

**Estudo numérico de juntas adesivas com materiais  
hiperelásticos**

**Fábio Francisco Soeiro Amaral**

Relatório da dissertação Final apresentado à

**Escola Superior de tecnologia e Gestão**

**Instituto Politécnico de Bragança**

Para Obtenção do Grau Mestre Em

**Engenharia Industrial**

**Área de Especialização em Engenharia Mecânica**

Setembro 2018





**Estudo numérico de juntas adesivas com materiais  
hiperelásticos**

**Fábio Francisco Soeiro Amaral**

Relatório da dissertação Final apresentado á

**Escola Superior de tecnologia e Gestão**

**Instituto Politécnico de Bragança**

Para Obtenção do Grau Mestre Em

**Engenharia Industrial**

**Área de Especialização em Engenharia Mecânica**

Orientador: Professor Doutor João Pinto Castro Ribeiro

Setembro 2018





“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância”.

(John F. Kennedy)



# Agradecimentos

Ao Contrário do esperado começo por agradecer aos mais importantes, aqueles que tornaram possível todo o trajeto necessário para chegar até esta etapa, aos meus Pais, José Amaral e Manuela Soeiro, um enorme Obrigado.

Ao professor João Ribeiro, Orientador da presente dissertação, pela sua dedicação disponibilidade e incentivo que apresentou durante todo o tempo de realização deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas de faculdade que me acompanharam neste bonito percurso acadêmico, muito obrigado pelo companheirismo e amizade.

À minha namorada, Jéssica Videira, pela compreensão, dedicação e motivação prestada ao longo de todo o percurso.

Por último, às minhas queridas irmãs, Tânia Amaral e Simone Amaral, pela partilha de conhecimentos e por sempre acreditarem nas minhas capacidades.



# Resumo

A tecnologia de ligação por adesivos tem vindo a ser utilizada ao longo de várias décadas, permitindo solucionar diversos problemas associados a técnicas mais tradicionais, como soldadura a rebitagem ou as ligações aparafusadas. Trata-se de uma alternativa viável devido a diversos fatores como o menor peso estrutural, menor custo de fabricação e a capacidade de união de diferentes materiais.

O crescente recurso a materiais compósitos em diversas indústrias, nomeadamente a aeronáutica e naval levaram ao conseqüente aumento da aplicação de juntas adesivas, por serem indicadas como forma de união destes materiais, onde é de enaltecer a sua elevada resistência á fadiga.

Este trabalho pretende estudar a influencia de vários fatores da simulação na avaliação do estado de tensão nas juntas adesivas com matérias hiperelásticos.

O material hiperelástico em estudo foi o polidimetilsiloxano (PDMS).

Para isso, inicialmente foi necessário efetuar alguns ensaios experimentais para caracterizar o comportamento mecânico do material. Com base nesses resultados foram realizadas várias simulações numéricas com os modelos constitutivos mais comuns na simulação de materiais hiperelásticos, variando fatores numéricos e parâmetros das juntas adesivas.

Na análise feita foi utilizado um código de elementos finitos comercial denominado ANSYS.

No final os resultados obtidos da simulação foram comparados utilizando para o efeito gráficos de fácil perceção, a fim de ser notória a influencia dos parâmetros no estado de tensão das juntas adesivas.

**Palavras-Chave:** PDMS, material hiperelástico, juntas adesivas, simulações numéricas, estado de tensão.

# Abstract

The technology of engineering adhesives has been used over several decades, in order to solve the problems related to more traditional technical solutions, such as riveting weld or bolted joints.

This is a viable alternative due to several factors such as the lowest structural weight, the lowest-cost production, and the bonding capacity of different materials.

The increasing use of composite materials in several industries, namely the aircraft and marine engineering, have led to a consequent increase in adhesive joints implementation, because they are considered the joining of these materials, whose high resistance to fatigue should be validated.

This study aims at studying the influence of a number of factors regarding the simulation in the condition assessment of stress fields in adhesive joints with hyper-elastic materials. The hyper-elastic material was the polydimethylsiloxane (PDMS).

To do this, it was necessary to perform some experimental tests to characterize the mechanical behaviour of the material.

Based in these results, numerical simulations have been performed, using the most common constitutive models in the hyper-elastic materials simulation, with numeric variables and adhesive joints parameters.

The assessment used a code of commercial finite elements named ANSYS.

In the end, the results obtained were compared using very easy to read intuitive charts with a view to laying down the clear parameters influence of the stress state of adhesive joints.

**Keywords:** PDMS, hyper-elastic materials, adhesive joints, numerical simulations, stress state.



# Índice

Agradecimentos .....	iv
Resumo .....	vi
Abstract.....	vii
Índice de Figuras .....	xii
Índice de Tabelas .....	xvi
1.Introdução.....	1
1.1 Estado da arte.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura.....	2
2.Fundamentos Teóricos.....	4
2.1 Ligações adesivas .....	4
2.1.1 Resistência das juntas .....	6
2.1.2 Esforços e tipos de rotura em juntas adesivas .....	10
2.1.3 Tipos de juntas adesivas .....	15
2.1.4 Adesivos .....	20
2.2 Polímeros.....	21
2.2.1 Polidimetilsiloxano (PDMS) .....	24
2.3 Determinação das propriedades do adesivo.....	25
2.3.1 Ensaio de tração/ curva tensão-deformação .....	26
2.4 Modelos Constitutivos.....	29
2.4.1 Modelo de <i>Mooney-Rivlin</i> .....	29
2.4.2 Modelo de <i>Ogden</i> .....	30
2.4.3 Modelo de <i>Yeoh</i> .....	30
2.5 Método Numérico.....	31
3 Procedimento Experimental .....	32

3.1	Elaboração dos provetes de ensaio .....	32
3.2	Ensaio de tração.....	35
3.3	Estudo Numérico .....	37
3.3.1	Apresentação da geometria e das variáveis da simulação .....	37
3.3.2	Desenvolvimento do estudo numérico .....	39
4	Análise e Discussão de Resultados.....	45
4.1	Simulação 1 .....	46
4.2	Simulação 2 .....	47
4.3	Simulação 3 .....	48
4.4	Simulação 4 .....	50
4.5	Simulação 5 .....	52
4.6	Simulação 6 .....	53
4.7	Simulação 7 .....	55
4.8	Simulação 8 .....	56
4.9	Simulação 9 .....	58
5	Conclusões e propostas de trabalhos futuros.....	61
5.1	Conclusões.....	61
5.2	Propostas de trabalhos futuros.....	62
6	Referências .....	63
	Anexo A: Propriedades do adesivo (Sylgard 184) e do Substrato (Alumínio 6061) .....	67
	Anexo B: tensões de corte simulação 1 modelo de Ogden.....	69
	Anexo C: Tensões de corte simulação 2 modelo de Ogden .....	70
	Anexo D: Tensões de corte simulação 3 modelo de Ogden .....	71
	Anexo E: Tensões de corte simulação 4 modelo de Ogden .....	72
	Anexo F: Tensões de corte simulação 5 modelo de Ogden.....	73
	Anexo G: Tensões de corte simulação 6 modelo de Ogden .....	74

