Ribeiro

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros

**Outubro 2019**

## Agradecimentos

Primeiramente agradeço a minha família, meu pai Clair José Zamarchi, minha mãe Clarice Stasiak e a minha irmã Gabriella Stasiak Zamarchi por sempre me proporcionar todo tipo de apoio, pelo exemplo de vida e por sempre me acompanharem, sem eles nada seria possível.

Meu sincero agradecimento ao professor doutor João Ribeiro e ao professor doutor Bruno Medeiros pela excelente orientação, pelo incentivo e ajuda que recebi na realização deste trabalho.

Quero agradecer o pessoal do laboratório que me ajudaram no trabalho, ao Jorge Paulo com a ajuda para fazer o molde, o Andrews Souza pela ajuda na manipulação do PDMS e a Luisa Barreira pela ajuda na realização dos ensaios de cisalhamento com a máquina de tração, que facilitaram muito a realização do trabalho.

Quero agradecer todos meus amigos, tanto os do Brasil quanto os que fiz aqui em Portugal, que sempre me apoiaram e incentivaram nos momentos difíceis.

Por fim quero agradecer a UTFPR – Pato branco e ao IPB pela oportunidade de intercâmbio para poder realizar este trabalho da dissertação do mestrado.

## Resumo

O polidimetilsiloxano, ou PDMS, é um material que vem, cada vez mais, sendo estudado devido às suas propriedades mecânicas interessantes, por ser um material polimérico hiperelástico capaz de alcançar grandes deformações, um bom isolante térmico e elétrico, muito leve e opticamente transparente, superfície hidrofóbica e biocompatível. Devido a essas características é muito utilizado em próteses na área biomédica, e na mecânica é utilizado como isolante térmico e elétrico, em juntas de vedação e sensores táteis. Por ter uma superfície hidrofóbica e antiadesiva é interessante o estudo da junção do PDMS com outros materiais. Muitos avanços vêm sendo incorporados acerca do PDMS, porém, são necessários estudos de propriedades de adesão do PDMS a outras superfícies. Para avaliação das propriedades do PDMS foram utilizadas técnicas numéricas e experimentais. Na parte experimental foi realizado um ensaio de cisalhamento em blocos de PDMS em juntas de sobreposição simples para espessura de 2 e 4mm, variando o tipo de adesivo utilizado e a velocidade de ensaio. Para avaliação numérica foram realizadas análises estatísticas e ensaios utilizando a técnica de correlação digital de imagem para obter dados desde o início até o final do ensaio. Verificou-se que a espessura do PDMS influencia na tensão máxima de cisalhamento, sendo que a região central do corpo de prova recebe a maior tensão. A velocidade também influencia na força máxima antes da rotura, e adesivo de cianoacrilato é mais eficiente do que uma cola epóxi. Com esse estudo foi possível observar que a correlação digital de imagem é uma técnica relativamente simples e eficiente no estudo do campo de deslocamentos e deformações de superfícies.

Palavras-chave: PDMS, Polidimetilsiloxano, Cianoacrilato, Epoxi, Cisalhamento simples, Sobreposição simples.

## Abstract

Polydimethylsiloxane, or PDMS, is a material that is increasingly being studied due to its interesting mechanical characteristics, being a hyperelastic polymeric material capable of achieving large deformations, a good thermal and electrical insulator, having low density and being optically transparent, with hydrophobic and biocompatible surface. Due to those characteristics is widely used in the biomedical and mechanical area, being used as thermal and electrical insulator, in sealing joints and tactile sensors. Because it has a hydrophobic and anti-adhesive surface it is interesting to study the combination of PDMS with other materials. Many advances have been incorporated into PDMS, however, studies of adhesion properties of PDMS to other surfaces is necessary. To evaluate PDMS properties, numerical techniques and experiments were used. In the experimental part a PDMS block shear test was performed in simple overlapping joints for 2 and 4mm thickness, varying the type of adhesive used and the test speed. For numerical evaluation, analyzes and tests were performed using a digital image correlation technique to obtain data from the beginning to the end of the test. It was found that the thickness of the PDMS influences the maximum shear stress, and the central region of the specimen receives the highest stress. Speed also influences the maximum force before rupture, and the cyanoacrylate adhesive is more efficient than an epoxy glue. The study showed that digital image correlation is a relatively simple and efficient technique in the study of the field of displacements and surface deformations.

Key-words: PDMS, Polymethylsiloxane, Shear Test, Cyanoacrylate, Epoxy, Simple overlay.

# Sumário

<b>1. Introdução</b> .....	1
<b>1.1 Motivação</b> .....	2
<b>1.2 Objetivos</b> .....	2
<b>1.3 Metodologia de Investigação</b> .....	2
<b>1.5 Estrutura do relatório</b> .....	3
<b>2. Revisão Bibliográfica</b> .....	5
<b>2.1 Polímeros</b> .....	5
<b>2.2 Polidimetilsiloxano (PDMS)</b> .....	7
<b>2.2.1 Propriedades dos PDMS</b> .....	8
<b>2.2.2 Superfície do PDMS</b> .....	11
<b>2.2.3 Aplicações do PDMS</b> .....	11
<b>2.2.4 PDMS na Medicina</b> .....	12
<b>2.2.5 Processamento do PDMS</b> .....	13
<b>2.3 Resistência dos materiais</b> .....	13
<b>2.4 Caracterização de materiais elásticos</b> .....	14
<b>2.5 Cisalhamento simples</b> .....	16
<b>2.6 Modelo constitutivo da elasticidade da borracha</b> .....	18
<b>2.7 Correlação digital de imagem (CDI)</b> .....	21
<b>2.8 Método de Taguchi</b> .....	23
<b>2.8.1 Taguchi e razão sinal-ruído</b> .....	24
<b>2.9 Análise de Variância (ANOVA)</b> .....	25
<b>3. Materiais e métodos</b> .....	26
<b>3.1 Fabricação do Molde</b> .....	27
<b>3.2 Processamento do PDMS</b> .....	30
<b>3.3 Preparação de chapas para ensaio de cisalhamento</b> .....	32
<b>3.4 Preparação da junta de sobreposição simples</b> .....	32
<b>3.5 Preparação do corpo de prova para Correlação Digital de Imagem</b> .....	34
<b>4. Ensaio de Cisalhamento</b> .....	35
<b>4.1 Objetivos</b> .....	35
<b>4.2 Equipamentos e materiais</b> .....	35
<b>4.3 Metodologia experimental</b> .....	36
<b>4.4 Análise estatística dos resultados</b> .....	37
<b>5. Resultados e Discussões</b> .....	38
<b>5.1 Ensaio de cisalhamento simples</b> .....	38

<b>5.2 Método de Taguchi</b> .....	48
<b>5.2.1 Combinação ótima para a força máxima</b> .....	49
<b>5.2.2 Combinação ótima para o deslocamento máximo</b> .....	51
<b>5.3 Análise ANOVA</b> .....	54
<b>5.4 Correlação Digital de Imagem</b> .....	55
<b>6. Conclusões</b> .....	62
<b>6.1 Trabalhos Futuros</b> .....	63
<b>Referências</b> .....	64

# Índice de Figuras

Figura 1 - Comportamento tensão-deformação para diferentes polímeros (Callister, 2002). .....	6
Figura 2 - estrutura do polidimetilsiloxano, combina grupos orgânicos e inorgânicos (Kuncova-kallio & Kallio, 2006). .....	8
Figura 3 - Junta de sobreposição simples (Nunes, 2011). .....	14
Figura 4 - Lei de Hooke (Silva, 2012). .....	15
Figura 5 - Esquema de cisalhamento simples (Moreira & Nunes, 2013) .....	16
Figura 6 - Tensão de cisalhamento para casos de uniões por colagem, aparafusada simples e aparafusada dupla (Souza, 2017). .....	17
Figura 7 - Esquema de deformação no cisalhamento simples (Nunes, 2011). .....	18
Figura 8 - Variação do estado inicial (referência) para o estado final (deformada) (Ribeiro et al., 2012) .....	22
Figura 9 - Corpo de prova preparado para ensaio de cisalhamento .....	26
Figura 10 - Desenho do molde .....	27
Figura 11 - Bloco de alumínio .....	27
Figura 12 - bloco de alumínio preparado para fresa .....	28
Figura 13 - Interface Mastercam .....	28
Figura 14 - Resultado da simulação Mastercam .....	29
Figura 15 - Zero peça .....	29
Figura 16 - Molde Finalizado .....	30
Figura 17 - Exsicador .....	31
Figura 18 - Corpos de Prova de PDMS .....	31
Figura 19 - Placas de aço lixadas .....	32
Figura 20 - Corpo de prova .....	33
Figura 21 - Corpo de prova para correlação digital de imagem .....	34
Figura 22 - Ensaio de Cisalhamento .....	36
Figura 23 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 1 .....	38
Figura 24 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 2 .....	39
Figura 25 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 3 .....	40
Figura 26 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 4 .....	41
Figura 27 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 5 .....	42
Figura 28 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 6 .....	42
Figura 29 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 7 .....	43
Figura 30 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 8 .....	44
Figura 31 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 9 .....	45
Figura 32 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 10 .....	45
Figura 33 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 11 .....	46
Figura 34 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 12 .....	47
Figura 35 - Média dos Valores S/N dos parâmetros utilizados para força .....	50
Figura 36 - Média dos Valores S/N dos parâmetros utilizados para força - Cola 1 .....	51
Figura 37 - Média dos Valores S/N dos parâmetros utilizados para Deslocamento .....	52
Figura 38 - Média dos Valores S/N dos parâmetros utilizados para Deslocamento - Cola 1 .....	53
Figura 39 - Força x Deslocamento ensaio para CDI - 2mm .....	56
Figura 40 - CDI - Epsilon (Y) para PDMS com 2mm de espessura .....	57
Figura 41 - CDI - Tensão equivalente de Von Mises para PDMS com 2mm de espessura .....	57

Figura 42 - CDI - Deslocamento do PDMS com 2mm de espessura.....	58
Figura 43 - Força x Deslocamento ensaio para CDI - 4mm.....	59
Figura 44 CDI - Epsilon ( $\gamma$ ) para PDMS com 4mm de espessura .....	60
Figura 45 - CDI - Tensão equivalente de Von Mises para PDMS com 4mm de espessura.....	60
Figura 46 - CDI - Deslocamento do PDMS com 4mm de espessura.....	61

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades do PDMS (Mendonça, 2013).....	10
Tabela 2 - Ensaios de Cisalhamento .....	33
Tabela 3 - Dados obtidos no ensaio 1.....	38
Tabela 4 - Dados obtidos no ensaio 2.....	39
Tabela 5 - Dados obtidos no ensaio 3.....	40
Tabela 6 - Dados obtidos no ensaio 4.....	41
Tabela 7 - Dados obtidos no ensaio 5.....	42
Tabela 8 - Dados obtidos no ensaio 6.....	43
Tabela 9 - Dados obtidos no ensaio 7.....	43
Tabela 10 - Dados obtidos no ensaio 8.....	44
Tabela 11 - Dados obtidos no ensaio 9.....	45
Tabela 12 - Dados obtidos no ensaio 10.....	46
Tabela 13 - Dados obtidos no ensaio 11.....	46
Tabela 14 - Dados obtidos no ensaio 12.....	47
Tabela 15 - Resultados dos ensaios.....	48
Tabela 16 - Valores da razão Sinal-Ruído para a Força .....	49
Tabela 17 - Designação dos Parâmetros.....	50
Tabela 18 - Valores da razão Sinal-Ruído para o Deslocamento.....	52
Tabela 19 - ANOVA - Força.....	54
Tabela 20 - ANOVA - Força - Cola 1.....	54
Tabela 21 - ANOVA - Deslocamento .....	55
Tabela 22 - ANOVA - Deslocamento - Cola 1 .....	55

## Acrónimos

ANOVA – Análise de variância

CAM – *computer aided – manufacturing*

CDI – correlação digital de imagem

CNC – *computer numerical control*

ESTIG – Escola superior de tecnologia e gestão

MEMS – *Micro Electromechanical Systems*

PDMS – polidimetilsiloxano

PVC – *Polyvinyl chloride*

## Índice de símbolos

$A_0$  – Seção transversal inicial

$A_c$  – Área cortante

$B$  – Tensor de deformação Cauchy-Green a esquerda

$E$  – Módulo de elasticidade

$F$  – Força de tração

$F_c$  – Força cortante

$I_1, I_2$  e  $I_3$  – Invariantes principais de deformação

$L$  – Comprimento

$L_0$  – Comprimento inicial

$n$  – Número de observações

$S$  – Segundo tensor de deformação de Piola-Kirchhoff

$S_y^2$  – Variância de  $y$

$u$  – componente central de deslocamento na direção  $x$

$v$  – componente central de deslocamento na direção  $y$

$W$  – Energia de tensão

$\bar{y}$  – Média dos dados

$y_i$  – Dados observados

$\varepsilon$  – Deformação

$\sigma$  – Tensão normal

$\tau$  – Tensão de cisalhamento

$\gamma$  – Quantidade de cisalhamento

$\mu$  – módulo de cisalhamento

$\nabla x$  – Deformação tensor quantidade

# 1. Introdução

A evolução da humanidade está ligada aos materiais que foram sendo utilizados ao longo da história, cada vez mais os materiais estão sendo estudados para encontrar a melhor maneira de sua utilização.

Nos tempos atuais os elastômeros tem ganhado bastante visibilidade por suas características muito interessantes como a elasticidade e resistência a corrosão. O polidimetilsiloxano (PDMS), tem se destacado entre os elastômeros por sua biocompatibilidade, facilidades no processo de fabricação e baixo custo. Devido a essas características ele vem sendo muito estudado.

O PDMS é um polímero que pertence ao grupo de silicones e também se adequam ao grupo de siloxanos. É um material excelente para isolante elétrico, opticamente transparente, termicamente estável, tem um baixo custo e é muito leve.

As aplicações do PDMS são amplas, é utilizado em juntas de vedação, agentes de retirada de molde, impermeabilização, produtos biomédicos, utilizado em sensores táteis e até mesmo na fabricação de próteses como implantes mamários e implantes faciais.

Por ter uma superfície hidrofóbica e de propriedades antiadesivas, se torna necessário encontrar formas da junção heterogênea do PDMS com outros materiais.

O trabalho tem como objetivo o estudo do PDMS em ensaios de cisalhamento, estudo da adesão entre o polidimetilsiloxano e placas de aço, e avaliação da deformação durante o ensaio de cisalhamento através da correlação digital de imagem, para entender o comportamento do material e definir os melhores parâmetros de utilização.

## **1.1 Motivação**

A escolha desse tema se deu pela crescente utilização do PDMS, a necessidade de desenvolvimento de novos materiais e o estudo de suas aplicações é muito importante pela crescente demanda na indústria. O estudo se deu pela busca de caracterizar o material de maneira a justificar seu uso na tecnologia mecânica e em suas outras aplicações.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo principal deste estudo é caracterizar o PDMS através da obtenção de dados por ensaios de cisalhamento simples. Com a finalidade de observar seu comportamento hiperelástico e estudar a aderência da superfície do PDMS com placas de aço da junta de simples sobreposição. Pretende-se, também, efetuar uma análise do campo de deformações de cisalhamento nos corpos de prova analisados, para o efeito, recorreu-se à técnica ótica de correlação digital de imagem.

## **1.3 Metodologia de Investigação**

Para o estudo, primeiramente foi realizada uma revisão bibliográfica, a fim de obter as informações necessárias para a realização do estudo do cisalhamento do polidimetilsiloxano em juntas de sobreposição simples. As atividades experimentais foram realizadas nos laboratórios de Tecnologia Mecânica, de Mecânica dos Fluidos e Hidráulicas e de Estruturas e Resistência de Materiais, todos localizados na Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTIG), na cidade de Bragança, Portugal.

Para obter os resultados, inicialmente foram realizados o desenho e a fabricação do molde para recepção do PDMS líquido, com a geometria necessária para a realização do ensaio. Após a obtenção do PDMS solidificado foi possível preparar as juntas de sobreposição simples, feitas a partir da

colagem do PDMS em duas placas de aço, tendo assim os corpos de prova de PDMS com 2mm e 4mm de espessura.

Com os corpos de prova prontos, foram realizados os ensaios de cisalhamento, no total foram 12 ensaios utilizando dois adesivos diferentes e variando-se os parâmetros de espessura e velocidade de ensaio. A partir dos resultados foram escolhidas duas configurações para realização de mais dois ensaios de cisalhamento, mas dessa vez, utilizando a técnica de correlação digital de imagem. Por fim, os resultados obtidos foram tratados estatisticamente e, com isso, o estudo pode ser concluído.

## **1.5 Estrutura do relatório**

Este relatório foi dividido em 7 capítulos.

No capítulo 2 será apresentado uma revisão bibliográfica sobre os conceitos gerais de polímeros, PDMS, aplicações do PDMS, processamento do PDMS, resistência dos materiais, conceitos sobre cisalhamento simples, cálculos sobre cisalhamento em borracha, correlação digital de imagem e, por fim, uma breve introdução ao método de Taguchi.

No capítulo 3 serão demonstradas todas as etapas para realização dos ensaios experimentais. Iniciando-se com a fabricação do molde, preparação do PDMS, o corte das chapas, a colagem dos corpos de prova e a pintura dos corpos de prova para a correlação digital de imagem.

No capítulo 4 irá descrever-se a metodologia experimental do ensaio de cisalhamento simples e quais materiais foram utilizados para realização do ensaio.

No capítulo 5 serão apresentados os resultado e discussões obtidos a partir dos ensaios experimentais.

O capítulo 6 se dá pelas conclusões, contendo comentários sobre os objetivos alcançados e também sugestão para trabalhos futuros.

Por fim, serão apresentadas todas as referências utilizadas para a realização deste trabalho.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1 Polímeros

Desde os tempos remotos os polímeros têm sido utilizados pelo homem, polímeros naturais como amido, celulose, seda entre outros. A partir do século XX o químico alemão Hermann Staudinger descobriu o processo de polimerização e a síntese de polímeros deixou de ser um processo natural. Desde então, o estudo de polímeros se desenvolveu rapidamente e hoje em dia os polímeros estão presentes em muitos dos bens que nos cercam, principalmente na indústria de automóveis, embalagens, vestuário e revestimento (Staudinger, 1963).

Os polímeros vêm aparecendo cada vez mais em diversos setores devido sua alta aplicabilidade, trazendo novas perspectivas para o futuro industrial devido às oportunidades de aumento lucrativo. Produtos que antes eram produzidos com vidro e aço por exemplo, já estão sendo substituídos por diversos tipos de plástico, devido ao menor peso, menor custo, facilidade de fabricação, entre outras características positivas. Existem mais de mil tipos de plásticos com diversas aplicações indo da indústria têxtil à aeronáutica (Challa, 1993).

Os polímeros podem ter origem natural ou sintética, polímeros de origem natural são os já existentes na natureza, como a celulose, proteínas, borracha natural, amido e ácidos nucleicos. Já os sintéticos são produzidos através da polimerização de moléculas simples assim como o PVC, borracha sintética, nylon e vidro acrílico (Almeida, 2004).

A palavra polímeros vem da junção de duas palavras gregas, *poli* (muitos) e *meros* (partes). Polímeros são grandes moléculas formadas pela repetição de pequenas unidades químicas ligadas entre si através da polimerização (Smith, 1996) (Staudinger, 1963).

As propriedades dos polímeros são caracterizadas pelo seu módulo de elasticidade, limite de resistência a tração, resistência ao impacto e fadiga, assim como os metais. Gráficos de Tensão-Deformação podem representar muito bem

o comportamento dos diferentes tipos de polímeros. Na Figura 1 se observa o comportamento típico de três grupos típicos de polímeros em um gráfico tensão-deformação. A curva A representa os polímeros frágeis onde a ruptura se dá na parte elástica, a curva B representa os polímeros plásticos, onde existe uma parte elástica seguido por escoamento, deformação plástica. E por fim, a curva C que representa os polímeros elásticos e tem a característica totalmente elástica, o comportamento da borracha (Callister, 2002)(Seljan, 2016).