Anexo H: Tensões de corte simulação 7 modelo de Ogden .....	75
Anexo I: Tensões de corte simulação 8 modelo de Ogden.....	76
Anexo J: Tensões de corte simulação 9 modelo de Ogden .....	77
Anexo K: Influência da espessura para o mesmo deslocamento aplicado (3mm) modelo de Ogden.....	78

# Índice de Figuras

Figura 1- Estrutura de fuselagem reforçada [6].....	5
Figura 2-Esquema da distribuição das tensões para diferentes espessuras de adesivo [4]. .....	8
Figura 3-Método de previsão da resistência de juntas baseado na cedência do adesivo e do aderente [13].....	9
Figura 4-Junta de sobreposição simples com um filete de adesivo [7]. .....	9
Figura 5-Diferentes geometrias de junta com o objetivo de melhorar a resistência das juntas: (a) de sobreposição com chanfro exterior, (b) de topo com chanfro interno, (c) de topo em degrau [14].....	10
Figura 6- Esforço de tração [7].....	11
Figura 7-Esforço de compressão [7].....	11
Figura 8-Tensões de corte [7].....	12
Figura 9-Efeito do comprimento e largura de sobreposição na resistência ao corte [5].	12
Figura 10-Esforço de clivagem [7].....	13
Figura 11-Esforço de arrancamento [7].....	13
Figura 12-Modos de rotura em juntas adesivas [5].. .....	14
Figura 13-Exemplos de juntas topo a topo [4]. .....	15
Figura 14-Exemplos de juntas de sobreposição [2].....	16
Figura 15-Exemplos de juntas de tira [2].. .....	17
Figura 16-Exemplos de juntas cilíndricas:(a) juntas para varões e (b) juntas para tubos [2]. .....	17
Figura 17-Exemplos de juntas em T [4]. .....	18
Figura 18-Exemplos de juntas de canto [4].....	19
Figura 19-Configuração de reforços para minimizar:(a) o arrancamento e (b) a clivagem [4].. .....	20

Figura 20-Divisão do tipo de adesivos dependendo do seu desempenho [4].	21
Figura 21-Comportamento de tensão-deformação para três tipos de polímeros: frágeis (A), plásticos (B) e elastoméricos (C) [19].	23
Figura 22-Estrutura química do PDMS [21].	25
Figura 23-Geometria e dimensões (mm) dos provetes de acordo com a norma [22].	26
Figura 24-Curva tensão-deformação [24].	27
Figura 25-Representação gráfica da lei de Hooke [25].	28
Figura 26- PDMS pré polímero e agente de cura.	32
Figura 27- Balança eletrônica.	33
Figura 28-Exsiccador ligado a bomba de vácuo.	33
Figura 29-Desenho técnico do provete padronizado [22].	34
Figura 30-Molde em aço para os provetes de ensaio.	34
Figura 31-Provetes de ensaio.	35
Figura 32-Provete de Ensaio devidamente marcado e colocado na máquina de tração.	35
Figura 33-Imagem ilustrativa do software associado á máquina de tração.	36
Figura 34-Curva Tensão-Deformação do PDMS.	37
Figura 35-Geometria da Junta	38
Figura 36-Figura ilustrativa dos pontos chave, linhas e áreas da geometria.	41
Figura 37-Escolha das propriedades dos materiais em questão.	42
Figura 38-Estrutura da malha junto ao adesivo.	43
Figura 39-Ilustração das condições de fronteira e deslocamentos aplicados.	43
Figura 40- Marcação dos três caminhos: a) Fronteira lateral esquerda, c) Linha de centro do adesivo, b) Fronteira lateral direita.	45
Figura 41-Tensões de corte (Simulação 1, Caminho a).	46
Figura 42-Tensões de corte (S.1, C.c).	46
Figura 43-Tensões de corte (S.1, C.b).	47
Figura 44-Tensões de corte (S.2, C.a).	47

Figura 45-Tensões de corte (S.2, C.c). .....	48
Figura 46-Tensões de corte (S.2, C.b). .....	48
Figura 47-Tensões de corte (S.3, C.a). .....	49
Figura 48-Tensões de corte (S.3, C.c). .....	49
Figura 49-Tensões de corte (S.3, C.b). .....	49
Figura 50-Tensões de corte (S.4, C.a). .....	50
Figura 51-Tensões de corte (S.4, C.c). .....	51
Figura 52-Tensões de corte (S.4, C.b). .....	51
Figura 53-Tensões de corte (S.5, C.a). .....	52
Figura 54-Tensões de corte (S.5, C.c). .....	52
Figura 55-Tensões de corte (S.5, C.b). .....	53
Figura 56-Tensões de corte (S.6, C.a). .....	53
Figura 57-Tensões de corte (S.6, C.c). .....	54
Figura 58-Tensões de corte (S.6, C.b). .....	54
Figura 59-Tensões de corte (S.6, C.b). .....	55
Figura 60-Tensões de corte (S.7, C.c). .....	55
Figura 61-Tensões de corte (S.7, C.b). .....	56
Figura 62-Tensões de corte (S.8, C.a). .....	57
Figura 63-Tensões de corte (S.8, C.c). .....	57
Figura 64-Tensões de corte (S.8, C.b). .....	57
Figura 65-Tensões de corte (S.9, C, a). .....	58
Figura 66-Tensões de corte (S.9, C.c). .....	59
Figura 67-Tensões de corte (S.9, C,b). .....	59
Figura 68- Tensões de corte simulação 1 modelo de Ogden .....	69
Figura 69- Tensões de corte simulação 2 modelo de Ogden. ....	70
Figura 70- Tensões de corte simulação 3 modelo de Ogden. ....	71