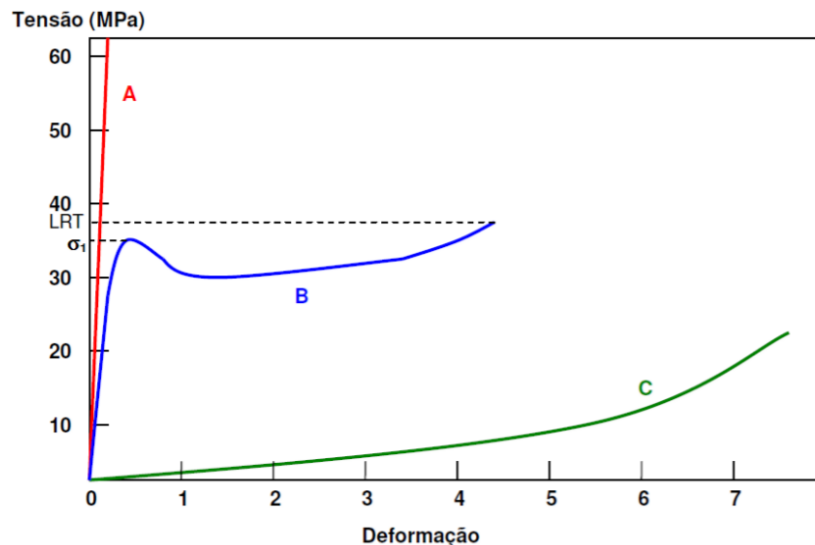


Figura 1 - Comportamento tensão-deformação para diferentes polímeros (Callister, 2002).

A divisão dos materiais poliméricos se dá entre os plásticos (termoplásticos e termoestáveis) e os elastômeros (borrachas) (Telles, 2003).

**Termoplásticos:** Chamados de plásticos, a característica principal é que podem ser fundidos várias vezes, dependendo do tipo de plástico, sendo assim podem ser reciclados, o que é muito interessante. Em relação as propriedades mecânicas elas variam de acordo com o tipo do plástico, podem ser maleáveis, rígidos ou até mesmo frágeis (Staudinger, 1963).

**Termoestáveis:** materiais rígidos, frágeis, e estáveis a variação de temperatura. Em altas temperaturas o material se decompõe antes de fundir, esse fato dificulta a reciclagem do material (Staudinger, 1963).

**Elastômeros (Borrachas):** Nesta categoria existem materiais capazes de receber grandes deformações e voltar na sua forma atual, chamado de hiperelásticos, que possuem uma relação não linear entre tensão e deformação.

Esses materiais possuem ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas e não possuem grau de cristalinidade, portanto são amorfos (Holzapfel, 2000).

Os materiais hiperelásticos são muito utilizados, e devido a isso é necessário estudar o comportamento mecânico desses materiais, os elastômeros possuem características muito interessantes (Callister, 2002). Neste trabalho será utilizado uma borracha de silicone, Polidimetilsiloxano (PDMS), este material é classificado como sendo um polímero hiperelástico, com características de grandes deformações (Timoshenko, 1951). O PDMS tem características positivas como o baixo custo, facilidade de fabricação, transparência ótica e flexibilidade (Callister, 2002).

## **2.2 Polidimetilsiloxano (PDMS)**

Inicialmente o polidimetilsiloxano (PDMS) se apresenta na forma líquida viscosa que através da adição de um agente de cura (peróxido de benzoílo) torna-se uma borracha silicone, que atinge grandes deformações e é resistente. Suas propriedades físicas e mecânicas são influenciadas pelo agente de cura. Com aplicação de certa temperatura o PDMS pode ser curado mais rapidamente (Smith, 1996).

O PDMS é pertencente ao grupo de silicones, que são compostos orgânicos de silício poliméricos, também se adequam ao grupo de siloxanos (Sousa, 2011).

Silicones foram sintetizados pelas primeiras vezes na década de 1950 e tem infiltrado todas as áreas da vida. Algumas das primeiras aplicações do polidimetilsiloxano (PDMS) foi a utilização do silicone elastômero para envolver componentes eletrônicos aumentando assim sua vida útil (Schneider *et al.*, 2008).

O PDMS tem sido bastante usado nas últimas três décadas na aplicação biomédica, pelo fato de ter uma boa compatibilidade com o sangue, baixa toxicidade, boa estabilidade térmica e oxidativa, baixo módulo de elasticidade e propriedades antiadesivas (Abbasi *et al.*, 2001).

## 2.2.1 Propriedades dos PDMS

Os silicones são elastômeros muito leves, ou seja, com baixo peso molecular, e se apresentam como um material líquido viscoso antes da cura (Telles, 2003).

Polidimetilsiloxano pertence ao grupo dos siloxanos, no seu surgimento primeiro foi chamado de silicocetones ou silicones, mas como não continha uma dupla ligação Si=O e o nome foi substituído por siloxanos ou polisiloxanos. Do grupo dos siloxanos o PDMS é o mais estudado (Kuncova-kallio & Kallio, 2006).

Os átomos do esqueleto do PDMS consistem em um grupo de siloxano inorgânico e suportam grupos laterais de metil. A estrutura mais simples repetitiva que encontramos no PDMS, seu mero mais comum, está apresentada na Figura 2. E pode ser escrita como  $[-\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}-]$  (Kuncova-kallio & Kallio, 2006).

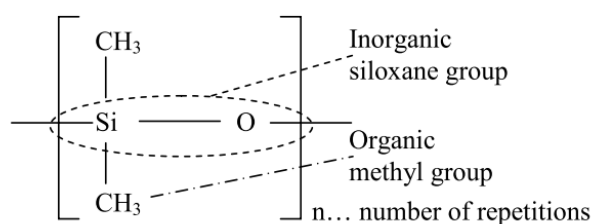


Figura 2 - estrutura do polidimetilsiloxano, combina grupos orgânicos e inorgânicos (Kuncova-kallio & Kallio, 2006).

Existem boas características microestruturais no PDMS, existem técnicas para fabricação fácil e rápida e propriedades mecânicas similares ao tecido humano (módulo elástico de aproximadamente 2MPa) (Hemmilä *et al.*, 2012). No estudo dos microfluídicos o PDMS apresenta um melhor desempenho em comparação as outras técnicas que utilizavam materiais como o vidro e o silício, sem contar com o menor custo do PDMS em relação a esses outros materiais (Zhao *et al.*, 2012). Além disso o PDMS funciona como excelente isolante elétrico (Cherney, 2005), superfície hidrofóbica e opticamente transparente (Martin & Bhushan, 2017). Boa estabilidade química e não representa um problema ambiental por se degradar rápido no ambiente em comparação com outros polímeros.

Microfluídica é um processo que avalia os fluxos de fluido em canais em escala microscópica. Teve seus primeiros passos na análise química por ensaios de cromatografia. Sistemas microfluídicos é uma solução simples para detecção de ameaças químicas e biológicas em ambientes com poucos recursos (Santos, 2013).

O PMDS possui uma faixa de temperatura de trabalho de -115 a 315°C e alongamento de 100 a 800%, grande flexibilidade a baixas temperaturas, de até -90°C e estabilidade térmica em temperaturas de até 250°C. São resistentes a intempéries e óleos lubrificantes e podem curar a temperatura ambiente (Callister, 2002).

Outras características importantes é que ele é quimicamente inerte, e resistente a decomposição pelo calor, água e óxidos, tendo uma vida útil de no mínimo 10 anos e quando incinerados não geram gases poluentes para a atmosfera (*Schneider et al.*, 2008).

Um fator importante do polidimetilsiloxano é que caso necessário é possível a realização de uma reciclagem dos resíduos poliméricos para uma posterior reutilização, a reciclagem se dá pelo processo de pirólise e pode ser efetuada também através da reciclagem mecânica ou química (*Struik & Schoen*, 2000). A pirólise é quebra das cadeias moleculares através de calor e ausência de oxigênio, na tentativa de separar as ligações e transformar as macromoléculas do PDMS em um monômero, que é a sua forma repetitiva básica, e então efetuar novamente a reação de polimerização (Marcelo, 2007).

O processo de pirólise também pode ser chamado de despolimerização, este processo faz com que o PDMS se torne um material facilmente degradável. Após esse processo de despolimerização o polidimetilsiloxano demora cerca de 21 a 28 dias para se decompor (Graiver et al., 2003).

Estas informações indicam que o PDMS apresenta algumas propriedades mecânicas favoráveis, é um material hiperelástico, porém infelizmente tem baixa resistência mecânica. Microestrutura isotrópica e homogênea é uma das características mais marcantes do PDMS. (Rev & Generally, 2008).

A variação de porcentagem de peso (wt%) do agente de cura tem um efeito significativo nas propriedades do PDMS. A proporção de agente de cura adicionado a base do PDMS recomendada pelo fabricante é a de 10:1 ou 9,09 wt%. Com concentrações de agente de cura abaixo de 9,09 wt% o material tem um módulo elástico inicial baixo, tensão limite proporcional, porém exibe um módulo elástico bem maior antes da falha, e para valores acima de 9,09 wt% a mistura pode saturar, porém as propriedades mecânicas para concentração de agente de cura de 16,67 wt% são parecidas com a concentração indicada pelo fabricante (Lee et al., 2016).

Na Tabela 1 é possível observar algumas das propriedades dos polímeros RTV 615 da fabricante Bayer Silicones e Sylgard 184 da fabricante Dow Corning, que pertencem ao grupo polidimetilsiloxano (PDMS). (Mendonça, 2013)(Schneider et al., 2008).

*Tabela 1 - Propriedades do PDMS (Mendonça, 2013)*

<b>Propriedades</b>	<b>RTV 615</b>	<b>Sylgard 184</b>
<b>Mecânicas</b>		
Dureza	44	50
Resistência a tração	65 (Kg/cm <sup>2</sup> )	980 (PSI)
Alongamento (%)	120	--
Retração (%)	0,2	--
Índice de refração	1,406	1,41
<b>Elétricas</b>		
Força dielétrica (V/mm)	19700	540
Constante Dielétrica até 100Hz	2,7	2,7
Fator de dissipação até 100Hz	0,0006	<0,0001
Volume de resistividade	1,8x10 <sup>15</sup>	2,9x10 <sup>14</sup>
<b>Térmicas</b>		
Faixa de temperatura útil (°C)	-60 até 204	-45 até 200
Condutividade térmica	0,00045 (g.cal/s.cm <sup>2</sup> (°C/cm))	0,2 (W/m K)
Coeficiente de expansão	2,7x10 <sup>-5</sup>	--
Calor específico (cal/g °C)	0,3	--

### **2.2.2 Superfície do PDMS**

Protótipos de sistemas microeletromecânicos (MEMS) para soluções biomédicas tem chamado muita atenção ultimamente devido ao seu baixo custo, alta flexibilidade e boa biocompatibilidade em comparação a outros dispositivos de vidro por exemplo. Porém, criar um dispositivo todo de polímero tem suas complicações, principalmente o componente microfluídico. Os diferentes polímeros geralmente tem diversas propriedades em termo da química da superfície e hidrofília, fazendo com que uma junção heterogênea se torne uma tarefa muito difícil pelo fato da superfície ser hidrofóbica e muito lisa. Um exemplo comum de junção é a de um polidimetilsiloxano com um outro material sólido, sendo assim se este outro material não tiver átomos de silicone se torna um processo muito difícil (Zhao *et al.*, 2012).

O uso do plasma oxigênio é uma alternativa para a junção química entre superfícies de PDMS com outros materiais, porem ocorre apenas em certos parâmetros e uma configuração específica. A oxidação da camada da superfície aumenta a concentração de grupos de hidroxila e isso faz com que formem fortes junções intermoleculares (Bhattacharya *et al.*, 2005).

A natureza hidrofóbica do PDMS tem sido uma desvantagem para sistemas microfluidicos pela difícil junção dos componentes. A transformação da superfície do PDMS de hidrofóbica (com aversão as moléculas de água) para hidrofílica (com afinidade com as moléculas de água) vem sendo feita através de irradiação ultravioleta, gás plasma, descargas elétricas e modificações químicas (Yang & Yuan, 2016). Uma solução pode ser utilizar adesivos ou braçadeiras para junção não permanente (Zhao *et al.*, 2012).

### **2.2.3 Aplicações do PDMS**

O PDMS tem se tornado um material muito importante em vários campos conforme o tempo. Algumas de suas aplicações incluem agentes para retirada de molde, impermeabilização e produtos biomédicos. Ultimamente tem se tornado popular também na micro engenharia, devido a possibilidade de se

fabricar os protótipos de maneira rápida com este material (Kuncova-kallio & Kallio, 2006).

Polidimetilsiloxano é ideal para sensores químicos e mecânicos micromaquinados, assim como acelerômetros, devido a baixa temperatura de cura, alta flexibilidade, a possibilidade de alterar seus grupos funcionais e a baixa variação das suas propriedades com o tempo e a temperatura. Utilizado em sensores táteis por não influenciar na sensibilidade do dispositivo e dissociar sensores do ambiente, mecanicamente e quimicamente. (Bergveld *et al.*, 1997)

Na mecânica o PDMS é usado como isolamento térmico para altas e baixas temperaturas, juntas de vedação, isolamentos elétricos, cabos de auto-ignição, tubos e aplicações na microfabricação. (Smith, 1996)

Na tecnologia micro, temos a fabricação de estruturas 3D com litografia suave com PDMS. É um método para obtenção de estruturas pequenas, que junto com a eletrônica se pode produzir dispositivos integrados. Este método replica estruturas através de um molde a fim de fabricar nanoestruturas de elevada qualidade. É um método que funciona como um carimbo, ou molde, que transfere o padrão para o substrato (Krogh & Asberg, 2003).

#### **2.2.4 PDMS na Medicina**

O PDMS é muito utilizado na fabricação de próteses devido as características já observadas como a flexibilidade e a estabilidade, alguns exemplos são próteses de válvulas cardíacas (Ribas, 2013), articulações de dedos (Xavier, 2011), implantes mamários (Santos, 2009), e implantes faciais, assim como orelha, queixo e reconstrução do nariz (Anjos *et al.*, 2007).

Uma outra aplicação biomédica do PDMS é no estudo de aneurismas cerebrais, um aneurisma cerebral é a dilatação anormal da parede de um vaso sanguíneo localizado no cérebro, isso pode ser de nascença ou desenvolvido durante a vida devido a fraqueza das paredes arteriais, então um modelo de PDMS pode ser criado para imitar o comportamento biomecânico das veias de sangue de forma a fazer uma caracterização numérica das veias durante a formação do aneurisma (Cardoso *et al.*, 2018).

### **2.2.5 Processamento do PDMS**

Quimicamente falando, a cura do material se refere ao endurecimento do polímero por reticulação. Esta é a reação que ocorre entre a resina e o catalizador, que promove a formação de ligações cruzadas fortes entre as moléculas. (Krogh & Asberg, 2003)

O fabricante sugere uma mistura na proporção de 10:1 de PDMS e agente de cura, porém podem ser utilizadas outras proporções de mistura, essas diferenças proporcionam variações significativas nas propriedades finais do PDMS (Hum, 2006).

A quantidade de agente de cura utilizada resulta na alteração da viscosidade do fluido após a mistura, quanto mais agente de cura é adicionado menos viscosa será a mistura, pelo fato do material base ser mais viscoso que o agente de cura. A base do pré-polímero tem uma viscosidade de 0,0050 m<sup>2</sup>/s e o agente de cura tem uma viscosidade de 0,0011 m<sup>2</sup>/s. A viscosidade do fluido após a mistura é interessante para o processo de moldação. O fato de o material conseguir fluir mais facilmente resulta em uma melhor impressão. Porém o aumento do agente de cura resultará em um PDMS mais rígido (Hum, 2006).

Um aumento na porcentagem do agente de cura pode resultar em um aumento na resistência a tração, porém se for em maiores porcentagens muito altas, pode resultar na diminuição da resistência a tração, o módulo de elasticidade também é influenciado pela mistura. Os resultados laboratoriais sugerem que o maior módulo de elasticidade se dá para uma mistura de 9:1 (Khanfer et al., 2009).

### **2.3 Resistência dos materiais**

A mecânica dos sólidos estuda os sólidos quando estão sendo sujeitos a diferentes tipos de carregamento. Quando se aplica uma força a um material ele responde de uma maneira e a mecânica dos sólidos estuda essa resposta. (Timoshenko, 1983).

Os materiais, em suas diversas aplicações, geralmente estão sujeitos a cargas, o PDMS não é diferente, um exemplo, em sua aplicação nas próteses de artérias, o material recebe esforços da pressão sanguínea (Moreira, 2013). Desta maneira a mecânica dos sólidos se torna fundamental para caracterizar esses materiais e para saber previamente se o material é adequado para a função que irá exercer.

Na área experimental, as propriedades mecânicas dos materiais são obtidas através de ensaios mecânicos, como por exemplo, os ensaios de compressão, tração e cisalhamento. Neste trabalho o estudo se dará através do ensaio de cisalhamento. Alguns parâmetros a serem mensurados são a dimensão do corpo de prova e a velocidade de ensaio (Moreira, 2013).

Na Figura 3 é possível observar um corpo de prova do tipo junta de sobreposição simples utilizado na realização de ensaios de cisalhamento. As placas aderentes devem ter maior rigidez que os adesivos para que os aderentes não se deformem e assim não interfiram no resultado do ensaio. (Nunes, 2011).

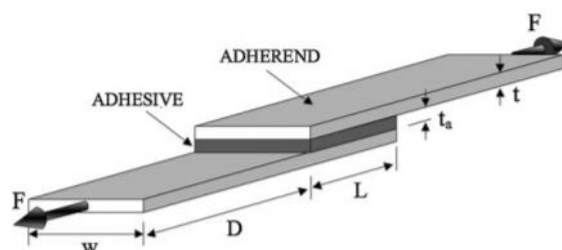


Figura 3 - Junta de sobreposição simples (Nunes, 2011).

## 2.4 Caracterização de materiais elásticos

O ensaio de tração é um dos ensaios mais simples para se caracterizar um material, este ensaio consiste em submeter um material com dimensões padronizadas a uma força de tração uniaxial, de modo a gerar deformação ao longo do comprimento (Cerqueira et al., 2010). A deformação específica se dá pela equação 1:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (1)$$

Quando uma distribuição de tensões numa área de corte transversal é considerada uniforme, essa tensão ( $\sigma$ ) é dada pela força de tração  $F$  dividido pela de seção transversal inicial  $A_0$ . A unidade SI da tensão é dada por Newton por metro quadrado ( $\text{N/m}^2$ ) ou Pascal (P) (Banea *et al.*, 2009). A tensão se dá pela equação 2:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

Em diagramas de tensão-deformação, quando a tensão ( $\sigma$ ) é diretamente proporcional a deformação ( $\varepsilon$ ) podemos escrever como na equação 3:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

Esta relação é conhecida por lei de Hooke, e o coeficiente ( $E$ ) é chamado de módulo de elasticidade, ou módulo de Young (Beer *et al.*, 2003). Quando a tensão e deformação são proporcionais o processo é chamado de deformação elástica, e graficamente é representado por uma reta. Como se observa na Figura 4.

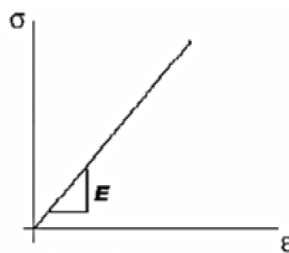


Figura 4 - Lei de Hooke (Silva, 2012).

Um material tem comportamento elástico quando se deforma ao aplicar uma carga, e ao retirar a carga consegue voltar ao seu tamanho normal. Este comportamento elástico pode ser linear e não-linear. No caso do PDMS, apresenta um comportamento não-linear.

Na definição do módulo de Young foi analisado apenas a deformação longitudinal, no caso do cisalhamento a razão entre a deformação transversal e

a deformação longitudinal na direção do esforço de tração é chamada de coeficiente de Poisson (Mendonça, 2013).

## 2.5 Cisalhamento simples

A força no cisalhamento atua perpendicular ao eixo vertical do corpo de prova. Podemos dizer que um material está submetido ao cisalhamento quando recebe a ação de uma força na direção transversal do seu eixo (Dutra, 2010). O esquema está representado na Figura 5.

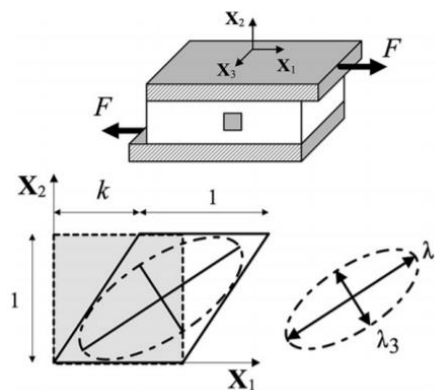


Figura 5 - Esquema de cisalhamento simples (Moreira & Nunes, 2013)

A força cortante aplicada no corpo gera esforços cortantes internos. A tensão de cisalhamento  $\tau$  é obtida através da razão entre a força cortante  $F_c$  e a área do corte, ou área da seção transversal  $A_c$  (Dutra, 2010).

$$\tau = \frac{F_c}{A_c} \quad (4)$$

Exemplos comuns de tensão de cisalhamento está nas uniões de parafusos, rebites e pinos, e também podem estar presentes na união por colagem (Gomes, 2015). A Figura 6 representa a atuação da tensão de cisalhamento para 3 casos, em união para colagem, união aparafusada simples e união aparafusada dupla.

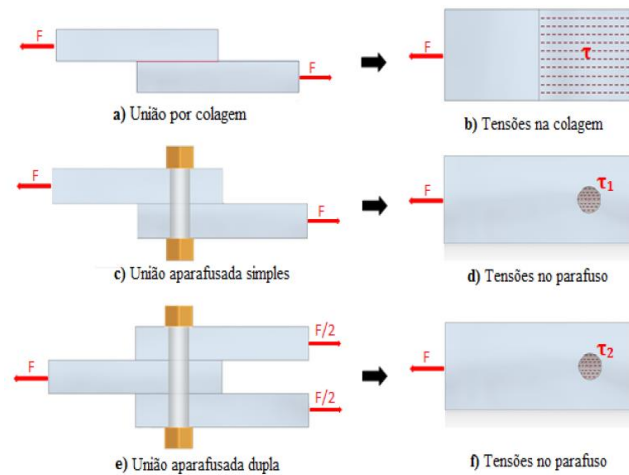


Figura 6 - Tensão de cisalhamento para casos de uniões por colagem, aparafusada simples e aparafusada dupla (Souza, 2017).

Alguns estudos vem trazendo o cisalhamento simples em função da densidade de energia de deformação, pelo fato do polímero ser um material hiperelástico sua deformação pode ser grande, para descrever esse comportamento uma função de tensão-energia é tomada em consideração. Como exemplo, estudos biomédicos de cisalhamento em tecidos musculares (Destrade *et al.*, 2008)(Meunier *et al.*, 2008). Há também estudos onde aplicam-se compressão junto do cisalhamento, uma combinação do cisalhamento simples junto com outros esforços (Bhuiyan & Ahmed, 2007). Diferente do nome, o cisalhamento simples não é tão simples. Alguns estudos mostram a complexidade do ensaio (Destrade *et al.*, 2012)(Segal, 2002).

M. Destrade *et al.* estudaram o efeito do cisalhamento simples em tecidos musculares, onde foi realizado uma comparação de polímeros sólidos e tecidos musculares, visto que ambos podem deformar, ser incompressível, não lineares e possuir tensões residuais. O estudo mostra a diferença entre o tecido muscular e os polímeros, ao aplicar um cisalhamento no bloco de elastômero a superfície continua plana, estável, e quando se aplicou um esforço cisalhamento no bloco de tecido muscular, ele apresentou “rugos” entre a direção do corte e a direção da fibra. Um dos resultados desse trabalho, obtido através do modelo “Neo-Hookeano”, foi que a superfície do elastômero estudado, ao sofrer esforços de cisalhamento, não sofre instabilidade, a não ser que seja submetido uma quantidade crítica de cisalhamento (Destrade *et al.*, 2008).

Em outro estudo realizado por M. Destrade *et al.* utilizando materiais isotrópicos, elásticos, não-lineares, compressíveis e incompressíveis, e analisando a tensão de cisalhamento de Cauchy, obteve-se que em um bloco cúbico do material, suas faces, ao sofrerem cisalhamento não conseguem exceder um ângulo de inclinação de 45°. A função de energia de deformação não depende do segundo invariante de deformação (Destrade *et al.*, 2012).

## 2.6 Modelo constitutivo da elasticidade da borracha

Um elemento de material  $dX$  pode ser transformado em um elemento  $dx$  na sua configuração, utilizando o tensor de gradiente de deformação  $F$ . A relação entre esses elementos é dada por  $dX = Fdx$  (Holzapfel, 2008)(Ogden, 1997).

Considerando o caso de uma deformação de cisalhamento simples apresentado na Figura 7 (Nunes, 2011).

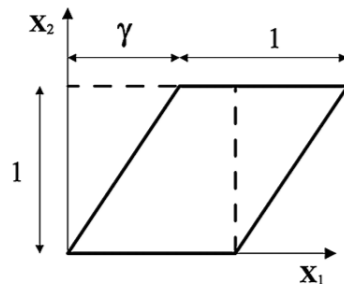


Figura 7 - Esquema de deformação no cisalhamento simples (Nunes, 2011).

Na qual a coordenada do retângulo cartesiano de qualquer ponto de elemento de deformação pode ser escrito como:

$$\begin{aligned} x_1 &= X_1 + \gamma X_2 \\ x_2 &= X_2 \\ x_3 &= X_3 \end{aligned} \tag{5}$$

Onde  $\gamma$  é a quantidade de cisalhamento. Usando a equação (5) a deformação tensor gradiente  $F$  pode ser expressa como (Nunes, 2011):

$$F = \nabla x = \begin{bmatrix} 1 & \gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

A partir da equação (6) o tensor de deformação Cauchy-Green  $\mathbf{B}$  pode ser escrito como (Nunes, 2011):

$$\mathbf{B} = \mathbf{F}\mathbf{F}^T = \begin{bmatrix} \gamma^2 + 1 & \gamma & 0 \\ \gamma & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

A energia de deformação é expressa em termos dos invariantes principais de deformação  $I(\mathbf{B})_1$ ,  $I(\mathbf{B})_2$ ,  $I(\mathbf{B})_3$  do tensor simétrico de Cauchy-Green ( $\mathbf{B}$ ) a esquerda (Pravato, 2018) os invariantes principais estão apresentados a seguir:

$$\begin{aligned} I_1 &= \text{tr}\mathbf{B} = \gamma^2 + 3 \\ I_2 &= \frac{1}{2} [(\text{tr}\mathbf{B})^2 - \text{tr}\mathbf{B}^2] = \gamma^2 + 3 \\ I_3 &= J = \det\mathbf{B} = 1 \end{aligned} \quad (8)$$

Neste caso de cisalhamento simples temos que  $I_1 = I_2 = \gamma^2 + 3$  e  $I_3 = 1$ . Visto que, para borrachas incompressíveis  $J$  é igual a 1. Portanto, o tensor simétrico de Cauchy-Green em função de seus termos invariantes principais de deformação fica (Nunes, 2011):

$$W = W[I_1(\mathbf{B}), I_2(\mathbf{B})] - \frac{1}{2}p[I_3 - 1] \quad (9)$$

Onde  $p/2$  pode ser interpretado como um multiplicador de Lagrange indeterminado.

O segundo tensor de tensão de Piola-Kirchhoff é definido por (Nunes, 2011):

$$\mathbf{S} = 2 \frac{\partial W(\mathbf{C})}{\partial \mathbf{C}} \quad (10)$$

A tensão de Cauchy  $\sigma$  pode ser expresso em termos do segundo tensor de tensão Piola-Kirchhoff  $\mathbf{S}$  pela transformação de Piola que é dado por  $\sigma =$

$J^{-1}\mathbf{F}\mathbf{S}\mathbf{F}^T$ . Pelas operações matemáticas usando o tensor Cauchy-Green esquerdo  $\mathbf{B}$ , a tensão de Cauchy pode ser escrita como (Holzapfel, 2008):

$$\sigma = 2J^{-1} \left[ \left( I_2 \frac{\partial W}{\partial I_2} + I_3 \frac{\partial W}{\partial I_3} \right) \mathbf{I} + \frac{\partial W}{\partial I_1} \mathbf{B} - I_3 \frac{\partial W}{\partial I_2} \mathbf{B}^{-1} \right] \quad (11)$$

Substituindo as equações (7) e (8) na equação (11), o componente de tensão de cisalhamento pode ser dado por (Nunes, 2011):

$$\sigma_{12} = 2 \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \gamma \quad (12)$$

Mooney e Rivlin (Holzapfel, 2008) (Ogden, 1997) (Mooney, 1964) observaram que a resposta da borracha era linear sobre condições de carregamento de cisalhamento simples. Com essa observação eles propuseram uma função de energia de tensão baseada no primeiro dos invariantes e no módulo de primeira ordem, qual pode ser definido por:

$$W(I_1, I_2) = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) \quad (13)$$

Onde  $c_{10}$  e  $c_{01}$  são parâmetros dos materiais.

A teoria proposta por Mooney foi baseada em três postulados: (A) Material isotrópico, (B) A mudança de volume e histerese são insignificantes e (C) O cisalhamento é proporcional à tração de cisalhamento simples em um plano previamente deformado, somente se for por dilatação ou contração uniforme. Porém o terceiro postulado (C) não está de acordo com os resultados experimentais encontrados no trabalho presente de Nunes. Tem se observado uma não linearidade na curva de tensão-deformação de cisalhamento. Esse efeito também foi observado em outras literaturas. (Lopez-Pamies & Mecanique, 2010)(Lahellec *et al.*, 2004).

A fim de encontrar uma função próxima de tensão-energia, que apresente uma estrutura matemática simples para descrever o comportamento não-linear observado nos dados experimentais, o modelo seguinte é proposto (Nunes, 2011):

$$W(I) = \frac{1}{2} [c_1(I - 3) + c_2(I - 3)^{\frac{3}{4}}] \quad (14)$$

Onde as invariantes são  $I_1 = I_2 = I$ . Para garantir as condições necessárias e suficientes para a função proposta de tensão-energia, ou seja, para ser estritamente policonvexo, é levado em consideração as relações  $W'(I) > 0$  e  $W'(I) + 2IW''(I) > 0$ , encontrado por Lopez-Pamies (Lopez-Pamies & Mecanique, 2010). Portanto, o coeficiente constante na equação (14) deve ser dado por  $c_1 > 0$  e  $c_2 > 0$ .

Substituindo as equações (13) e (14) na equação (12) obtemos a componente de stress de Cauchy associada com Mooney-Rivlin e os modelos propostos são respectivamente dados por (Nunes, 2011):

$$\sigma_{12} = \mu \gamma \quad (15)$$

$$\sigma_{12} = 2c_1\gamma + \frac{3}{2}c_2\sqrt{\gamma} \quad (16)$$

Onde o módulo de cisalhamento,  $\mu$  é igual a  $2(c_{10} + c_{01})$ .

## 2.7 Correlação digital de imagem (CDI)

A correlação digital de imagem (CDI), ou *digital image correlation* (DIC) em inglês, é um método que consiste em obter imagens de um objeto com um padrão aleatório preestabelecido, consiste em gravar um objeto sendo deformado e o software compara as imagens em seus estados distintos, não deformado e deformado, a fim de determinar o campo de deslocamento. É uma técnica interessante pela facilidade de execução e a necessidade de poucos equipamentos, em comparação com outras técnicas de avaliação de deformação. É uma técnica capaz de avaliar não apenas deslocamentos pontuais, mas também definir campos de deslocamento e com elevada precisão. São muitas as possibilidades de utilização, vendo que é capaz de medir pequenas deformações em escala micro e nano assim como elevados deslocamentos. Este método vem sendo usado para avaliar diversos materiais

utilizados na indústria (Mortessin & Brunet, 1997; Jerabek *et al.*, 2010), assim como polímeros hiperelásticos (Parsons *et al.*, 2005; Parsons *et al.*, 2004; Pascual-francisco *et al.*, 2017).

Correlação digital de imagem é uma medição sem contato desenvolvida por Sutton (Sutton *et al.*, 1983) e Bruck (Bruck *et al.*, 1989). O cálculo da correlação se dá pela comparação das duas imagens antes e depois de ocorrer a deformação mapeando as posições iniciais e finais dos pontos determinando assim o campo de deslocamento, conforme mostrado na Figura 8. (Ribeiro *et al.*, 2012).

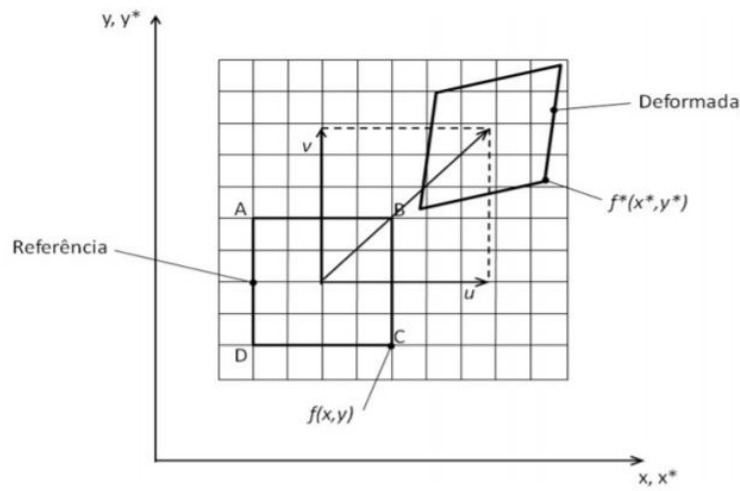


Figura 8 - Variação do estado inicial (referência) para o estado final (deformada) (Ribeiro *et al.*, 2012)

Onde é possível escrever a equação:

$$C^*(u^*, v^*) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f(x_i, y_j) - \bar{f}] [g(x'_i, y'_j) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [g(x'_i, y'_j) - \bar{g}]^2}} \quad (17)$$

Em que:

$$x' = x + u_0 + \frac{\partial u}{\partial x} \cdot dx + \frac{\partial u}{\partial y} \cdot dy \quad (18)$$

$$y' = y + v_0 + \frac{\partial v}{\partial x} \cdot dx + \frac{\partial v}{\partial y} \cdot dy \quad (19)$$

O valor dos pixels da imagem referência é dado por  $f(x, y)$  e o da imagem deformada é dado pela função  $g'(x', y')$ ,  $u$  e  $v$  são as componentes centrais de deslocamento nas direções  $x$  e  $y$  respectivamente,  $\bar{f}$  e  $\bar{g}$  são valores médios das imagens (Souza, 2017).

A correlação digital de imagem pode ser dividida de três formas diferentes, dependendo de sua aplicação. A forma de avaliar a deformação dos objetos 2D, que determina deslocamentos no plano (Nunes, 2011), 3D que determina deslocamentos não só no plano mas também fora dele (Chen *et al.*, 2013), e por terceiro, a correlação digital de volume, esta técnica utiliza termografia computadorizada de raio-X para determinar as deformações em todo corpo, que é a utilização mais recente da correlação digital de imagem (Réthoré *et al.*, 2012). Os equipamentos necessários para a realização da técnica de CDI consiste na utilização de câmeras CCD (*charged-coupled device*) de alta resolução digital, sendo que para medições em 2D é necessário de 1 câmera, e 2 câmeras para medições em 3D, iluminação fria e um computador com o software de correlação digital de imagem instalado.

As mudanças de imagens podem ser relacionadas com as deformações em pequenas áreas. Na mecânica experimental este conceito foi incorporado através de algoritmos numéricos onde foi possível obter dados de deformação com a sequencia de imagens obtidas com a câmera. O registro de imagens é realizado através de vários padrões entre eles linhas, grades, pontos e matrizes. Um método muito utilizado é o padrão aleatório (*speckle*), que compara sub-regiões das imagens (Sharpe, 2008).

## **2.8 Método de Taguchi**

O método de Taguchi foi criado pelo engenheiro estatístico Genichi Taguchi nascido em 1924 em Tokamachi no Japão. Ele desenvolveu uma metodologia que melhora a qualidade de produtos industriais utilizando métodos estatísticos (Pereira, 2017).

Taguchi começa a ter um forte impacto nas estatísticas industriais em 1949, quando é contratado pelo *Electrical Communication Laboratory* da *Nippon Telephone & Telegraph Company* (Fowlkes & Creveling, 1995).

A filosofia de Taguchi é baseada em três conceitos simples e fundamentais. Esses conceitos são (Roy, 1990):

- A qualidade deve ser projetada no produto e não inspecionada nele.
- A qualidade é melhor alcançada minimizando o desvio de um alvo. O produto deve ser concebido de forma a ser imune a fatores ambientais incontroláveis.
- O custo da qualidade deve ser medido em função do desvio da norma e as perdas devem ser medidas em todo o sistema.

### 2.8.1 Taguchi e razão sinal-ruído

No método de taguchi “sinal” representa o valor desejado para dada característica, e o termo “ruído” representa o indesejável. Taguchi utiliza essa relação sinal-ruído para avaliar o desvio de um valor desejado medindo a característica de qualidade. Essa relação S/N é uma escala de medição que já vinha sendo utilizada na indústria de comunicação por quase um século, mas Taguchi generalizou este conceito da relação S/N e aplicou para avaliar sistemas de medição, função de produtos e processos. Basicamente quanto maior a relação S/N melhor será a qualidade. (Taguchi *et al.*, 2004).

A relação sinal-ruído, de uma maneira controlada, mede a característica de qualidade investigada dos fatores não controláveis (fatores de ruído). Em questão da qualidade, existem três características típicas, que foram separadas em três equações (Roy, 1990):

- Nominal é melhor;

$$\frac{S}{N_T} = 10 * \log\left(\frac{\bar{y}^2}{S_y^2}\right) \quad (20)$$

- Maior é Melhor (maximizar);

$$\frac{S}{N_L} = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (21)$$

- Menor é Melhor (minimizar);

$$\frac{S}{N_S} = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (22)$$

Onde:

$\bar{y}$  – Média dos dados;

$S_y^2$  – Variância de y;

S – Sinal

N – Ruído

n – Número de observações;

$y_i$  – Dados observados;

## 2.9 Análise de Variância (ANOVA)

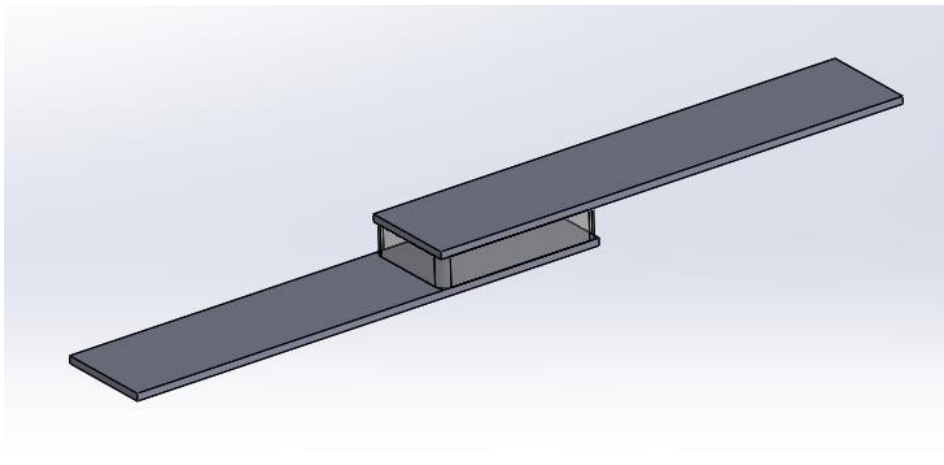
A análise de variância (ANOVA) testa a hipótese que as médias de duas ou mais populações são iguais. A análise de variância consiste na utilização de variâncias para determinar se as médias são diferentes. Este procedimento compara a variância entre as médias dos grupos versus a variância dentro dos grupos para determinar se os grupos fazem parte de uma população maior ou populações distintas com características diferentes (Minitab, LLC., 2019).

As ANOVAs calculam a importância de um ou mais fatores, avaliando a contribuição que esse fator implica no resultado, comparando as médias de variáveis de resposta nos diferentes níveis de fator (Minitab, LLC., 2019).

### 3. Materiais e métodos

Neste capítulo estaremos listando as etapas do processo de fabricação do corpo de prova, primeiramente é escolhido um modelo para o estudo, o qual foi escolhido uma junta de sobreposição simples, como referido anteriormente. Para isso, é necessário a fabricação do molde, processamento do PDMS, preparação das chapas de aço, etapa de colagem das juntas de sobreposição e preparação para correlação digital de imagem.

Para realizar o ensaio foi escolhido fazer corpos de prova de polidimetilsiloxano retangulares de 34x20mm<sup>2</sup> e variar sua espessura, o PDMS foi colado em duas chapas de aço Ck45, com dimensão 100x20x1,5mm<sup>3</sup>. O esquema utilizado para o ensaio está presente na Figura 9.