Figura 71- Tensões de corte simulação 4 modelo de Ogden.....	72
Figura 72- Tensões de corte simulação 5 modelo de Ogden.....	73
Figura 73- Tensões de corte simulação 6 modelo de Ogden.....	74
Figura 74- Tensões de corte simulação 7 modelo de Ogden.....	75
Figura 75- Tensões de corte simulação 8 modelo de Ogden.....	76
Figura 76- Tensões de corte simulação 9 modelo de Ogden.....	77
Figura 77- Influência da espessura para o mesmo deslocamento aplicado (modelo de Ogden e caminho a).....	78
Figura 78- Influência da espessura para o mesmo deslocamento aplicado (modelo de Ogden, caminho c).....	78
Figura 79- Influência da espessura para o mesmo deslocamento aplicado (modelo de Ogden, caminho b). ....	79

# Índice de Tabelas

Tabela 1-Variaveis da simulação.....	39
Tabela 2-Coordenadas dos pontos chave da geometria.....	40
Tabela 3- Propriedades do Adesivo Sylgard 184 .....	67
Tabela 5- Propriedades Físicas de algumas ligas de alumínio .....	68

# Abreviaturas e Símbolos

## Lista de abreviaturas

PDMS	Polidimetilsiloxano
FRP	Fiber-reinforced plastic
JSS	Junta de sobreposição simples
ASTM	American Society of Testing an Materials
MEF	Método de Elementos Finitos

## Lista de Símbolos

T	Carregamento Transverso
N	Carregamento Normal
L	Comprimento do adesivo
t	Espessura do adesivo
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
Si	Símbolo químico silício
O	Símbolo químico oxigenio
H	Símbolo químico hidrogenio
E	Módulo de elasticidade
$\Psi$	Função de densidade de energia de deformação
$\sigma$	Tensão ( $N/m^2$ )
$\varepsilon$	Deformação especifica
$\alpha$	Parâmetros do material
$\mu$	Parâmetros do material
C	Constantes do Material



# 1.Introdução

## 1.1 Estado da arte

Os adesivos têm sido usados desde há muito séculos. No entanto, este método de ligação só evoluiu significativamente nos últimos 60 anos. Atualmente, as juntas adesivas são muito utilizadas em diversas indústrias devido a numerosas vantagens que estas têm em comparação com outros métodos de ligação existentes. Os adesivos são mais indicados quando não é recomendável proceder à perfuração da superfície, ou as superfícies a ligar são irregulares. O uso deste tipo de ligações é frequente na produção de estruturas de forma complexa, que não poderiam ou não seriam tão fáceis de produzir numa peça única, de modo que a união estrutural seja teoricamente tão resistente como o metal base. A resistência de uma ligação adesiva depende de vários fatores, como, por exemplo, os parâmetros geométricos, materiais utilizados na ligação (denominado de substratos) e as próprias características dos adesivos [1].

Os adesivos, normalmente, são divididos em dois grandes grupos, adesivos estruturais e não estruturais, sendo que um adesivo é estrutural quando a carga necessária para separar as duas superfícies é elevada, de tal modo, que o adesivo providencia a força principal da estrutura. Os adesivos não estruturais englobam borrachas sintéticas e colas de contacto [2].

Os polímeros têm sido muito requisitados em diversos segmentos industriais por serem elementos estruturais altamente deformáveis. Os materiais poliméricos compreendem os plásticos (termoplásticos e termoendurecíveis) e os elastómeros (borrachas). Devido à grande utilização de materiais hiperelásticos em projetos de engenharia, torna-se necessário ampliar o conhecimento do comportamento mecânico desses materiais [3]. Entre os polímeros destacam-se os elastómeros que possuem características mecânicas muito importantes. Neste contexto, para este trabalho, utilizou-se uma borracha de

silicone: o polidimetilsiloxano (PDMS). Este polímero pode ser classificado como um material hiperelástico, o qual se caracteriza por grandes deformações.

O PDMS tem como destaque um baixo custo e outras características como facilidade de fabricação, flexibilidade e transparência ótica, têm uma diversidade de aplicações: nanogeradores de energia sensores mecânicos, componentes eletrônicos e equipamentos medicinais. Para descrever o comportamento mecânico do material hiperelástico, pode ser usada a função densidade energia de deformação. Na literatura são propostos vários modelos de função densidade energia de deformação, usando a teoria da elasticidade finita. A maioria das formulações de função densidade energia de deformação é baseada nos modelos de *Mooney-Rivlin* e *Odgen*, os quais são referenciados para este trabalho.

## 1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como principais objetivos:

- Caracterização experimental das propriedades mecânicas do material hiperelástico cujo comportamento será simulado numericamente;
- Estudo dos principais modelos constitutivos de materiais hiperelásticos;
- Realização de várias simulações numéricas utilizando o software ANSYS, alterando parâmetros do adesivo e do carregamento estrutural;
- Avaliação dos resultados obtidos e posterior comparação para diferentes condições de simulação numérica.

## 1.3 Estrutura

A presente dissertação encontra-se estruturada na seguinte forma:

Capítulo 1 - Neste capítulo é apresentado o estado da arte bem como os principais objetivos do presente trabalho, e uma breve descrição da estrutura do mesmo.

Capítulo 2 – São apresentados os fundamentos teóricos relativos às ligações adesivas, sua caracterização e propriedades a ter em conta, esforços e modos de rotura a que estão normalmente associadas, configurações de juntas adesivas mais utilizadas, e caracterização dos tipos de adesivo. É também abordado o PDMS, bem como as suas propriedades mecânicas. Por último, fala-se na caracterização dos materiais, como é feita a partir da curva de engenharia, abordam-se os modelos constitutivos para os materiais hiperelásticos e uma breve síntese do Método de Elementos Finitos.

Capítulo 3 – São indicados os passos referentes ao procedimento experimental, para caracterização do PDMS, e são também demonstrados todos os aspetos referentes ao estudo numérico efetuado.

Capítulo 4 – Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos, resultantes da realização do estudo numérico.

Capítulo 5- São apresentadas neste capítulo as conclusões retiradas neste trabalho e as propostas para trabalhos futuros.