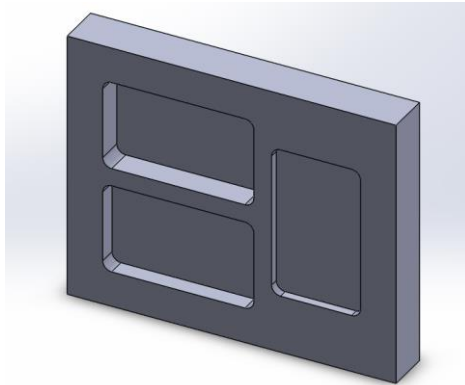


*Figura 9 - Corpo de prova preparado para ensaio de cisalhamento*

Para o estudo foi escolhido realizar ensaios de cisalhamento variando a espessura do PDMS com 2, 4 e 6mm, porém, pela limitação do equipamento experimental, apenas foi possível realizar o ensaio com as espessuras de 2 e 4mm. Para cada espessura foram realizados 3 ensaios de cisalhamento simples com velocidades diferentes. Os ensaios de cisalhamentos foram efetuados com dois tipos de adesivo (cianoacrilato e cola epóxi), resultando em 12 variações de ensaio, para avaliar a influência de cada parâmetro. Para cada variação de ensaio foram realizadas três repetições, sendo assim, houve a necessidade de fabricar de 36 corpos de prova.

### 3.1 Fabricação do Molde

Para a obtenção dos corpos de prova em PDMS foi necessário o fabrico de moldes. Assim, inicialmente, o modelo de molde foi desenhado no software SolidWorks®. O desenho é feito de acordo com as dimensões escolhidas para o ensaio, cavidades retangulares de 34x20mm<sup>2</sup> e variando a espessura em 2mm e 4mm. O desenho do molde está presente na Figura 10.



*Figura 10 - Desenho do molde*

O material escolhido para a fabricação do molde foi o alumínio 6082 T651, pela maior facilidade de usinagem e elevada resistência à corrosão. Um bloco de alumínio foi escolhido no laboratório, respeitando as dimensões mínimas. O bloco é apresentado na Figura 11.



*Figura 11 - Bloco de alumínio*

Após a escolha do bloco foi feita a preparação do bloco para a fresagem, utilizando a fresa de topo foi possível alisar a superfície como vemos na Figura 12.



Figura 12 - bloco de alumínio preparado para fresa

Para realizar a fresagem é utilizado o processo de usinagem na fresadora de comando numérico. Para isso, é gerado um código CNC (*Computer Numerical Control*) a partir do desenho do SolidWorks®, este código é realizado no software Mastercam®, um programa comercial de CAM (*Computer Aided Manufacturing*). Na Figura 13 é possível observar a simulação das trajetórias de usinagem do molde. Para a usinagem foi escolhida uma ferramenta de 10mm de diâmetro para fazer as cavidades iniciais e para o acabamento foi utilizado uma ferramenta de 4mm de diâmetro.

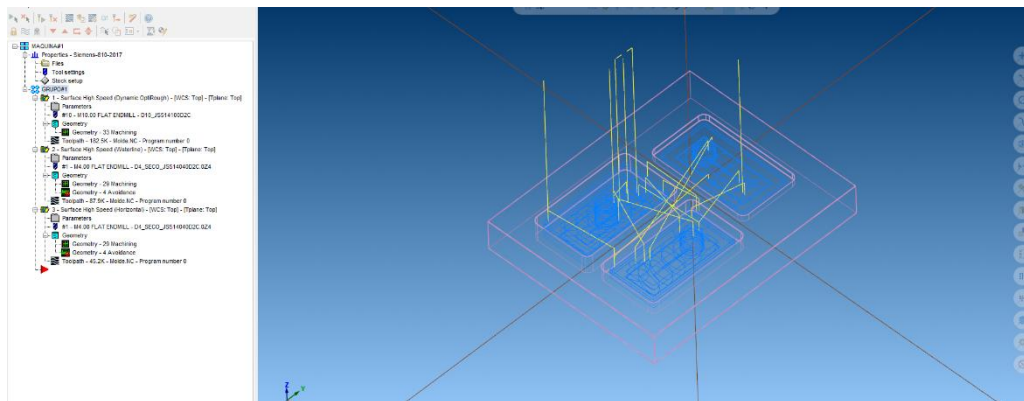
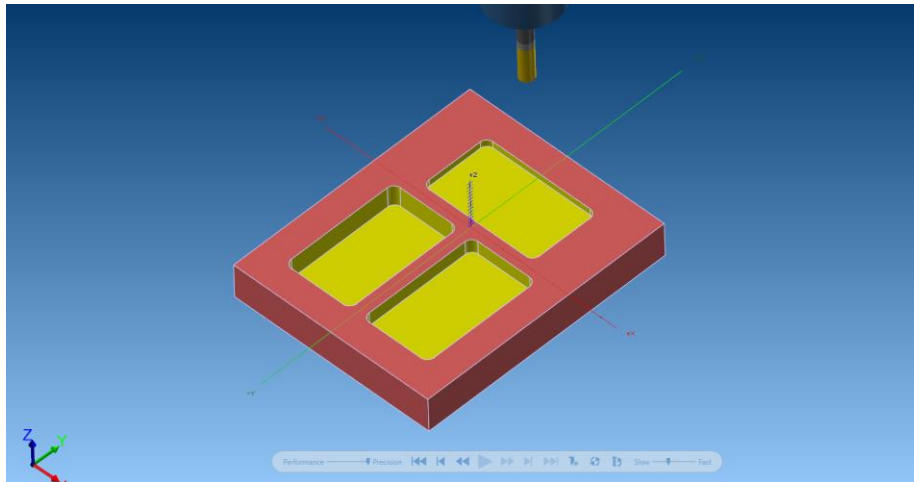


Figura 13 - Interface Mastercam

Com o programa pronto, uma simulação é realizada para verificar a ocorrência de erros de usinagem. O resultado da simulação pode ser visto na Figura 14. Um ponto é escolhido para ser o centro do desenho, este ponto é chamado de zero peça e serve como referência.



*Figura 14 - Resultado da simulação Mastercam*

Tendo o programa para a fabricação do molde e a peça pronta para a fresagem é preciso fixar a peça na máquina e fazer a marcação do zero peça, que será onde o programa irá iniciar. A Figura 15 mostra a marcação do ponto zero.



*Figura 15 - Zero peça*

Finalmente, o programa é executado pela máquina, o código foi enviado do computador para a fresadora de comando numérico via cabo RS232, e o molde foi fabricado. O resultado é mostrado na Figura 16.



Figura 16 - Molde Finalizado

### 3.2 Processamento do PDMS

O molde apresentado na Figura 16 é utilizado para produzir os corpos de prova para o ensaio de cisalhamento, onde a resina do polímero elastomérico será vazada antes da sua polimerização. O nome comercial do PDMS se dá por um *kit Dow Corning Sylgard Elastomer 184*. Esse kit é formado pelo material base e o agente de cura, a proporção indicada é a de 10:1 em peso. Após ter o molde preparado o processamento do PDMS é feito pela pesagem do material base e do agente de cura e subsequente mistura deles, a pesagem foi realizada com uma balança eletrônica de precisão (Adam Equipament HCB602H Higland™).

A mistura da base com seu agente de cura foi mexida por, aproximadamente, dois minutos para garantir uma homogeneização do polímero. Em seguida o PDMS foi levado para o exsiccador que está ligado a uma bomba de vácuo, apresentado na Figura 17, este equipamento é utilizado para remover todas as bolhas de ar existente junto da mistura do polímero, este processo leva cerca de 20 minutos.



*Figura 17 - Exsicador*

Com a mistura livre de bolhas de ar o PDMS é vazado no molde, este processo pode gerar bolhas e a solução é colocar o molde com o material no exsicador novamente por mais 15 a 20 minutos. Por fim, o molde é levado para a estufa a uma temperatura de 80° C por 45 minutos, após isso o PDMS é retirado delicadamente do molde. Os corpos de prova podem ser vistos na Figura 18.

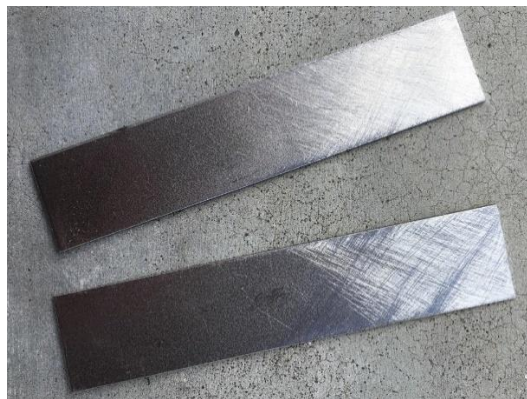


*Figura 18 - Corpos de Prova de PDMS*

### 3.3 Preparação de chapas para ensaio de cisalhamento

Uma chapa com 1,5mm de espessura foi utilizada para fazer as placas de aço, que foi cortada na guilhotina com as dimensões de 100x20mm<sup>2</sup>. Para cada amostra são necessárias duas placas.

Com as placas na dimensão especificada, é necessário limpá-las com álcool e, após isso, lixar a região que estará em contato com o PDMS para o adesivo aderir melhor com a placa de aço e o PDMS, foi utilizado uma lixa Awuko P80. O resultado pode ser observado na figura 19.



*Figura 19 - Placas de aço lixadas*

### 3.4 Preparação da junta de sobreposição simples

Tendo o PDMS e as chapas prontas, a fase final é fabricar as juntas de simples sobreposição. Para a fabricação dos corpos de prova foi dividido em dois adesivos diferentes quais são cianoacrilato e cola epóxi. A Tabela 2 mostra a sequência de ensaios e o que difere cada um deles, a cola 1 é referente ao cianoacrilato que é uma cola rápida, e a cola 2 é referente a cola epóxi que é composta pela resina epóxi e o acelerador, a qual a porcentagem utilizada foi 50% de cada.

Tabela 2 - Ensaio de Cisalhamento

Ensaio	Tipo de Cola	Espessura (mm)	Velocidade (mm/min)
1	1	2	1
2	1	2	3
3	1	2	5
4	1	4	1
5	1	4	3
6	1	4	5
7	2	2	1
8	2	2	3
9	2	2	5
10	2	4	1
11	2	4	3
12	2	4	5

Para os corpos de prova colados com cianoacrilato foi necessário colocar a cola rápida entre o PDMS e a placa e manter a pressão por aproximadamente 1 minuto para a colagem. Já para a cola epóxi foi necessário manter as peças juntas por, aproximadamente, 30 minutos. Os resultados dos corpos de prova podem ser observados na Figura 20.



Figura 20 - Corpo de prova

### 3.5 Preparação do corpo de prova para Correlação Digital de Imagem

O processo de correlação digital de imagem necessita da obtenção de uma sequência de imagens do objeto deformado, desde o repouso até à sua deformação máxima. Para o software poder fazer o cálculo dos deslocamentos é necessário que o objeto esteja com um fundo branco e com pequenos pontos pretos para que o programa faça o cálculo do deslocamento de cada ponto. O *software* que será utilizado para o tratamento das imagens é o GOM Correlate 2018.

Para deixar o corpo de prova preparado para o ensaio foi necessário comprar duas tintas spray, verniz acrílico al solvente, uma branca e opaca para a base, e outra preta opaca para criar os pontos. Inicialmente, é passado uma fina camada da tinta branca no PDMS, assim que a tinta secar é a vez de criar os pontos pretos, para isso foi utilizado o spray da cor preta, o spray é utilizado com uma distância do objeto de maneira que a tinta faça apenas pontos sobre a base branca, o resultado do processo está presente na Figura 21.



*Figura 21 - Corpo de prova para correlação digital de imagem*

O método escolhido para a obtenção da sequência de imagens foi a realização de um vídeo e retirar os frames a partir do vídeo com 25 frames por segundo para todos os ensaios, desta maneira os dados serão obtidos com uma precisão maior por ter uma maior quantidade de fotos por segundo.

## **4. Ensaio de Cisalhamento**

Com a fabricação finalizada dos corpos de prova foi possível partir para a última etapa experimental, que é o ensaio de cisalhamento.

### **4.1 Objetivos**

O cisalhamento efetuado pela máquina de tração é capaz de simular os esforços que serão submetidos no material. O objetivo do ensaio é avaliar a aderência do PDMS com a placa de aço e avaliar as propriedades mecânicas do polidimetilsiloxano através do ensaio de cisalhamento.

### **4.2 Equipamentos e materiais**

Para o ensaio foram utilizados corpos de prova de PDMS do tipo junta de sobreposição simples, com espessuras de 2mm e 4mm. Os ensaios foram efetuados em uma máquina universal de marca Autograph Shimadzu e modelo AGS-X. Foi utilizado o software específico da máquina de ensaios. Para o carreto alinhamento das juntas de sobreposição simples no sistema de amarramento da máquina de ensaios foi necessário utilizar uma cunha para regular o tamanho, na Figura 22 pode observar-se o pormenor da fixação da junta ensaiada nas amarras da máquina universal.



*Figura 22 - Ensaio de Cisalhamento*

Para o ensaio com correlação digital de imagem foram utilizados os mesmos corpos de prova de PDMS do tipo junta de sobreposição simples de 2 e 4mm, porém, pintados com um padrão aleatório, de maneira a poder ser utilizado para a CDI. As imagens gravadas com uma câmera de alta resolução digital.

### **4.3 Metodologia experimental**

Inicialmente o corpo de prova é posicionado e fixado manualmente de maneira que não fique desalinhado, a fixação do corpo de prova foi efetuada da maneira mostrada na Figura 22. O ensaio experimental foi realizado com três velocidades diferentes para cada espessura, e que foram de 1, 3 e 5mm/min. A uma temperatura média ambiente de 24 graus.

Para a obtenção das imagens para a correlação digital de imagem foi necessário posicionar a câmera de maneira que ficasse apontada para o PDMS durante o ensaio de cisalhamento.

#### **4.4 Análise estatística dos resultados**

Após a realização de todos os ensaios foi necessário realizar o tratamento estatístico dos dados obtidos. Primeiramente, uma análise com o método de Taguchi para avaliar os parâmetros utilizados, e através de médias encontrar a melhor combinação de parâmetros para um melhor resultado.

Na sequência foi utilizado a análise de variância (ANOVA) que foi realizada através do software Minitab® 17. Minitab é um software que oferece ferramentas estatísticas para analisar dados e encontrar soluções para problemas empresariais mais complexos. Este programa oferece análise estatística, análise preditiva e de melhoria para produzir tomadas de decisões por dados (Minitab, LLC., 2019).

## 5. Resultados e Discussões

### 5.1 Ensaio de cisalhamento simples

Após a realização dos ensaios, foi possível obter alguns dados do comportamento do PDMS, e com a ajuda do Excel foi possível gerar gráficos da força em função do deslocamento.

Os resultados dos ensaios utilizando a cola número 1, uma cola de cianoacrilato estão mostrados nos gráficos a seguir.

O ensaio número 1 foi realizado na máquina de tração com velocidade de 1mm/min, corpo de prova do tipo junta de sobreposição simples com PDMS de espessura de 2mm que foi colado com a cola de cianoacrilato. O gráfico obtido de Força x Deslocamento para os três ensaios pode ser observado na Figura 23. Na figura é observado algumas descontinuidades no gráfico, o que seria a cola descolando do material.

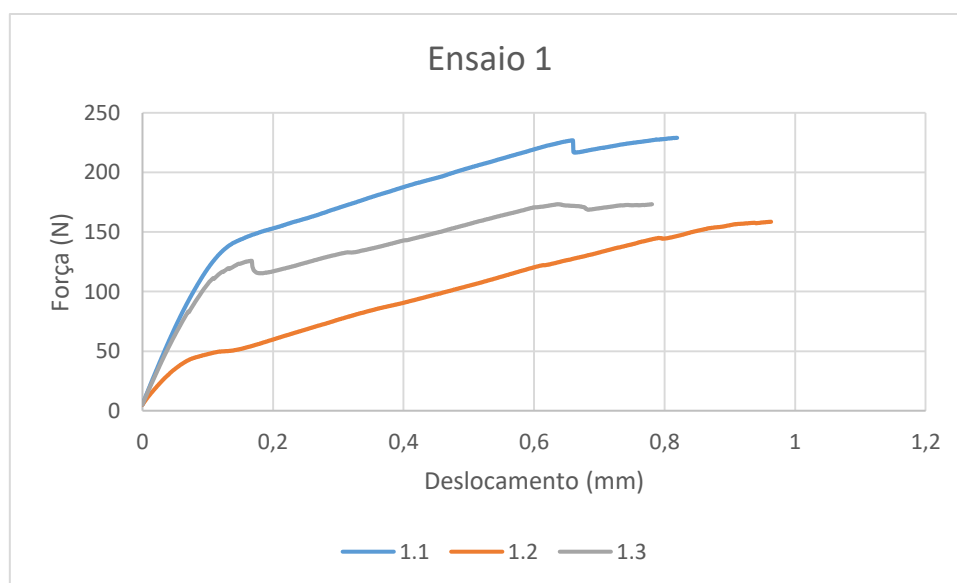


Figura 23 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 1

Os dados obtidos para cada repetição estão presentes na Tabela 3:

Tabela 3 - Dados obtidos no ensaio 1

Ensaio 1	1.1	1.2	1.3
Força máxima [N]:	229,065	158,629	173,302
Deslocamento [mm]:	0,819	0,963	0,781

Para o ensaio número 2 foi utilizado a mesma cola de cianoacrilato, PDMS com espessura de 2mm e velocidade de ensaio de 3mm/min. O gráfico de Força x Deslocamento do ensaio 2 é mostrado na Figura 24.

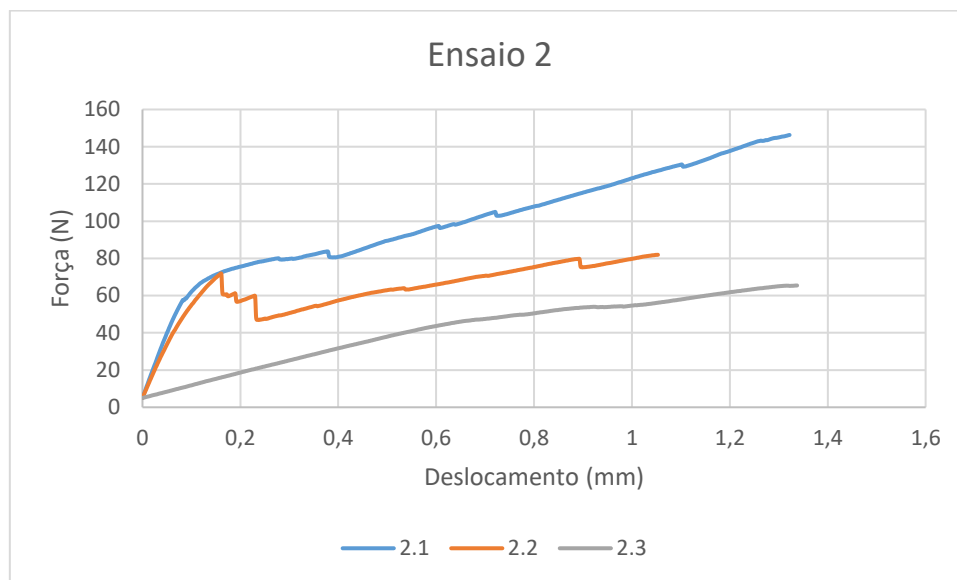


Figura 24 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 2

Os dados obtidos através do gráfico podem ser observados na Tabela 4:

Tabela 4 - Dados obtidos no ensaio 2

Ensaio 2	2.1	2.2	2.3
Força máxima [N]:	146,3	81,930	65,436
Deslocamento [mm]:	1,322	1,053	1,337

O ensaio número 3 foi feito com a cola número 1, PDMS com espessura de 2mm e velocidade de ensaio de 5mm/min. O gráfico de Força x Deslocamento do ensaio 3 para os três ensaios é mostrado na Figura 25.