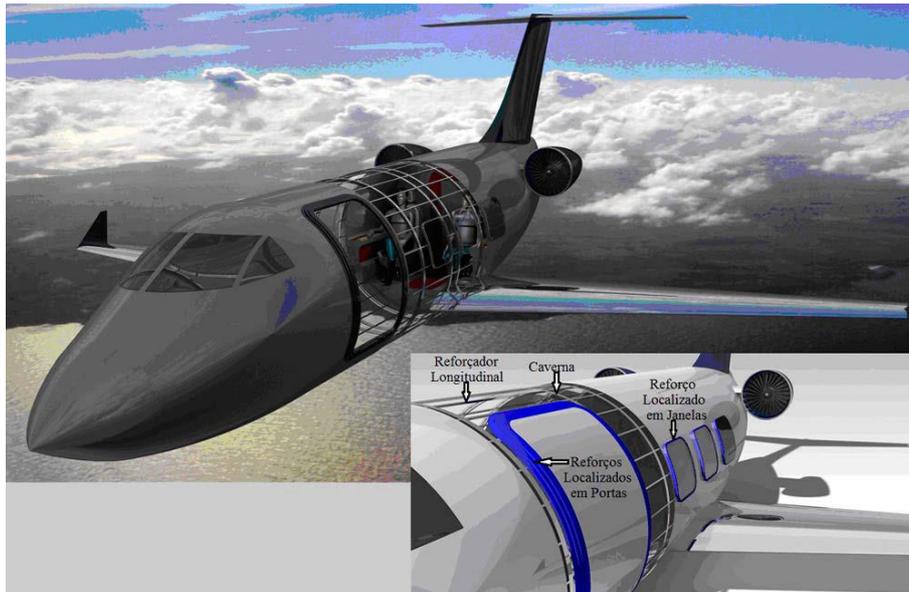
## **2.Fundamentos Teóricos**

### **2.1 Ligações adesivas**

Com o passar dos anos, os métodos de ligação de matérias têm vindo a sofrer algumas alterações, possuindo hoje em dia um vasto leque de escolhas apropriadas para cada tipo de ligação e também para o tipo de material que se pretende ligar. Este leque vai desde as ligações por parafusos, rebites ou soldadura, até ao método de ligação por intermedio de um adesivo. Cada um destes métodos de ligação tem as suas vantagens e desvantagens inerentes, não se podendo afirmar, em geral, qual o melhor ou pior em termos de eficiência de ligação, mas sim o melhor ou pior, mediante o tipo de estrutura que se pretende ligar, as restrições de acessibilidade das juntas ou os tipos de materiais em causa.

O incremento no uso de adesivos ficou a dever-se, em grande parte, ao crescimento das indústrias aeronáutica e naval devido ao elevado recurso de matérias compósitos, estando estas duas tecnologias muito associadas [4]. Na Figura 1 é possível verificar algumas aplicações mais correntes na indústria aeronáutica.

Junta adesiva, junta colada ou simplesmente ligação adesiva, são os termos normalmente utilizados para se designar uma união por intermedio de um adesivo. Aos membros estruturais da junta, que são ligados entre si através do adesivo, dá-se o termo de substratos ou aderentes, sendo que o termo substrato é geralmente utilizado para designar os componentes da junta antes da ligação, e o termo aderentes como designação após a colagem. Na prática, estes dois termos são usados sem distinção [5]



*Figura 1- Estrutura de fuselagem reforçada [6]*

Da mesma forma que são referenciadas as vantagens da utilização de juntas coladas é importante não deixar de indicar as limitações que lhe estão associadas. De seguida apresentam-se algumas vantagens e desvantagens inerentes a este tipo de ligação [7].

#### Vantagens:

- ✓ Distribuição e redução mais uniforme de tensões;
- ✓ Capacidade de amortecimento de vibrações;
- ✓ Possibilidade de ligação de materiais diferentes;
- ✓ Ligações eficientes de chapas (espessuras finas);
- ✓ Projeto mais flexível;
- ✓ Estruturas com contornos complexos;
- ✓ Contato contínuo entre superfícies;
- ✓ Redução de custos;
- ✓ Estruturas mais leves;
- ✓ Resistência elevada à fadiga;
- ✓ Incremento da rigidez e também isolamento acústico;
- ✓ Permite ligar e vedar em simultâneo;

Desvantagens:

- ✓ Necessário prever e projetar a junta de modo a evitar esforços de arrancamento, clivagem e impacto;
- ✓ Não utilizar geometrias propícias a tensões localizadas;
- ✓ Durabilidade limitada em condições extremas;
- ✓ Fraca resistência à temperatura e fogo;
- ✓ Tempo de ligação (endurecimento);
- ✓ Necessidade de uma cuidada preparação de superfícies;
- ✓ Controlo de qualidade mais difícil;
- ✓ Inexistência de critério de dimensionamento;
- ✓ Fraca resistência ao arrancamento;
- ✓ Processo tipicamente irreversível;
- ✓ Resistência e durabilidade fortemente dependentes das condições de processamento;
- ✓ Flamabilidade e toxicidade de alguns adesivos;
- ✓ Podem ser mais caras que a ligação mecânica;

### **2.1.1 Resistência das juntas**

Em termos de resistência de uma junta adesiva, deve-se ter em conta que a resistência de um adesivo e a resistência da junta são conceitos distintos. Os principais fatores que influenciam a resistência de uma junta adesiva são os seguintes [4], [8]:

#### **2.1.1.1 Propriedades mecânicas dos materiais envolvidos**

- Propriedades mecânicas do adesivo

Os adesivos mais tenazes e flexíveis têm em geral uma menor resistência mecânica. No entanto, a tensão média de rotura numa junta com este tipo de adesivos é usualmente superior.

O módulo de elasticidade de um adesivo tem consequências na distribuição das tensões ao longo do adesivo. Quanto maior a rigidez do adesivo menos uniforme é a distribuição de tensões ao longo deste, o que pode reduzir a resistência da junta.

A resistência à fadiga é também uma propriedade importante na resistência mecânica de uma junta. Este tipo de resistência é geralmente menor para adesivos frágeis.

#### ➤ Ductilidade do adesivo

De um modo Geral os adesivos de ductilidade elevada têm uma resistência mecânica inferior. No entanto, a ductilidade dos adesivos é benéfica para a resistência de uma junta adesiva na medida em que os adesivos mais dúcteis são menos sensíveis á propagação de fendas que os adesivos frágeis. De facto, os adesivos dúcteis permitem a redistribuição das tensões na camada de adesivo quando a sua tensão limite é atingida, ao invés de ocorrer rotura imediata do adesivo, o que resulta numa resistência da junta superior.

#### ➤ Flexibilidade do adesivo

A flexibilidade de um adesivo está também relacionada com a ductilidade deste. Na construção de juntas, a utilização de adesivos muito dúcteis pode originar juntas mais resistentes do que aquelas que utilizam adesivos menos dúcteis. Isto é possível devido à flexibilidade desses adesivos, que permite uma boa capacidade de deformação plástica e elevada resistência ao arrancamento [9], [10].