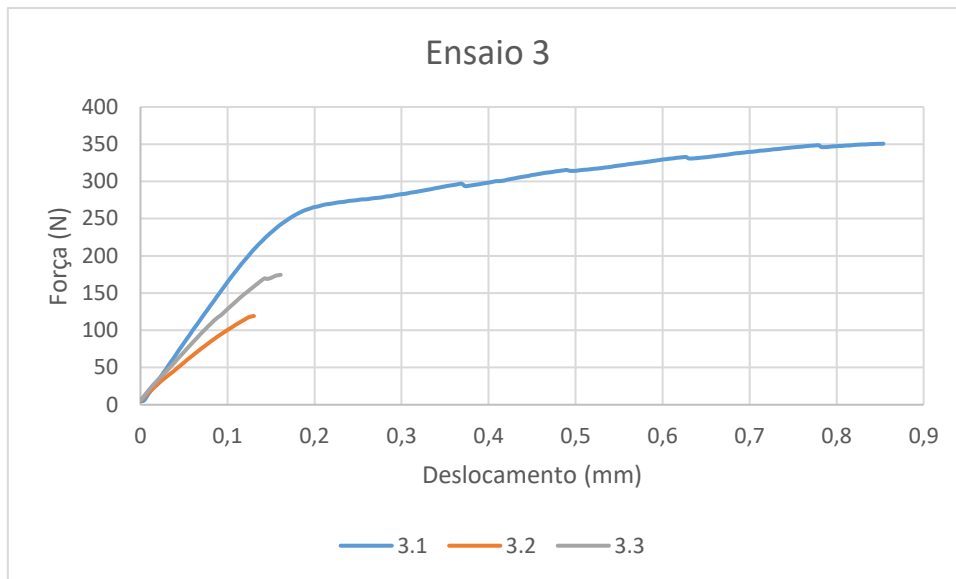


Figura 25 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 3

A força máxima e deslocamento antes do PDMS se soltar em cada repetição estão presentes na Tabela 5:

Tabela 5 - Dados obtidos no ensaio 3

Ensaio 3	3.1	3.2	3.3
<b>Força máxima [N]:</b>	350,610	119,197	174,489
<b>Deslocamento [mm]:</b>	0,854	0,130	0,161

Na realização do ensaio número 4 foi utilizado a mesma cola de cianoacrilato, PDMS com espessura de 4mm e velocidade de ensaio de 1mm/min. O gráfico de Força x Deslocamento do ensaio 4 é mostrado na Figura 26.

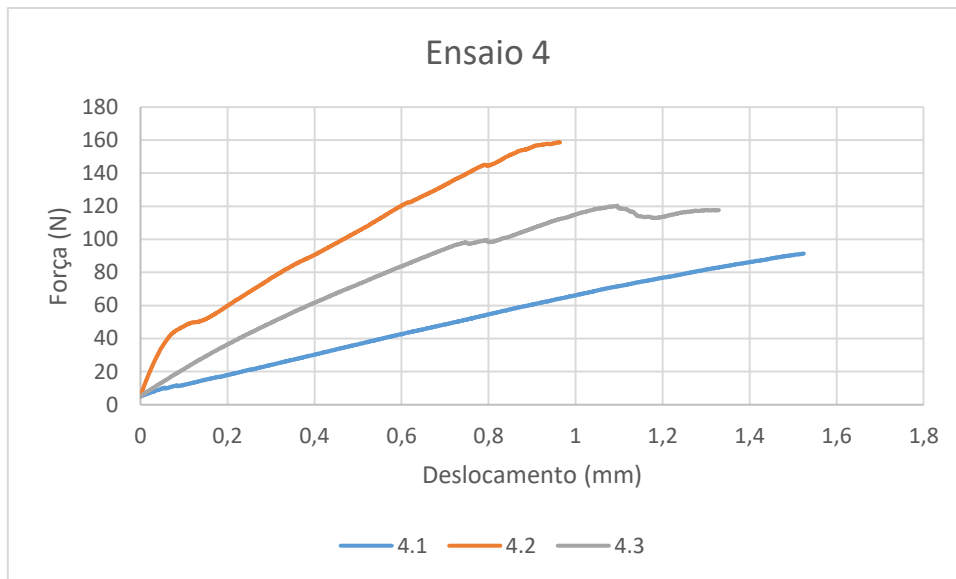


Figura 26 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 4

Os dados obtidos com o ensaio 4 estão apresentados a seguir na Tabela

6:

Tabela 6 - Dados obtidos no ensaio 4

Ensaio 4	4.1	4.2	4.3
<b>Força máxima [N]:</b>	91,359	158,648	117,636
<b>Deslocamento [mm]:</b>	1,524	0,964	1,329

No ensaio número 5 foi utilizado a cola 1, PDMS com espessura de 4mm e velocidade de ensaio de 3mm/min. O gráfico de Força x Deslocamento do ensaio 5 é mostrado na Figura 27.

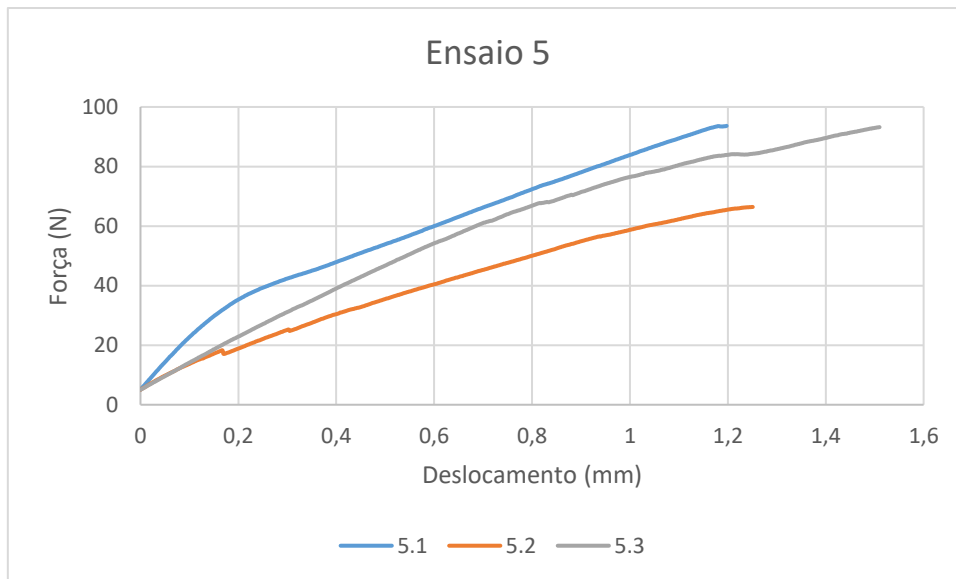


Figura 27 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 5

A Tabela 7 apresenta os dados obtidos no ensaio 5.

Tabela 7 - Dados obtidos no ensaio 5

Ensaio 5	5.1	5.2	5.3
Força máxima [N]:	93,643	66,409	93,210
Deslocamento [mm]:	1,198	1,251	1,510

O ensaio número 6, último ensaio com a cola número 1 foi realizado com espessura de 4mm e velocidade de ensaio de 5mm/min. O gráfico de Força x Deslocamento do ensaio 6 é mostrado na Figura 28.

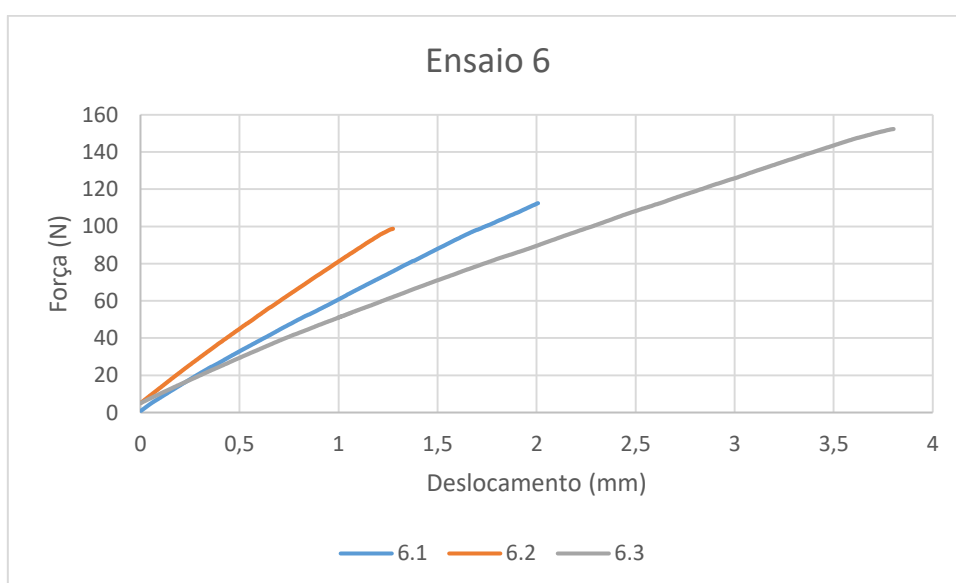


Figura 28 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 6

A Tabela 8 apresenta os dados obtidos no ensaio 6.

Tabela 8 - Dados obtidos no ensaio 6

Ensaio 6	6.1	6.2	6.3
Força máxima [N]:	112,451	98,715	152,313
Deslocamento [mm]:	2,007	1,275	3,802

Os ensaios a seguir foram feitos com a cola número 2, que é uma cola epóxi.

O primeiro ensaio com a cola número 2, cola epóxi, foi o ensaio número 7, que foi realizado na máquina de tração com velocidade de 1mm/min, corpo de prova do tipo junta de sobreposição simples com PDMS de espessura de 2mm. O gráfico obtido de Força x Deslocamento pode ser observado na Figura 29.

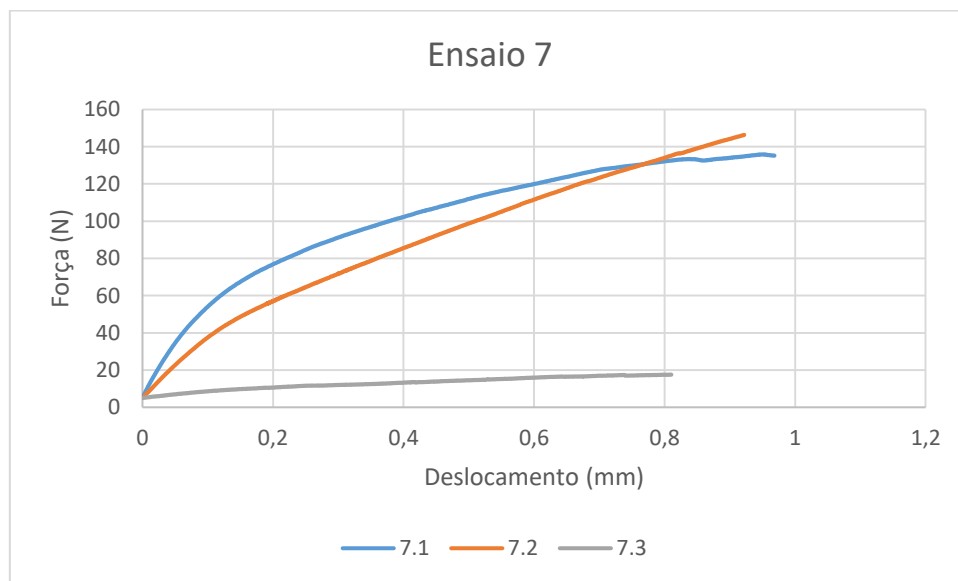


Figura 29 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 7

A partir do gráfico foi possível obter os dados principais de cada repetição que podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 - Dados obtidos no ensaio 7

Ensaio 7	7.1	7.2	7.3
Força máxima [N]:	135,210	146,336	17,524
Deslocamento [mm]:	0,968	0,922	0,810

No ensaio número 8 foi utilizado a mesma cola epóxi, PDMS com espessura de 2mm e velocidade de ensaio de 3mm/min. O gráfico de Força x Deslocamento do ensaio 8 é mostrado na Figura 30.

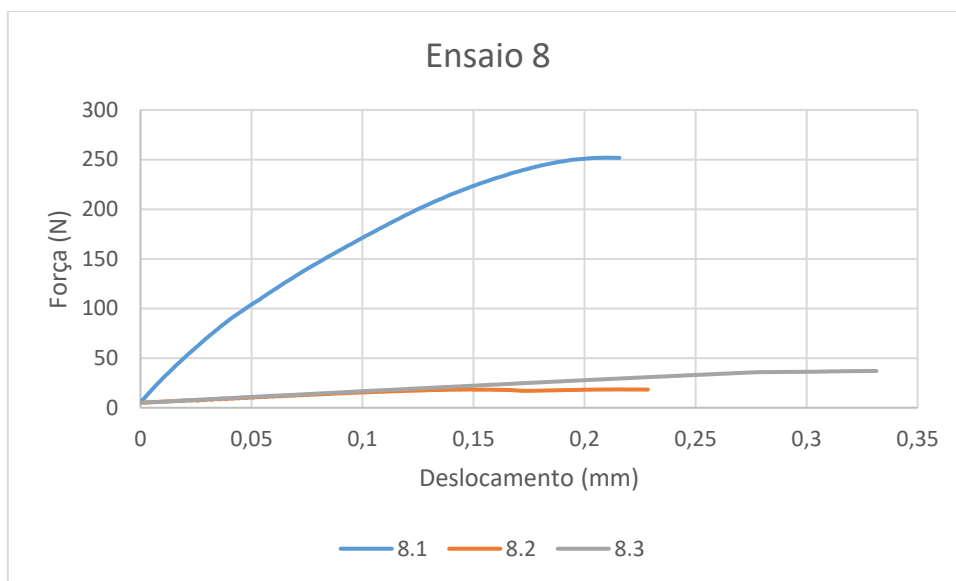


Figura 30 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 8

Os dados obtidos através do gráfico podem ser observados na Tabela 10:

Tabela 10 - Dados obtidos no ensaio 8

Ensaio 8	8.1	8.2	8.3
Força máxima [N]:	251,732	18,256	37,042
Deslocamento [mm]:	0,216	0,228	0,331

No ensaio número 9 a espessura do corpo de prova de PDMS foi de 2mm, velocidade de ensaio de 5mm/min e cola número 2. O gráfico de Força x Deslocamento do ensaio 9 é mostrado na Figura 31.

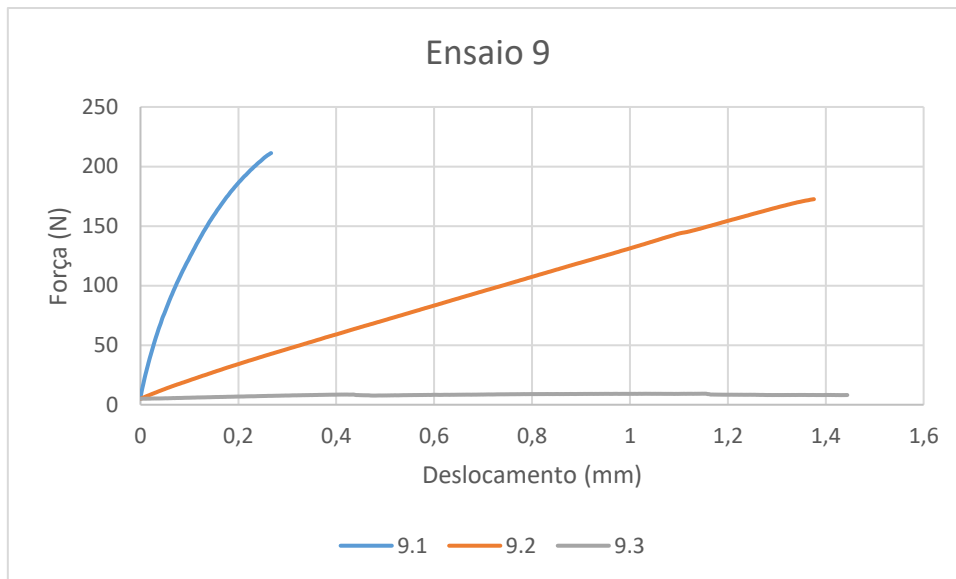


Figura 31 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 9

Na Tabela 11 é possível observar os dados obtidos com o ensaio 9:

Tabela 11 - Dados obtidos no ensaio 9

Ensaio 9	9.1	9.2	9.3
Força máxima [N]:	221,228	172,544	8,162
Deslocamento [mm]:	0,267	1,376	1,444

Para o ensaio número 10 a velocidade de ensaio foi de 1mm/min, espessura do corpo de prova de 4mm e cola número 2. O gráfico de Força x Deslocamento do ensaio 10 é mostrado na Figura 32.

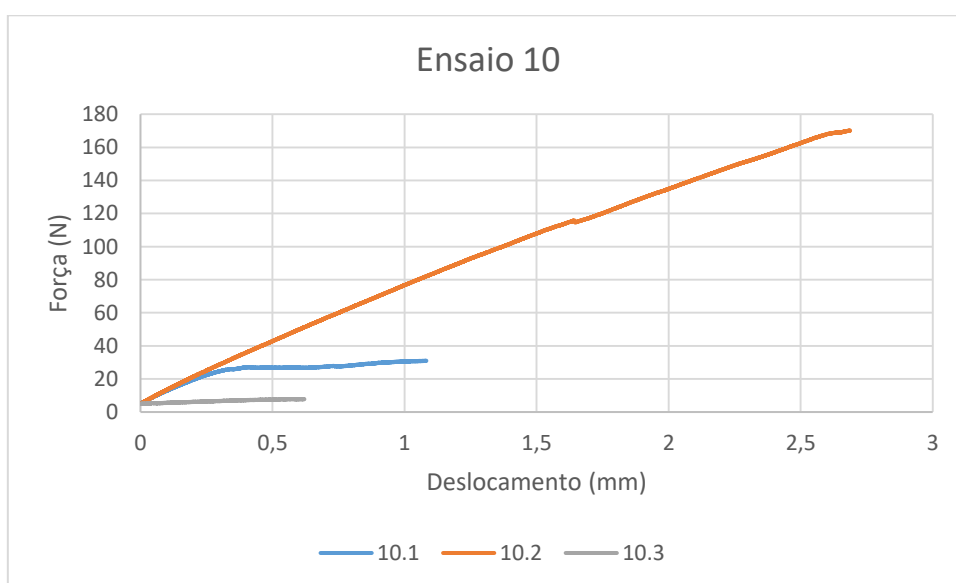


Figura 32 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 10

Com os dados da tabela 10 foi criado uma tabela com os dados mais importantes, que podem ser observados na Tabela 12.

Tabela 12 - Dados obtidos no ensaio 10

Ensaio 10	10.1	10.2	10.3
Força máxima [N]:	30,970	170,162	7,772
Deslocamento [mm]:	1,082	2,687	0,620

O ensaio número 11 foi feito com corpo de prova de espessura de 4mm, cola número 2 e velocidade de 3mm/min. O gráfico de Força x Deslocamento do ensaio 11 é mostrado na Figura 33.

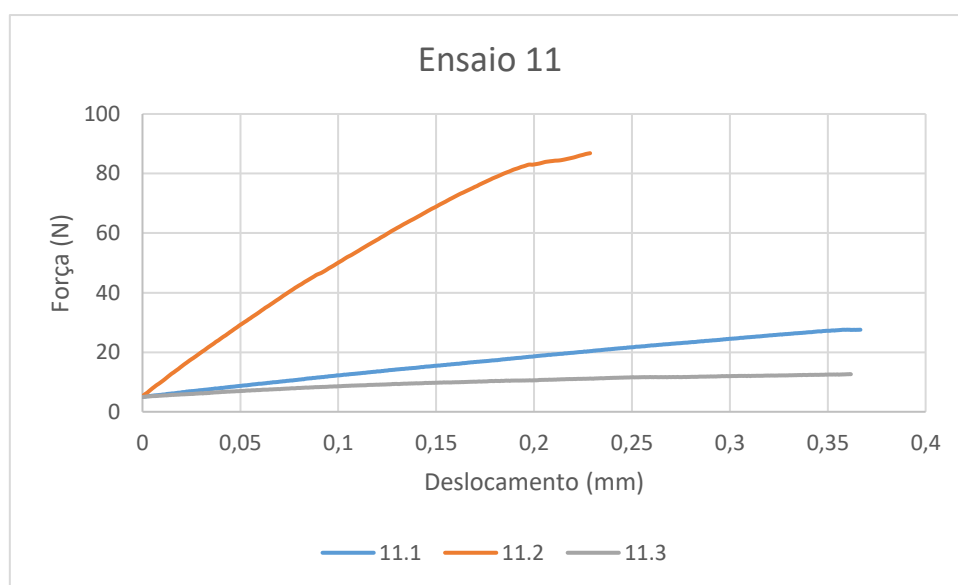


Figura 33 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 11

A força máxima e deslocamento antes do PDMS se soltar em cada repetição estão presentes na Tabela 13:

Tabela 13 - Dados obtidos no ensaio 11

Ensaio 11	11.1	11.2	11.3
Força máxima [N]:	27,553	86,830	12,616
Deslocamento [mm]:	0,367	0,229	0,362

No último ensaio com a cola epóxi, ensaio número 12, a espessura do corpo de prova era de 4mm e velocidade de ensaio de 5mm/min. O gráfico de Força x Deslocamento do ensaio 12 é mostrado na Figura 34.

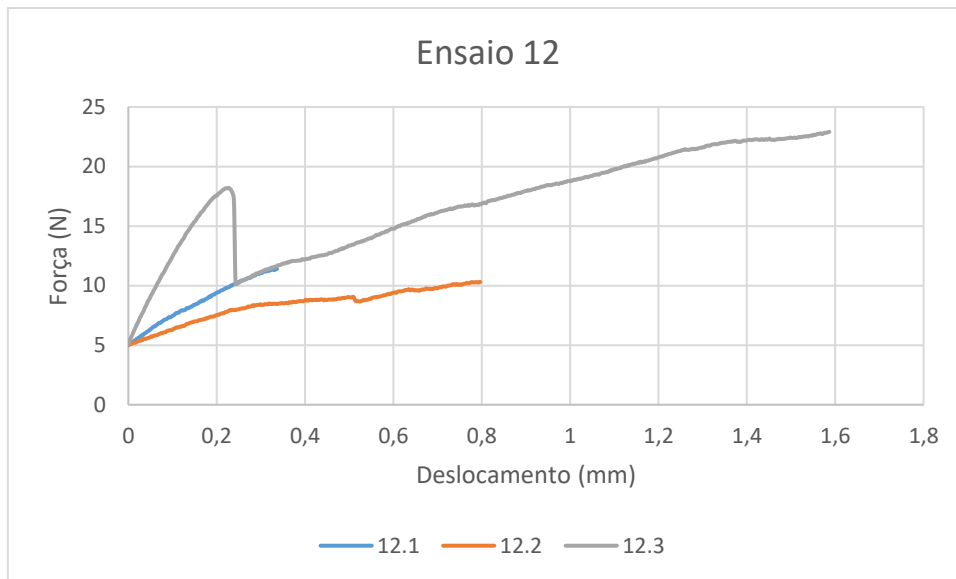


Figura 34 - Gráfico Força x Deslocamento para o ensaio 12

Na Tabela 14 é possível observar os dados obtidos com o ensaio 12:

Tabela 14 - Dados obtidos no ensaio 12

Ensaio 12	12.1	12.2	12.3
Força máxima [N]:	11,409	10,308	22,915
Deslocamento [mm]:	0,337	0,796	1,586

De acordo com as Figuras 23 a 34 é perceptível o comportamento hiperelástico do PDMS, visto que apresenta grandes deformações, sendo até perceptível visualmente. Vale ressaltar que todos os ensaios o PDMS se soltou da placa de aço, não havendo a ruptura do material.

Foi possível verificar que os gráficos não eram lineares para a espessura de 2mm, ou seja, a carga inicial se dava pela força da cola e posteriormente era observado o comportamento do material. Já na espessura de 4mm foi possível observar melhor o comportamento do material ao deformar, onde o gráfico era dado por uma reta.

Após a obtenção dos gráficos de Força x Deslocamento foi possível criar uma tabela com todos os resultados de cada ensaio para observar melhor os dados obtidos. A seguir a Tabela 15 apresenta os resultados.

Com a tabela de resultados é possível realizar uma análise estatística dos resultados para melhor entendimento dos resultados obtidos.

Tabela 15 - Resultados dos ensaios

Ensaio	.1		.2		.3	
	Força (N)	Deslocamento (mm)	Força (N)	Deslocamento (mm)	Força (N)	Deslocamento (mm)
1	229,065	0,819	158,629	0,963	173,302	0,781
2	146,3	1,322	81,930	1,053	65,436	1,337
3	350,610	0,854	119,197	0,130	174,489	0,161
4	91,359	1,524	158,648	0,964	117,636	1,329
5	93,643	1,198	66,409	1,251	93,210	1,510
6	112,451	2,007	98,715	1,275	152,313	3,802
7	135,21	0,968	146,336	0,922	17,524	0,810
8	251,732	0,216	18,256	0,228	37,042	0,331
9	211,228	0,267	172,544	1,376	8,162	1,444
10	30,970	1,082	170,162	2,687	7,772	0,620
11	27,553	0,367	86,830	0,229	12,616	0,362
12	11,409	0,337	10,308	0,796	22,912	1,586

## 5.2 Método de Taguchi

Do ensaio de cisalhamento com os corpos de prova de sobreposição simples tem-se, como principal objetivo, obter a máxima força para o máximo deslocamento antes da rotura. Como mostrado anteriormente, a função sinal-ruído mede a sensibilidade da característica de qualidade estudada (força e deslocamento) controlada relativamente aos fatores não controláveis. Existem três tipos para caracterizar a qualidade, que são “nominal é melhor”, “maior é

melhor” e “menor é melhor”. De acordo com o objetivo do trabalho temos que quanto maior a força e maior o deslocamento é melhor.

### 5.2.1 Combinação ótima para a força máxima

Com ajuda da tabela 15, onde temos as forças máximas obtidas antes da ruptura para todos os ensaios, e com a ajuda da expressão 21 onde “maior é melhor” podemos obter a razão sinal-ruído para esse fator, onde  $n$  representa o número de valores a serem lidos e  $y_i$  representa a força obtida no ensaio.

$$\frac{S}{N_L} = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (21)$$

Para melhor entendimento, um exemplo do primeiro cálculo realizado:

$$\frac{S}{N_L} = -10 * \log\left(\frac{1}{3} * \left(\frac{1}{229,065^2} + \frac{1}{158,629^2} + \frac{1}{173,302^2}\right)\right) = 45,12886 [dB]$$

Na Tabela 16 são apresentados os valores da razão sinal-ruído para a força nos doze ensaios.

Tabela 16 - Valores da razão Sinal-Ruído para a Força

Ensaio	Força [N]			S/NL [dB]
	.1	.2	.3	
1	229,065	158,629	173,302	45,12886
2	146,3	81,93	65,436	38,44422
3	350,61	119,197	174,489	44,30381
4	91,359	158,648	117,636	41,11997
5	93,643	66,409	93,21	38,18264
6	112,451	98,715	152,313	41,25312
7	135,21	146,336	17,524	29,51071
8	251,732	18,256	37,042	29,03663
9	211,228	172,544	8,162	22,99097
10	30,97	170,162	7,772	22,30811
11	27,553	86,83	12,616	25,88789

12	11,409	10,308	22,912	21,98395
----	--------	--------	--------	----------

Para cada parâmetro utilizado nos ensaios foi criado uma abreviatura para simplificar, como é possível observar na Tabela 17.

Tabela 17 - Designação dos Parâmetros

Designação	
A1	Cola de Cianocrilato
A2	Cola Epoxi
B1	Espessura do PDMS de 2mm
B2	Espessura do PDMS de 4mm
C1	Velocidade de ensaio 1mm/min
C2	Velocidade de ensaio 3mm/min
C3	Velocidade de ensaio 5mm/min

Na Figura 35 são apresentados a média dos valores da razão S/N para os diferentes parâmetros utilizados.

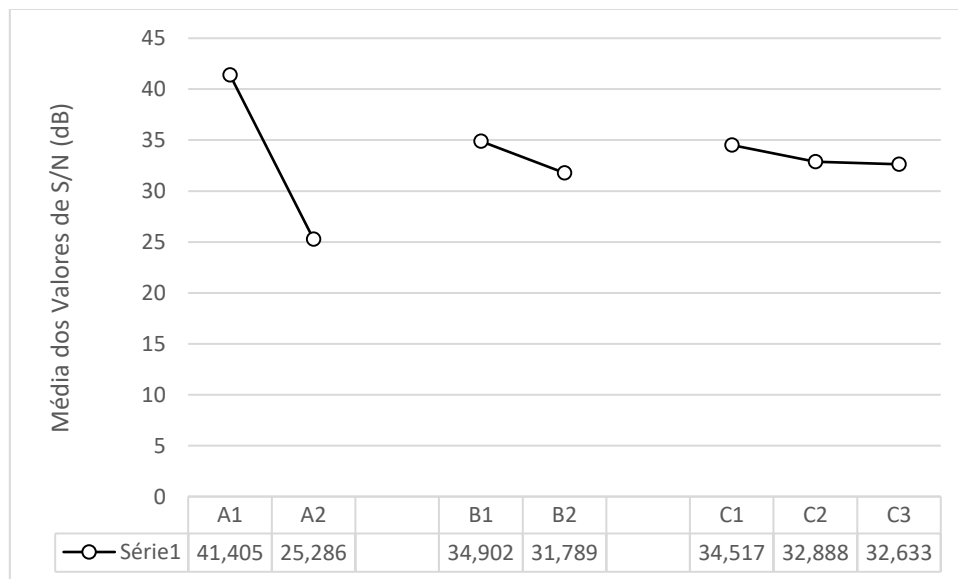


Figura 35 - Média dos Valores S/N dos parâmetros utilizados para força

Observando a Figura 35 é possível observar que a configuração ótima obtida foi A1 B1 C1, onde foi feito o ensaio com a cola 1 de cianoacrilato, com PDMS de espessura 2mm e velocidade de ensaio 1mm/min.

Como a cola de cianoacrilato teve resultados mais satisfatórios foi feito também a avaliação dos parâmetros apenas para os resultados encontrados com a cola 1. Na Figura 36 é possível observar a média dos valores de S/N para essa situação.

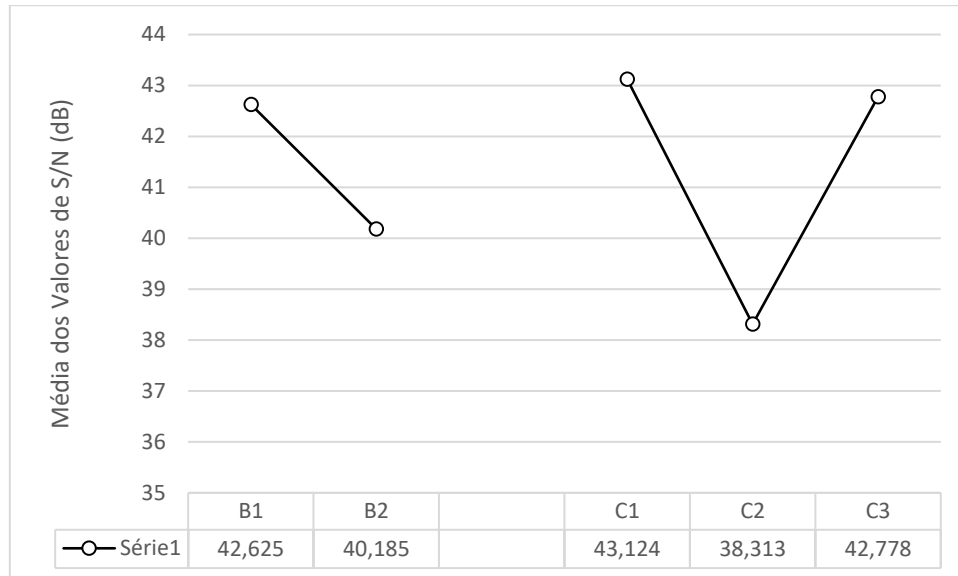


Figura 36 - Média dos Valores S/N dos parâmetros utilizados para força - Cola 1

Observando a Figura 36 vimos que houve uma diferença na influência da velocidade de ensaio, mas a melhor configuração continua sendo B1 C1.

### 5.2.2 Combinação ótima para o deslocamento máximo

Para o deslocamento também temos que “maior é melhor”, então a expressão a ser utilizada é a mesma de anteriormente, a equação 20. Com ajuda da Tabela 3, onde são indicados os deslocamentos obtidos nos ensaios experimentais, é possível encontrar a razão sinal-ruído para esse fator.

$$\frac{S}{N_L} = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (21)$$

Na Tabela 18 são apresentados os valores da razão sinal-ruído para o deslocamento nos doze ensaios.

Tabela 18 - Valores da razão Sinal-Ruído para o Deslocamento

Ensaio	Deslocamento [mm]			S/NL [dB]
	.1	.2	.3	
1	0,819	0,963	0,781	-1,47018
2	1,322	1,053	1,337	1,688828
3	0,854	0,13	0,161	-15,1905
4	1,524	0,964	1,329	1,605609
5	1,198	1,251	1,51	2,280894
6	2,007	1,275	3,802	5,074322
7	0,968	0,922	0,81	-0,98957
8	0,216	0,228	0,331	-12,2009
9	0,267	1,376	1,444	-6,99987
10	1,082	2,687	0,62	-0,78473
11	0,367	0,229	0,362	-10,5595
12	0,337	0,796	1,586	-5,55538

Na Figura 37 são apresentados a média dos valores da razão S/N para os parâmetros utilizados.

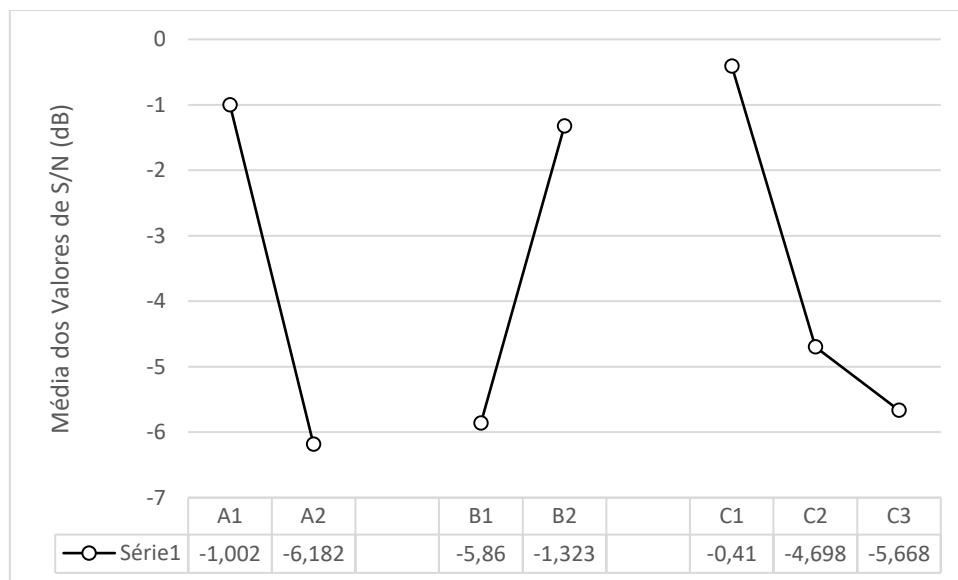


Figura 37 - Média dos Valores S/N dos parâmetros utilizados para Deslocamento

Observando a Figura 37 é possível retirar a melhor configuração para obtenção do maior deslocamento. Os parâmetros A1 B2 C1 formam a melhor

configuração, ou seja, cola número 1 de cianoacrilato, PDMS com 4mm de espessura e velocidade de ensaio 1mm/min.

Foi realizada outra análise com a média dos valores da razão S/N para o deslocamento utilizando apenas os resultados obtidos com a cola de cianoacrilato, que pode ser observada na Figura 38.

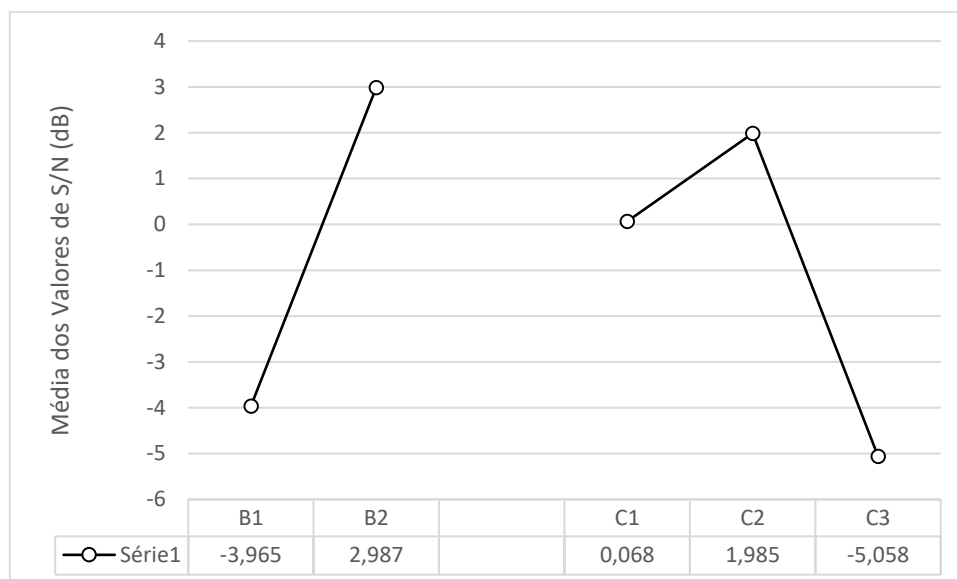


Figura 38 - Média dos Valores S/N dos parâmetros utilizados para Deslocamento - Cola 1

Através da Figura 38 é possível observar que para os ensaios com a cola de cianoacrilato a melhor configuração foi B2C2, onde tínhamos espessura de 4mm e velocidade de ensaio de 3mm/min.

Vale ressaltar que para todos os 12 ensaios de cisalhamento utilizando a máquina de universal, o material descolou sempre do mesmo lado superficial do PDMS. Quando o PDMS foi fabricado, a superfície que não estava em contato com o molde ficou mais lisa do que aquela em contato com o molde, isso faz a cola aderir de maneira menos eficiente em comparação com a superfície mais rugosa do corpo de prova.

Outro resultado observado é o comportamento do ensaio em relação as variações de velocidade e espessura. Para espessura de 2mm o PDMS suportou uma força maior e deformação menor em comparação com o corpo de prova de 4mm.

### 5.3 Análise ANOVA

O objetivo da análise de variância é descobrir quais os parâmetros que mais influenciaram na força de ruptura e no deslocamento máximo. Nas tabelas, Df representa os graus de liberdade, SS a soma dos quadrados, MS a média dos quadrados e o Valor F é uma ferramenta estatística que verifica quais os parâmetros com maior influência na qualidade. O cálculo da ANOVA se deu pelo software Minitab 17.

A Tabela 19 representa a ANOVA para a Força.

Tabela 19 - ANOVA - Força

Análise de Variância - Força						
Grupo	DF	SS	MS	F-Valor	P-Valor	Contribuição
Cola	1	11301	11301,2	11,87	0,011	33,49%
Espessura	1	11867	11866,6	12,46	0,01	35,17%
Velocidade	2	3911	1955,6	2,05	0,199	11,59%
Erro	7	6667	952,5			19,76%
Total	11	33746				100,00%

Com a Tabela 7 é possível observar que o parâmetro que mais influenciou na força foi a espessura do PDMS, influenciando em 35,17%, seguido do tipo de cola com contribuição de 33,49%.

Uma análise ANOVA foi feita para os resultados obtidos com a cola de cianoacrilato, pois foi a cola que obteve resultados mais confiáveis, e pode ser observada na Tabela 20.

Tabela 20 - ANOVA - Força - Cola 1

Análise de Variância apenas para Cola 1 - Força						
Grupo	DF	SS	MS	F-Valor	P-Valor	Contribuição
Espessura	1	4903	4903,5	5,96	0,135	36,88%
Velocidade	2	6747	3373,6	4,1	0,196	50,74%
Erro	2	1645	822,6			12,37%
Total	5	13296				100,00%

Com a tabela 8 é possível observar que a velocidade teve uma maior contribuição para o resultado final da força quando comparado apenas os

resultados obtidos com a cola de cianoacrilato, com uma contribuição de 50,74% seguido da espessura do PDMS com 36,88%.

A Tabela 21 representa a ANOVA para o Deslocamento.

*Tabela 21 - ANOVA - Deslocamento*

Análise de Variância - Deslocamento						
Grupo	DF	SS	MS	F-Valor	P-Valor	Contribuição
Cola	1	0,5422	0,5422	1,81	0,22	14,54%
Espessura	1	0,7407	0,7407	2,48	0,159	19,86%
Velocidade	2	0,3545	0,1773	0,59	0,578	9,51%
Erro	7	2,0918	0,2988			56,09%
Total	11	3,7292				100,00%

Para o deslocamento temos que a espessura do PDMS foi o parâmetro que mais influenciou no deslocamento, com 19,86%, seguido do tipo de cola com 14,54%.

Uma nova ANOVA foi realizada para deslocamento levando em conta apenas os resultados obtidos com a cola de cianoacrilato, que pode ser observada na Tabela 22.