### 2.1.1.2 Características geométricas da junta

A geometria da junta tem também uma influência significativa na resistência de uma junta adesiva. De seguida descrevem-se os parâmetros geométricos mais relevantes característicos da geometria da junta

#### ➤ Espessura do adesivo

A espessura do adesivo é uma das características geométricas a considerar. Deve-se assim garantir uma espessura ótima para o adesivo, necessária à obtenção do melhor desempenho da junta [11]. O aumento da espessura leva a uma distribuição mais uniforme das tensões ao longo do seu comprimento. Por outro lado, uma diminuição da espessura de adesivo provoca uma distribuição menos uniforme das tensões. Este comportamento está representado na Figura 2.

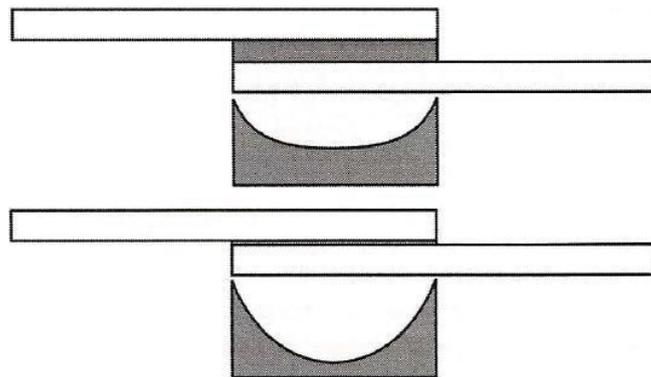


Figura 2-Esquema da distribuição das tensões para diferentes espessuras de adesivo [4].

#### ➤ Comprimento de sobreposição

O comprimento de sobreposição entre aderentes é outro parâmetro geométrico a ter em conta. Na construção de uma junta devem-se usar valores suficientemente elevados para o rácio entre comprimento de sobreposição ( $l$ ) e a espessura do aderente ( $t$ ). A resistência da junta aumenta significativamente com  $l/t$  para valores pequenos deste parâmetro. Todavia a partir de determinados valores de  $l/t$ , o ganho de resistência é marginal e o peso do conjunto aumenta desnecessariamente [12]. *Adams e Davies* [13] propuseram uma metodologia simples para avaliar o efeito do comprimento de sobreposição na resistência

das juntas coladas de sobreposição simples admitindo que quer o adesivo quer os aderentes possam sofrer deformação plástica. Estes autores aplicaram o modelo retratado na Figura 3 à previsão da resistência de juntas coladas de aço-epóxico, considerando três tipos de aço diferentes (alta, media e baixa resistência), e obtiveram boa concordância com os resultados experimentais.

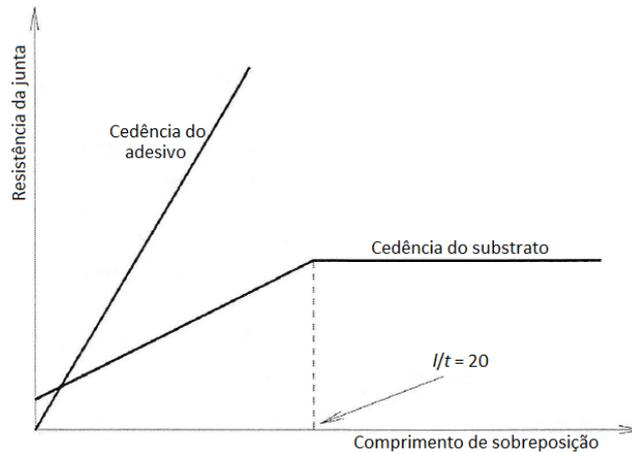


Figura 3-Método de previsão da resistência de juntas baseado na cedência do adesivo e do aderente [13].

➤ Existência de filete no adesivo

Nos modelos numéricos de juntas adesivas normalmente assume-se que a extremidade do adesivo é quadrada. No entanto, na prática as juntas adesivas não apresentam essa geometria, a não ser que a junta seja maquinada de modo a que se aproxime da geometria teórica. Na realidade as extremidades do adesivo ficam com um filete de adesivo (Figura 5), devido ao excesso de adesivo que é expulso para fora da junta na altura da colagem dos aderentes.

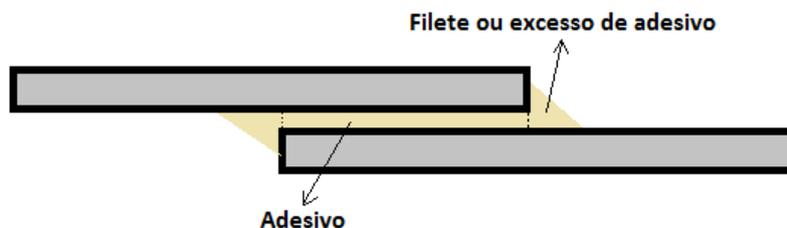


Figura 4-Junta de sobreposição simples com um filete de adesivo [7].

A presença do filete de adesivo provoca uma redistribuição de tensões, aliviando os picos de tensão na extremidade do adesivo.

➤ Geometria dos aderentes

A geometria dos aderentes pode ser alterada para promover o aumento da resistência da junta. Na figura 5 estão representadas diferentes geometrias de juntas que têm como objetivo diminuir as concentrações de tensões nas extremidades da sobreposição.

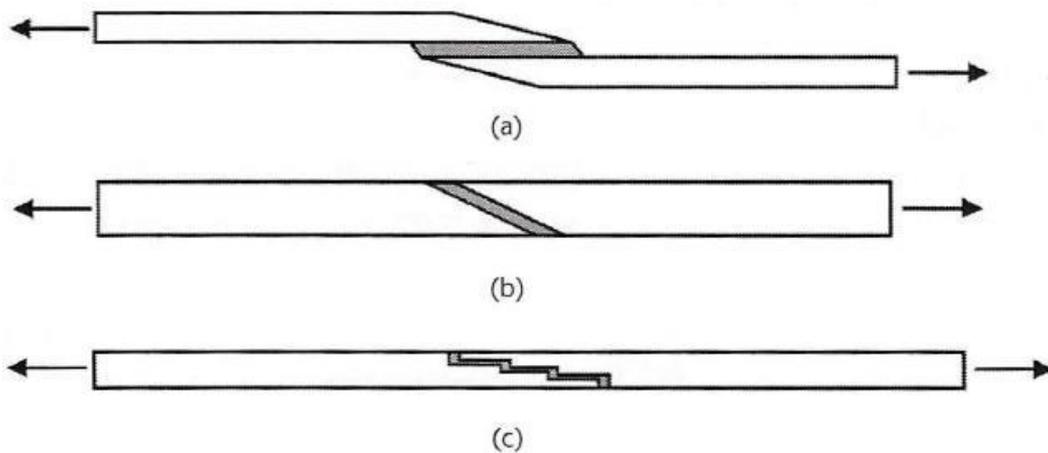


Figura 5-Diferentes geometrias de junta com o objetivo de melhorar a resistência das juntas: (a) de sobreposição com chanfro exterior, (b) de topo com chanfro interno, (c) de topo em degrau [14].