*Tabela 22 - ANOVA - Deslocamento - Cola 1*

Análise de Variância apenas para Cola 1 - Deslocamento						
Grupo	DF	SS	MS	F-Valor	P-Valor	Contribuição
Espessura	1	1,02507	1,02507	2	0,293	47,67%
Velocidade	2	0,09994	0,04997	0,1	0,911	4,65%
Erro	2	1,02522	0,51261			47,68%
Total	5	2,15023				100,00%

Novamente a espessura do PDMS foi o parâmetro com maior influência para o deslocamento, com contribuição de 47,67%, no caso da velocidade teve um pequeno impacto, com apenas 4,65% de contribuição.

## 5.4 Correlação Digital de Imagem

Após a avaliação dos diversos resultados obtidos, foi a vez de escolher uma configuração para novos ensaios com a correlação digital de imagem. Como

a cola número 1 de cianoacrilato foi a mais efetiva, ela foi escolhida para a realização dos novos ensaios, que foram feitos com PDMS de 2mm e 4mm de espessura e com velocidade de ensaio de 1mm/min. Utilizando a correlação digital de imagem é possível avaliar a deformação do objeto desde o início até o final do ensaio através da avaliação de imagens. A escolha da velocidade de ensaio de 1mm/min foi para a obtenção de mais imagens e assim um melhor resultado.

O gráfico de força por deslocamento para o PDMS de 2mm está presente na Figura 39.

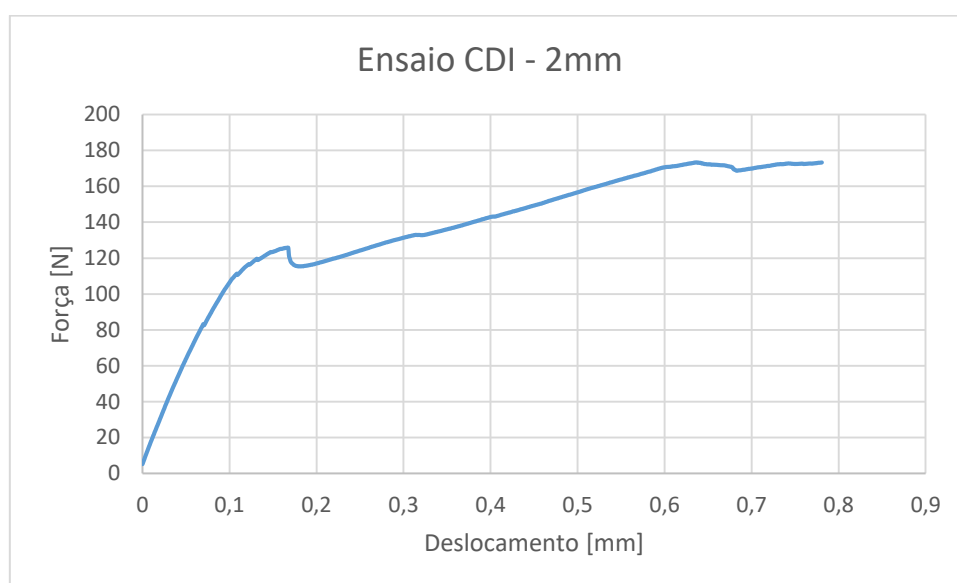


Figura 39 - Força x Deslocamento ensaio para CDI - 2mm

Observando o gráfico é possível perceber que o PDMS de 2mm de espessura atingiu um deslocamento máximo de 0,781mm com uma força de 173,302N o que o caracteriza como um material hiperelástico.

Recorrendo ao equipamento de correlação digital de imagem é possível observar alguns dados mais detalhados do comportamento do PDMS durante o ensaio. Na Figura 40 é possível observar o tensor gradiente de deformação, o que indica o Epsilon ( $\epsilon$ ), quando se usa esta função no software ele cria uma representação de análise, neste caso o software calcula as deformações nas direções X e Y sempre em coordenadas de material. Coordenada de material são sistemas de coordenadas locais que se movem junto com o material, assim cada ponto no material possui seu próprio sistema de coordenadas.

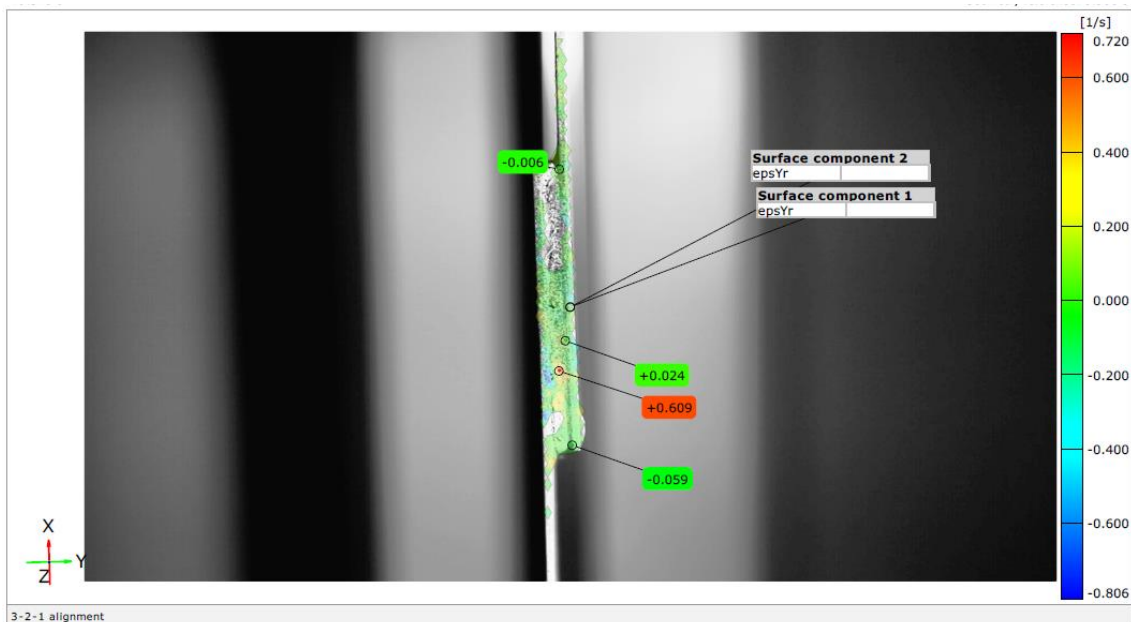


Figura 40 - CDI - Epsilon (Y) para PDMS com 2mm de espessura

Outro dado obtido com o software GOM Correlate 2018 foi também a distribuição da tensão equivalente de Von Mises, que observa o comportamento do objeto durante o ensaio. Tensão equivalente é comumente expressa como tensão verdadeira, valores dentro do material podem ser calculados apenas com suposições adicionais, como exemplo, consistência de volume. O software GOM determina a tensão equivalente com Von Mises  $\varphi_M$ . A tensão equivalente obtida para o PDMS de 2mm antes da ruptura pode ser observada na Figura 41.

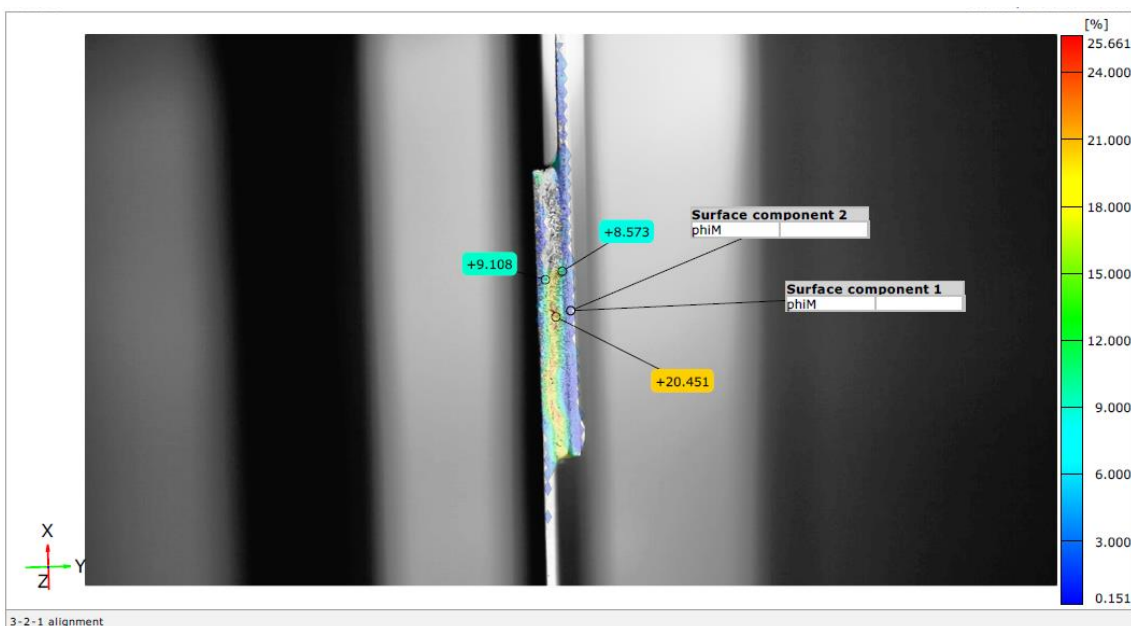


Figura 41 - CDI - Tensão equivalente de Von Mises para PDMS com 2mm de espessura

É interessante observar que a maior tensão equivalente ocorre no centro do material, o que sugere que sua ruptura ocorra no centro, porém na prática isso não ocorre, porque ocorre o descolamento entre a cola e o PDMS. Outra observação, foi que a tensão do lado esquerdo do PDMS foi ligeiramente maior, sendo que o lado esquerdo foi o lado que estava fixo na máquina de tração.

Por fim, é feita uma avaliação do deslocamento, o software faz com que seja possível a obtenção do deslocamento ponto a ponto do objeto, mostrado que, neste caso, o lado direito que estava sendo tracionado para realização do ensaio, por isso tendo um deslocamento maior em comparação ao lado esquerdo que estava fixo. A distribuição de deslocamento para o PDMS de 2mm pode ser observada na Figura 42.

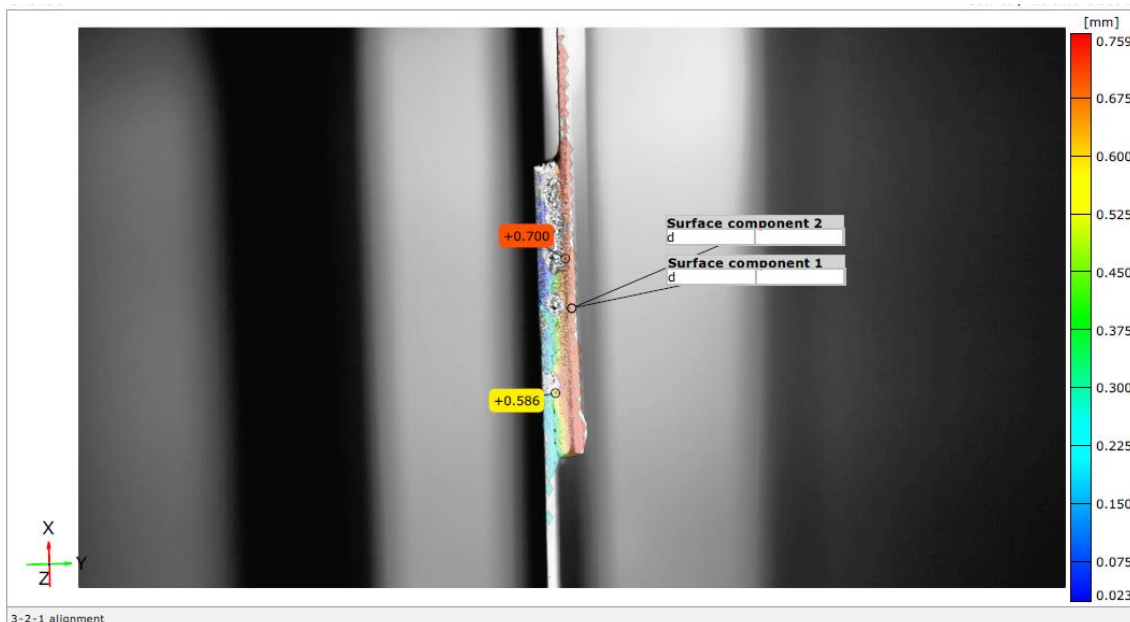


Figura 42 - CDI - Deslocamento do PDMS com 2mm de espessura

Vale ressaltar que o resultado de deslocamento obtido através do software GOM Correlate está de acordo com o deslocamento obtido na máquina de tração, que foi de 0,7mm o que demonstra a precisão do software mesmo sendo um método simples.

O gráfico de força por deslocamento para o PDMS de 4mm está presente na Figura 43.

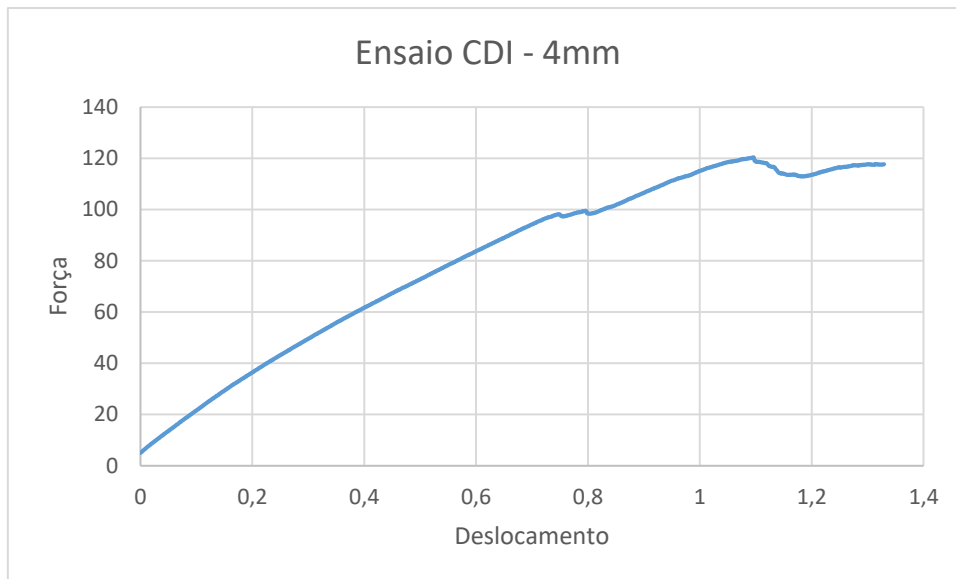


Figura 43 - Força x Deslocamento ensaio para CDI - 4mm

Observando o gráfico é possível perceber que o PDMS de 4mm de espessura atingiu um deslocamento máximo de 1,329mm com uma força de 117,636N o que o caracteriza como um material hiperelástico.

Recorrendo novamente ao equipamento de correlação digital de imagem, agora com as imagens obtidas para o PDMS de 4mm, é possível observar alguns dados mais detalhados do comportamento do material durante o ensaio. Na Figura 44 é possível observar o tensor gradiente de deformação, o que indica o Epsilon ( $\epsilon$ ) para 4mm, o software calcula as deformações nas direções X e Y sempre em coordenadas de material. Coordenada de material são sistemas de coordenadas locais que se movem junto com o material, assim, cada ponto no material possui seu próprio sistema de coordenadas.

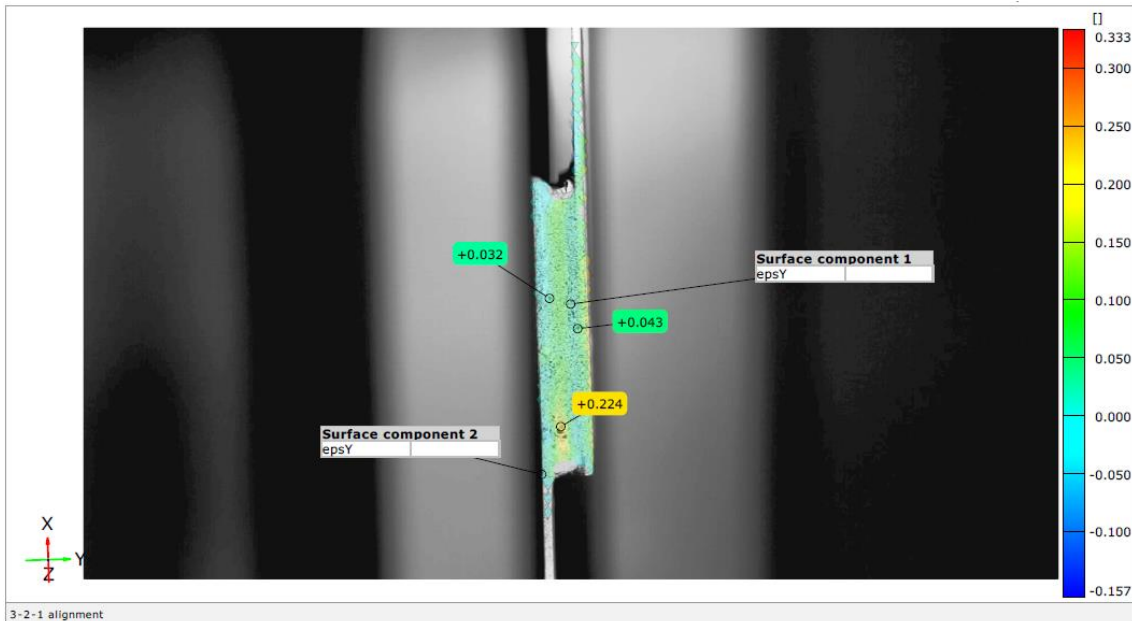


Figura 44 CDI - Epsilon (Y) para PDMS com 4mm de espessura

O cálculo da tensão equivalente de Von Mises também foi calculada a partir do software GOM Correlate 2018 para o PDMS com espessura de 4mm. O resultado obtido a partir do software apresenta a progressão de tensão durante todo o ensaio, de foto em foto, desde o repouso até a ruptura. A tensão equivalente obtida para o PDMS de 2mm antes da ruptura pode ser observada na Figura 45.

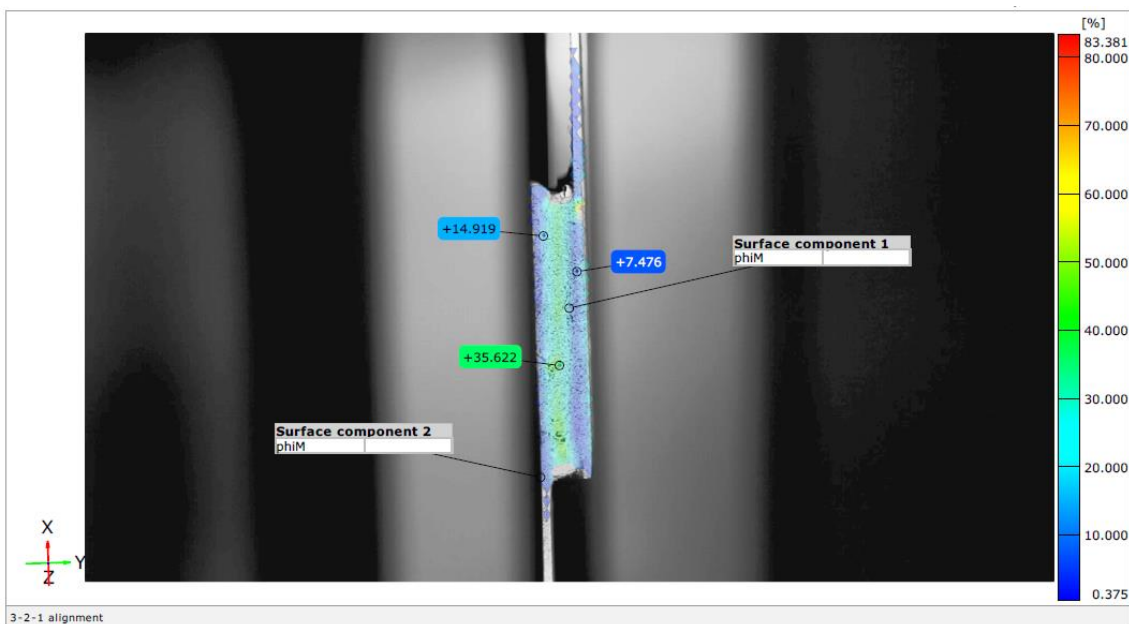


Figura 45 - CDI - Tensão equivalente de Von Mises para PDMS com 4mm de espessura

Ao observar os resultados obtidos para tensão equivalente de Von Mises vemos que novamente a maior tensão ocorreu no centro do PDMS o que implica que ele iria se romper ao centro, porém a cola se soltou novamente. Para a análise de 4mm pode se observar o mesmo comportamento do ensaio de 2mm, onde o lado esquerdo do PDMS teve uma tensão maior que o lado direito.