## 2.1.2 Esforços e tipos de rotura em juntas adesivas

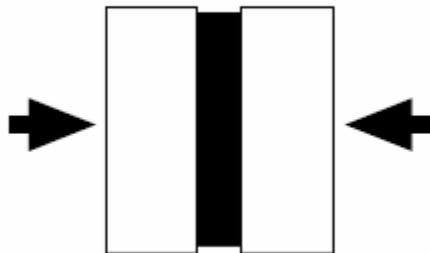
As ligações adesivas podem estar sujeitas a diversos tipos de esforços, existindo essencialmente quatro modos de carregamento: tração/compressão, corte, clivagem e arrancamento [14].

### 2.1.2.1 Esforços de tração e compressão

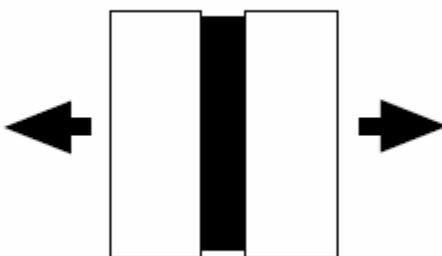
As tensões de tração surgem quando são aplicadas forças perpendiculares ao plano de colagem (Figura 6), sendo a sua distribuição uniforme ao longo do comprimento de colagem. Na prática a espessura do adesivo é difícil de controlar e as forças raramente

são rigorosamente perpendiculares ou uniformes, o que origina tensões indesejáveis de clivagem ou de arrancamento.

As forças de compressão são como as de tração, mas em sentido oposto (Figura 7), sendo que estas tendem a comprimir um aderente contra o outro. Caso a distribuição de tensões seja uniforme, a junta adesiva jamais romperá, não precisando praticamente de adesivo. A este tipo de solicitação chama-se de ‘‘compressão pura’’[4].



*Figura 6- Esforço de tração [7].*



*Figura 7-Esforço de compressão [7].*

### **2.1.2.2 Esforços de corte**

As tensões de corte surgem sempre que as forças são aplicadas no plano de colagem, provocando escorregamento entre dois aderentes (Figura 8). A distribuição das tensões não é uniforme, sendo os extremos da junta sujeitos a tensões mais elevadas, em comparação com a região central da sobreposição, que pouco contribui para sustentação da carga.



Figura 8-Tensões de corte [7].

O aumento da largura de sobreposição terá um efeito benéfico superior ao aumento do comprimento, no que à resistência da junta diz respeito (Figura 9) [1], [5]. Tal acontece, devido às tensões máximas estarem situadas na extremidade da junta, pelo que o aumento da largura beneficiara fortemente a resistência, enquanto o comprimento de sobreposição provocará um efeito mais acentuado de deformação diferencial dos aderentes.

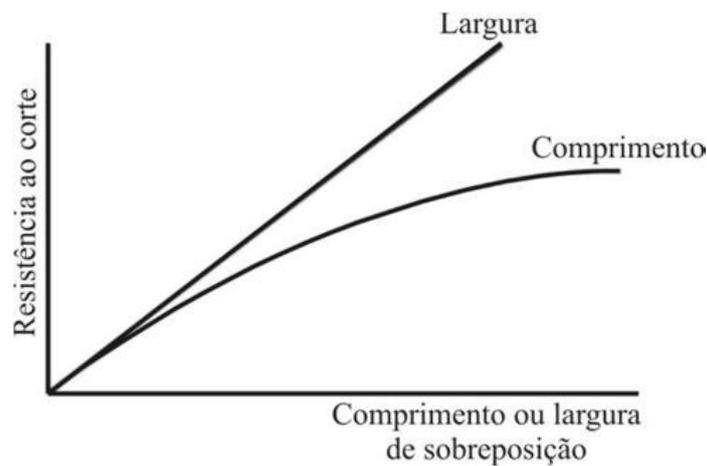
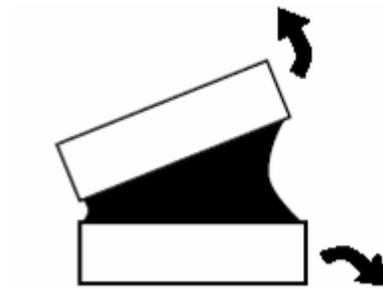


Figura 9-Efeito do comprimento e largura de sobreposição na resistência ao corte [5].

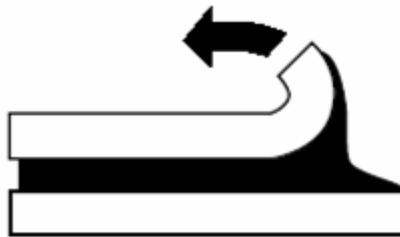
### 2.1.2.3 Esforços de clivagem e arrancamento

As tensões de clivagem e arrancamento são o principal inimigo das juntas adesivas, sendo esforços a evitar sempre que se pretendam unir dois materiais por intermedio de um adesivo. Define-se clivagem como sendo o resultado da tensão provocada quando são aplicadas forças numa das extremidades da junta, de forma a separar os substratos (Figura 10). O resultado dos esforços de arrancamento é bastante idêntico ao verificado pelos esforços de clivagem, sendo que neste caso um ou ambos os substratos são flexíveis, podendo originar um angulo de separação bastante superior comparativamente à clivagem

(Figura 11). Como tal, a concentração de esforços ocorre numa zona localizada junto a uma das extremidades da ligação [4].



*Figura 10-Esforço de clivagem [7].*



*Figura 11-Esforço de arrancamento [7].*

A ductilidade e a rigidez têm enorme influência na resistência deste tipo de esforços, sendo que quanto mais frágeis e rígidos são os adesivos, mais sensíveis aos esforços de clivagem e arrancamento se tornam. Isto deve-se principalmente à falta de flexibilidade deste tipo de adesivo, que não consegue transferir os esforços para a zona interior do mesmo conduzindo a uma menor resistência da junta [5].

Os esforços aplicados a juntas adesivas podem gerar diversos tipos de rotura. A norma ASTM D 5573 – 99 [15] classifica os modos de rotura em juntas de plástico reforçado com fibras (FRP), prevendo sete modos de rotura. No entanto, os mais frequentes são:

- Rotura adesiva (interface entre o aderente e o adesivo) (a);
- Rotura coesiva (interior do adesivo) (b);
- Rotura de um dos aderentes (c);
- Rotura mista (d).

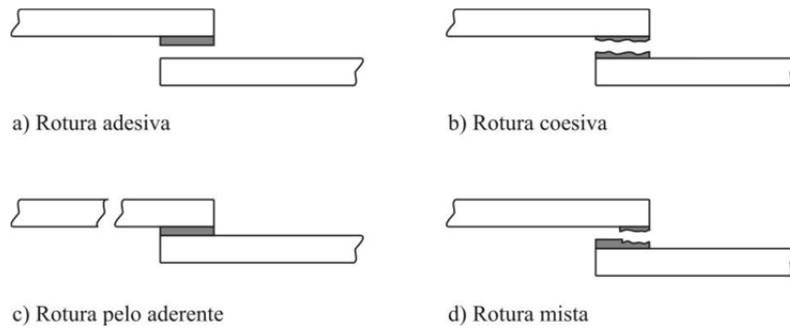


Figura 12-Modos de rotura em juntas adesivas [5].

#### 2.1.2.4 Rotura adesiva

A rotura adesiva ocorre na interface entre o adesivo e um dos aderentes, ficando esse aderente sem resíduos de adesivo. O adesivo fica totalmente no outro aderente, sendo indício de falha na adesão provocada possivelmente por uma má preparação da superfície. Na realidade, o que aparentemente pode parecer uma rotura adesiva, pode nem o ser, pois por vezes existe uma fina película de adesivo na superfície do aderente que inicialmente se possa ter considerado sem adesivo. Nestes casos, as roturas são consideradas coesivas e não adesivas.

#### 2.1.2.5 Rotura coesiva

A rotura coesiva ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo, estando ambas as superfícies dos aderentes cobertas por adesivo.

#### 2.1.2.6 Rotura de um dos aderentes

Uma junta deve ser projetada de modo que a rotura nunca ocorra pelo adesivo. Uma junta corretamente projetada e concebida é aquela onde a rotura acontece no próprio aderente.

### 2.1.2.7 Rotura mista

A rotura mista não é mais do que uma combinação entre rotura adesiva e rotura coesiva. Este tipo de rotura pode indicar uma limpeza deficiente numa dada região das superfícies a ligar.

### 2.1.3 Tipos de juntas adesivas

Existem diversas configurações possíveis de juntas adesivas. De seguida são apresentadas e descritas as configurações mais usadas em aplicações reais [2].

#### 2.3.1.1 Juntas topo a topo

Este tipo de juntas adesivas não suporta esforços de flexão pois estes induzem clivagem no adesivo. Para reduzir a possibilidade de ocorrer rotura na junta por clivagem podem-se fazer modificações aos aderentes das juntas, como mostrado na Figura 13.

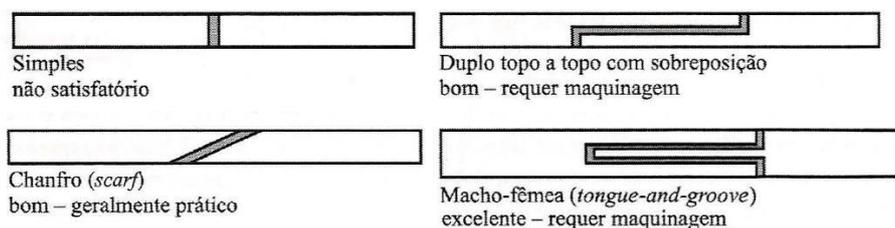


Figura 13-Exemplos de juntas topo a topo [4].

### 2.1.3.2 Juntas de sobreposição

São as mais comuns devido à facilidade de execução e a solicitarem o adesivo maioritariamente ao corte (tipo de junta utilizada na dissertação). No entanto, as forças transmitidas não são colineares, o que introduz tensões  $\sigma_y$  significativas nas extremidades da sobreposição. Para diminuir este efeito podem-se fazer algumas alterações às juntas, como mostrado na Figura 14.

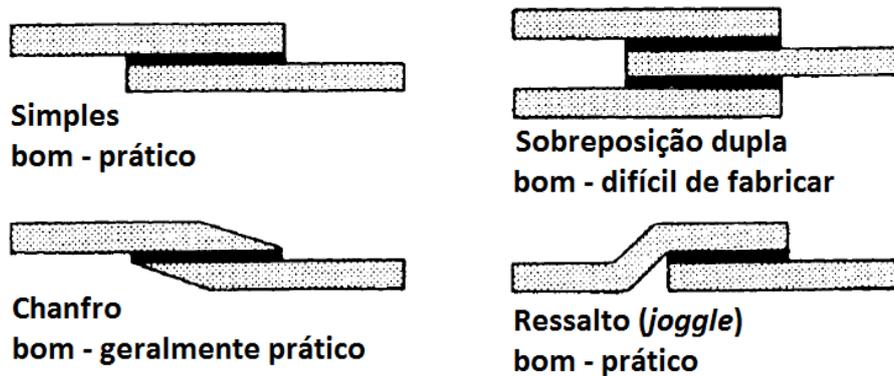


Figura 14-Exemplos de juntas de sobreposição [2].

### 2.1.3.3 Juntas de tira (strap joint)

São apresentadas na Figura 15 várias configurações de juntas de tira. Tal como na junta de sobreposição simples (JSS), a junta de tira simples é sujeita a esforços de arrancamento. A junta de tira dupla reduz o momento-fletor e é por isso preferível. As tiras com chanfro e as juntas macho-fêmea são as mais eficientes, mas requerem maquinagem dos aderentes.

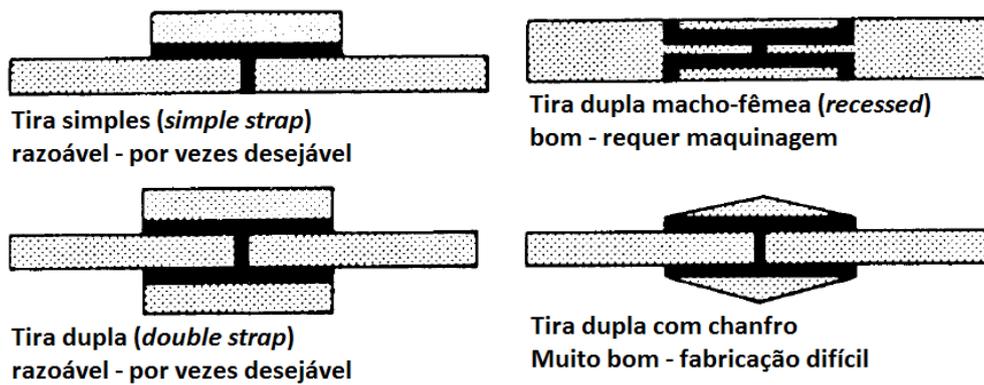


Figura 15-Exemplos de juntas de tira [2].