Após a avaliação da tensão de Von Mises, é feita uma avaliação do deslocamento para o PDMS de 4mm de espessura. A Figura 46 mostra o campo de deslocamento para o ensaio com o PDMS com 4mm de espessura, vale ressaltar que o lado direito estava sendo tracionado, e o lado esquerdo estava fixo, o que fica claro ao observar nessa figura.

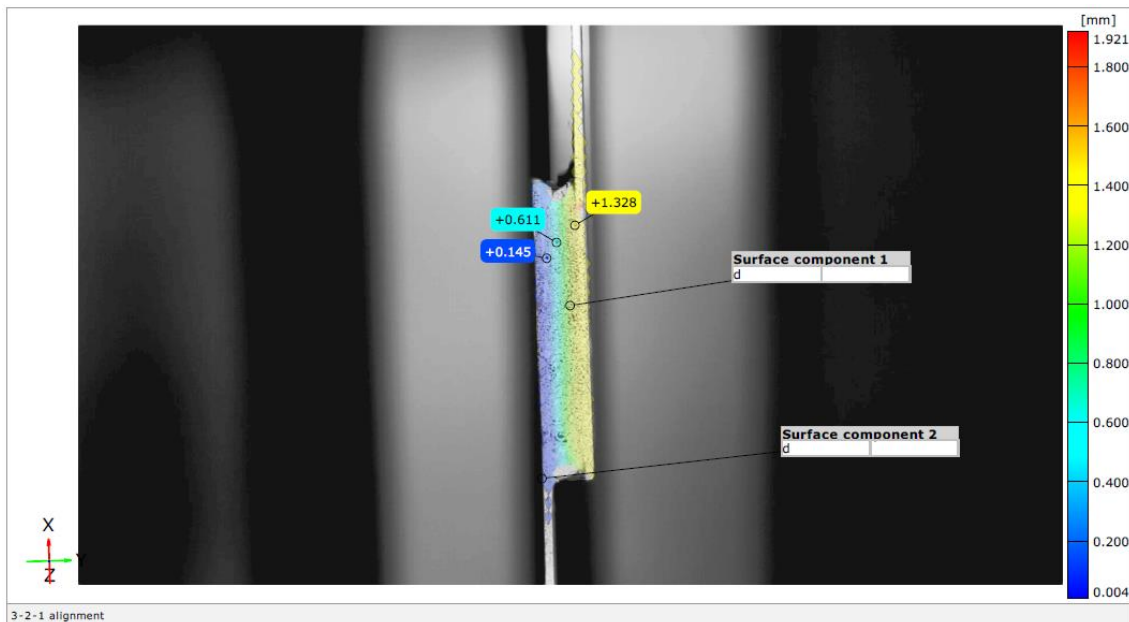


Figura 46 - CDI - Deslocamento do PDMS com 4mm de espessura

Novamente podemos comparar os dados obtidos com o software GOM Correlate com os dados obtidos a partir do ensaio de tração, neste caso o software obteve um deslocamento de 1,328mm o que é muito próximo ao obtido com o ensaio que era de 1,329mm.

## 6. Conclusões

O estudo mecânico de um material é muito importante para determinar sua aplicabilidade. A fim de caracterizar esse material esse estudo gerou dados para um ensaio de cisalhamento utilizando juntas de sobreposição simples e uma máquina de tração. O estudo se deu para duas colas diferentes, cianoacrilato e uma cola epóxi, utilizando corpos de prova de PDMS com duas espessuras diferentes, 2 e 4mm e foi realizado ensaios para três velocidades diferentes, 1, 3 e 5mm/min. Por fim mais 2 ensaios foram realizados para obtenção de imagens para correlação digital de imagem.

Para a força, os parâmetros A1 B2 C1 formam a melhor configuração, ou seja, cola número 1 de cianoacrilato, PDMS com 4mm de espessura e velocidade de ensaio 1mm/min.

Para o deslocamento, os parâmetros A1 B2 C1 formam a melhor configuração, ou seja, cola número 1 de cianoacrilato, PDMS com 4mm de espessura e velocidade de ensaio 1mm/min. Vale ressaltar que a velocidade teve pequena influência sobre o deslocamento, e na avaliação com os resultados obtidos apenas com a cola de cianoacrilato foi obtido um melhor deslocamento para a configuração B2 C2 onde a velocidade de ensaio era de 3mm/min.

A partir da análise de variância ANOVA o parâmetro que mais influenciou na força foi a espessura do PDMS, influenciando em 35,17%, seguido do tipo de cola com contribuição de 33,49%. A velocidade teve uma maior contribuição para o resultado final da força quando comparado apenas os resultados obtidos com a cola de cianoacrilato, com uma contribuição de 50,74% seguido da espessura do PDMS com 36,88%. Ou seja, a velocidade e espessura do PDMS tiveram grande impacto na força.

Para o deslocamento temos que a espessura do PDMS foi o parâmetro que mais influenciou no deslocamento, com 19,86%, seguido do tipo de cola com 14,54%. Com a segunda ANOVA realizada apenas com os resultados obtidos com a cola número 1 foi obtido que o parâmetro com maior influência para o deslocamento foi a espessura, com contribuição de 47,67%, no caso da velocidade teve um pequeno impacto, com apenas 4,65% de contribuição.

Os resultados obtidos dos ensaios evidenciaram um comportamento hiperelástico, assim como esperado. A cola que melhor aderiu foi a cola de cianoacrilato e foi observado que para maiores espessuras do PDMS temos um maior deslocamento, porém a força máxima antes da ruptura foi menor.

Com a correlação digital de imagem foi possível caracterizar o campo de deslocamento do PDMS durante o ensaio para as espessuras de 2 e 4mm, também apresentou que a distribuição de tensão equivalente de Von Mises para os dois casos obteve os maiores valores para o centro do PDMS supondo assim que sua ruptura ocorra no centro.

## **6.1 Trabalhos Futuros**

Os corpos de prova após o ensaio foram analisados e foi observado que o PDMS se soltou do aço sempre na superfície mais lisa, seria interessante um estudo de superfície do PDMS realizando vários ensaios com diferentes rugosidades, buscar algum tratamento de superfície para tornar o PDMS mais aderente. Fazer não só ensaios de cisalhamento, mas também ensaios de tração, com um corpo de prova apenas de PDMS, para uma melhor caracterização do material.

## Referências

- Abbasi, F., Mirzadeh, H., & Katbab, A. (2001). *Modification of polysiloxane polymers for biomedical applications : a review*. 1287(February). <https://doi.org/10.1002/pi.783>
- Almeida, P.M.C. e Magalhães, V. H.S. - “Polímeros”, *Relatório da Disciplina Ciências dos materiais*, Universidade Fernando Pessoa (UFP), pp 1-17, 2004.
- Anjos D., Revôredo E., Galembeck A., “Blendas de PDMS-PMMA para próteses faciais”, 9º Congresso Brasileiro de Polímeros, Brasil, 2007.
- Banea, M., *et al.*, *Mechanical Characterization of Flexible Adhesives*, 2009.
- Beer F., Johnston E., and Dewolf J., *Mecânica dos Materiais*. 2003.
- Bergveld, P., Lötters, J. C., Olthuis, W., & Veltink, P. H. (1997). The mechanical properties of the rubber elastic polymer polydimethylsiloxane for sensor applications. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 7(3), 145. Retrieved from <http://stacks.iop.org/0960-1317/7/i=3/a=017>
- Bhattacharya, S., Datta, A., Berg, J. M., & Gangopadhyay, S. (2005). *Studies on Surface Wettability of Poly ( Dimethyl ) Siloxane ( PDMS ) and Glass Under Oxygen-Plasma Treatment and Correlation With Bond Strength*. 14(3), 590–597.
- Bhuiyan A. R. and Ahmed E. – “Analytical Expression for Evaluating Stressdeformation Response of Rubber Layers Under Combined Action of Compression and Shear”, *Construction and Building Materials* 21, 1860-1868, 2007.
- Bruck, A., McNeil, R., Sutton, M., Peters, H., “Digital Image Correlation Using Newton-Raphson Method of Partial Differential Correction”, *Experimental Mechanics*, 29, 261-267 (1989)
- Callister, W. D. - *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 5ª Edição, LTC Editora, 2002.
- Cardoso, C., Fernandes, C. S., Lima, R., & Ribeiro, J. (2018). *Biomechanical analysis of PDMS channels using different hyperelastic numerical constitutive models*. 90, 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2018.04.007>
- Cerqueira, C., *et al.*: *Caracterização Mecânica do Polidimetilsiloxano (PDMS) usado em microdispositivos biomédicos*, Projeto de licenciatura, Instituto Politécnico de Bragança, 2010.
- Challa, G. – *Polymer Chemistry – An Introduction*. Ellis Horwood, London, 1993. ISBN 0-13-682519-2

- Chen F., Chen X., Xie X., Feng X., and Yang L., “Full-field 3D measurement using multi-camera digital image correlation system,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 51, no. 9, pp. 1044–1052, 2013.
- Cherney, E. A. (2005). Silicone Rubber Dielectrics Modified by Inorganic Fillers for Outdoor High Voltage Insulation Applications. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 12(6), 1108–1115.  
<https://doi.org/10.1109/TDEI.2005.1561790>
- Destrade M., Gilchrist M. D., Prikazchikov D. A., Saccomandi G.– “Surface Instability of Sheared Soft Tissues”, *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 130, December 2008.
- Destrade M., Murphy J. G., Saccomandi G. – “Simple shear is not so simple”, *International Journal of Non-Linear Mechanics* 47, 210-214, 2012.
- Dutra K., “Resistência dos Materiais” 2010
- Fowlkes W. Y. and Creveling C. M., *Engineering Methods for Robust Product Design: Using Taguchi Methods in Technology and Product Development*. Reading, Massachusetts, 1995.
- Gomes P. J. F., “Resistência dos materiais”. 2015
- Graiver D., Farminer K. W., and Narayan R., “A Review of the Fate and Effects of Silicones in the Environment,” *J. Polym. Environ.*, vol. 11, no. 4, pp. 129–136, 2003.
- Hemmilä, S., Cauch-rodriíguez, J. V, Kreutzer, J., & Kallio, P. (2012). Applied Surface Science Rapid , simple , and cost-effective treatments to achieve long-term hydrophilic PDMS surfaces. *Applied Surface Science*, 258(24), 9864–9875.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.06.044>
- Holzapfel G.A., *Nonlinear Solid Mechanics: A Continuum Approach For Engineering*, John Wiley & Sons Ltd., 2008.
- Holzapfel, Gerhard A. - “Nonlinear Solid Mechanics - A Continuum Approach for Engineering”, John Wiley & Sons Ltd, 2000.
- Hum, Phillip W. *Exploration of Large-scale Manufacturing of Polydimethylsiloxane (PDMS) Microfluidic Devices*. Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology. 2006.
- Jerabek M., Major Z., and Lang R. W., “Strain determination of polymeric materials using digital image correlation,” *Polym. Test.*, vol. 29, no. 3, pp. 407–416, 2010.

- Khanafer, Khalil, et al. *Effects of strain rate, mixing ratio, and stress–strain definition on the mechanical behavior of the polydimethylsiloxane (PDMS) material as related to its biological applications*. *Biomedical Microdevices*. s.l. : Springer, 2009, Vol. 11.
- Krogh, M., & Asberg, P. (2003). *My little guide to softlithography*. Retrieved from [http://www.ifm.liu.se/applphys/biorgel/education/mikrosystem-nanobiologi-t/material-samt-tipstricks/Soft\\_Lithography\\_for\\_Dummies.pdf](http://www.ifm.liu.se/applphys/biorgel/education/mikrosystem-nanobiologi-t/material-samt-tipstricks/Soft_Lithography_for_Dummies.pdf)
- Kuncova-kallio, J., & Kallio, P. J. (2006). PDMS and its Suitability for Analytical Microfluidic Devices. *2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2486–2489. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2006.260465>
- Lahellec N., Mazerolle F., Michel J.C., *Mech J. Phys. Solids* 52 (2004) 27–49.
- Lee W.S., Yeo K.S., Adriyana A., Shee Y.G., Mahamd Adikan F.R. – “*Effect of cyclic compression and curing agent concentration on the stabilization of mechanical properties of PDMS elastomer*”, *Journal Elsevier*, 2016.
- Lopez-Pamies O., C. R. *Mecanique* 338 (2010) 3–11.
- Marcelo A., “*Despolimerização do polimetacrilato de metilo utilizando como catalisadores argilas pilarizadas*,” 2007
- Martin, S., & Bhushan, B. (2017). Journal of Colloid and Interface Science poly ( dimethylsiloxane ) ( PDMS ) surfaces. *Journal of Colloid And Interface Science*, 488, 118–126. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.10.094>
- Mendonça B., Ribeiro J., Hernâni L., Martins P., “*Desenvolvimeto de um método híbrido para a caracterização dos campos de deslocamento e de deformações em materias hiper-elásticos*” Dissertação de mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, 2013.
- Meunier L. et. Al. – “*Mechanical Experimental Characterisation and Numerical Modelling of an Unfilled Silicone Rubber*”, *Polymer Testing* 27, 765-777, 2008.
- Minitab®, LLC (2019). *Minitab* ®. Acedido em 09 de setembro de 2019, no *Web Site* do Minitab: <https://www.minitab.com/pt-br/>
- Minitab®, LLC (2019). *O que é ANOVA? – suporte ao Minitab®18*. Acedido em 09 de setembro de 2019, no *Web Site* do Minitab: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/basics/what-is-anova/>
- Mooney M., *J. Appl. Phys.* 35 (1) (1964) 23–26.

- Moreira, D. C., & Nunes, L. C. S. (2013). Comparison of simple and pure shear for an incompressible isotropic hyperelastic material under large deformation. *Polymer Testing*, 32(2), 240–248. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2012.11.005>
- Moreira N. R. P., “*Estudo de várias propriedades mecânicas do polidimetilsiloxano (PDMS) usado em dispositivos biomédicos,*” 2013.
- Morestin F. and Brunet M., “Various experimental applications of digital image correlation method” *Proceedings of CMEM 97, Rhodes (Computador methods and experimental measurements VIII)*; 1997, pp. 45-58
- Nunes, L. C. S. (2011). Mechanical characterization of hyperelastic polydimethylsiloxane by simple shear test. *Materials Science & Engineering A*, 528(3), 1799–1804. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.025>
- Nunes L. C. S., “*Mechanical characterization of polytetrafluoroethylene polymer using full-field displacement method,*” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 49, no. 5, pp. 640–646, 2011.
- Ogden R.W., *Non-Linear Elastic Deformations*, Dover Publications, Mineola, NY, 1997.
- Parsons E. M., Boyce M. C., Parks D. M., “*An experimental investigation of the large-strain tensile behavior of neat and rubber-toughened polycarbonate,*” *Polymer*, vol. 45, pp. 2665–2684, 2004.
- Parsons E. M., Boyce M. C., Parks D. M., and Weinberg M., “*Three-dimensional large-strain tensile deformation of neat and calcium carbonate-filled high-density polyethylene,*” *Polymer*, vol. 46, pp. 2257–2265, 2005.
- Pascual-francisco J. B., Israel L., Gallardo-hern E. A., Barrag O., and Susarrey-huerta O., “*Determination of creep compliance, recovery and Poisson’s ratio of elastomers by means of digital image correlation (DIC),*” *Polymer Testing*, vol. 59, pp. 245–252, 2017.
- Paulo Jorge Teixeira de Sousa, “*Estudo e otimização de estruturas em PDMS para dispositivos microfluídicos Paulo Jorge Teixeira de Sousa Setembro de 2011 UMinho | 2011 Estudo e otimização de estruturas em PDMS para dispositivos,*” 2011.
- Pereira, Daniel A. B. – *Estudo comparativo da vida útil das ferramentas e acabamentoo superficial para diferentes ferramentas de fresagem.* Portugal: Instituto Politécnico de Bragança, 2017. Tese de mestrado em Engenharia Industrial.

- Pravato W. S. – *Caracterização do hiperelástico Polidimetilsiloxano (PDMS) com ensaio de cisalhamento em junta de sobreposição simples*. Portugal: Instituto Politécnico de Bragança, 2018. Tese de Graduação em Engenharia Mecânica.
- Réthoré J., Limodin N., Buffière J., and Roux S., “*Three-dimensional analysis of fatigue crack propagation using X-Ray tomography , digital volume correlation and extended finite element simulations,*” *Procedia IUTAM*, vol. 4, pp. 151–158, 2012.
- Rev E. C. V and Generally S., “*Blendas de pdms-pmma para próteses faciais.*”
- Ribeiro J., Hernâni L., Mendonça B., Martins P., “*Determinação do campo de deslocamento de tecidos biológicos hiperelásticos*” *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, vol. 16, pp. 37-49, 2012.
- Roy R. K., *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers, 1990.
- Ribas L. M., “*Implante experimental de substituto arterial de polidimetilsiloxano com reforço de tecido de poliéster em coelhos*”, Faculdade de medicina da universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- Santos, David P.S. – *Desenvolvimento de dispositivos microfluídicos 3D em papel para utilização em biossensores*. Portugal: Faculdade de ciências e tecnologia universidade nova de Lisboa, 2013. Tese de mestrado em Engenharia Biomédica.
- Schneider F., Fellner T., Wilde J., and Wallrabe U., “*Mechanical properties of silicones for MEMS*”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 18, Jun 2008.
- Segal V. M. - “*Severe Plastic Deformation: Simple Shear versus Pure Shear*”, *Materials Science and Engineering A338*, 331-344, 2002.
- Seljan, Michelle C. - *Polímeros como materiais de engenharia: plástico substituindo o metal na produção de componentes mecânicos e estruturais*. Rio de Janeiro: Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2016. Tese de Graduação em Engenharia Mecânica.
- Sharpe, W.N. *Handbook of Experimental Solid Mechanics*, Springer Science and Business Media, LLC New York, 2008.
- Silva L. F. M., “*Comportamento dos Materiais*” Publindústria, 2012
- Smith, W.F. - “*Princípio de Ciência e Engenharia dos Materiais*”. 3a edição McGRAW-HILL. Alfragide, 1996.
- Souza, Andrews V. A. – *Caracterização de materiais hiperelásticos utilizando técnicas ópticas para a indústria biomédica*. Portugal: Instituto Politécnico de Bragança, 2017. Tese de Graduação em Engenharia Mecânica.

- Staudinger, H. (1963). *O que são polímeros e porque são interessantes ?* 1–3.
- Struik L. C. E. and Schöen L. A. A., “*Recycling and re-use of polymeric materials; the limited potential of biodegradables,*” in *Macromolecular Symposia*, 2000, vol. 152, no. 1
- Sutton, M., Wolters, J., Peters, H., Ranson, F., McNeil, R., “*Determination of Displacements Using an Improved Digital Correlation Method*”, *Image and Vision Computing*, 1, 133–139 (1983)
- Taguchi G., Chowdhury S., and Wu Y., *Taguchi’s Quality Engineering Handbook*. Canada: John Wiley & Sons, Inc, 2004.
- Telles, Pedro Carlos da Silva – “*Materiais para equipamentos de processo*”, 6ª edição, Rio de Janeiro: Interciência, 2003.
- Timoshenko S. P., “*Livro - Mecânica dos sólidos Timoshenko - Vol 1.pdf.*” p. 255, 1983.
- Timoshenko, S. and Goodier, J.N. - “*Theory of Elasticity*”, McGraw-Hill Book Company, 1951.
- Xavier S. L. S., “*Osseopercepção em pacientes reabilitados com próteses implantossuportadas*”, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Santos G. C. M., “*Redução da biocarga e garantia de esterilidade em implantes mamários de silicone*”, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- Yang, C., & Yuan, Y. J. (2016). Applied Surface Science Investigation on the mechanism of nitrogen plasma modified PDMS bonding with SU-8. *Applied Surface Science*, 364, 815–821. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.12.153>
- Zhao, J., Sheadel, D. A., & Xue, W. (2012). Sensors and Actuators A : Physical Surface treatment of polymers for the fabrication of all-polymer MEMS devices. *Sensors & Actuators: A. Physical*, 187, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.08.018>