### 2.1.3.4 Juntas Cilíndricas

São habitualmente utilizadas na ligação de varões e tubos. São mais vantajosas relativamente às de topo-a-topo pois, para além de diminuírem o efeito de arrancamento, também promovem uma área resistente maior. Estão representados na Figura 16 alguns exemplos dessas juntas.

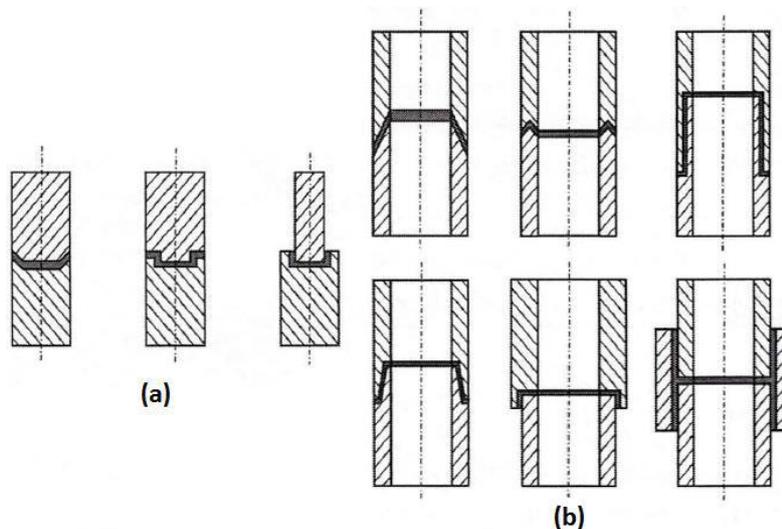


Figura 16-Exemplos de juntas cilíndricas:(a) juntas para varões e (b) juntas para tubos [2].

### 2.1.3.5 Juntas em T

Este tipo de junta é caracterizado por uma orientação tipicamente perpendicular dos dois componentes (ângulo de  $90^\circ$ ). O carregamento pode ser transverso (T) ou normal (N). O

objetivo principal é a minimização das forças de arrancamento e a maximização das solicitações de corte no adesivo. Na Figura 17 estão representados alguns exemplos de juntas em T.

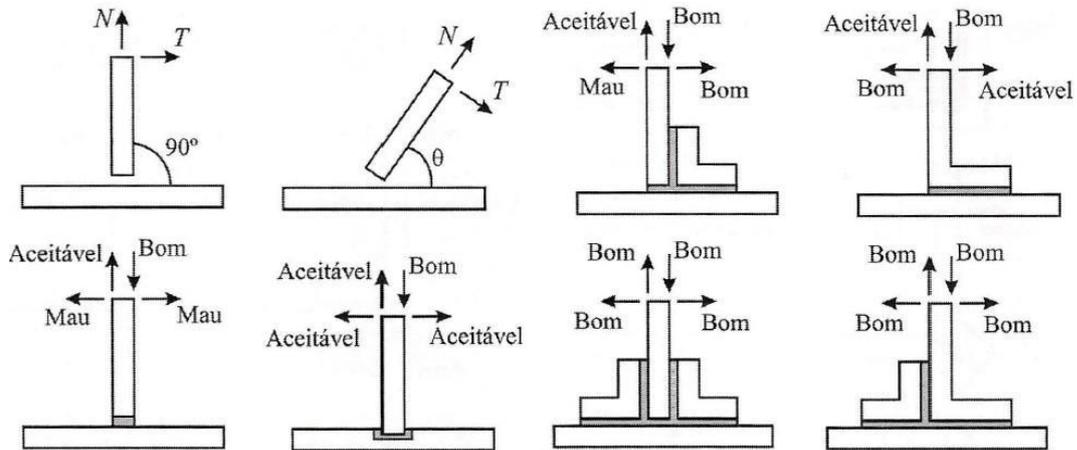


Figura 17-Exemplos de juntas em T [4].

### 2.1.3.6 Juntas de canto

Este Tipo de juntas é semelhante às juntas em T, neste caso com a diferença da ligação ser efetuada nas extremidades dos aderentes. Na Figura 18 apresentam-se as soluções habitualmente utilizadas para diminuir o efeito de arrancamento no adesivo.

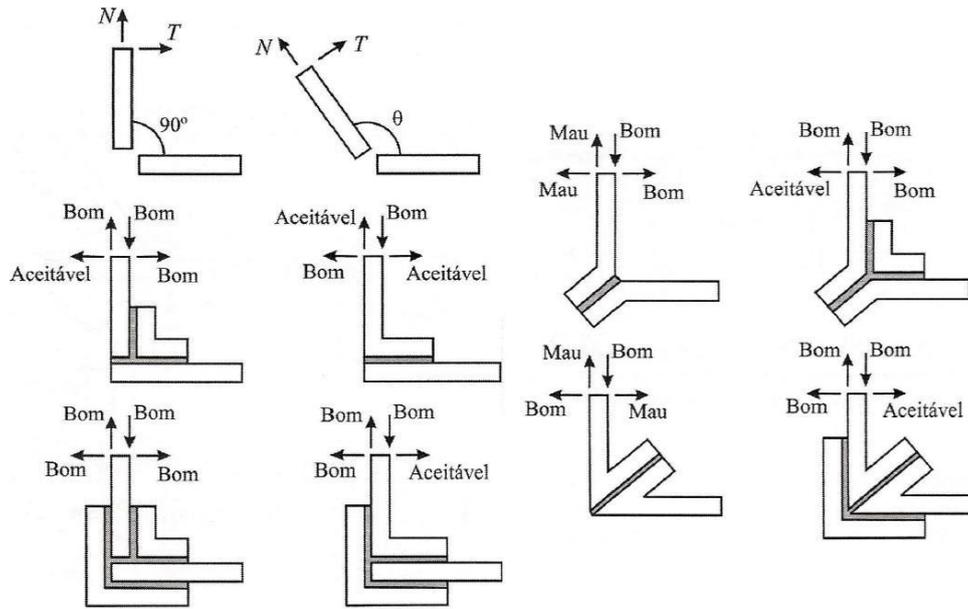


Figura 18-Exemplos de juntas de canto [4].

### 2.1.3.7 Juntas de Reforço

A Solicitação á tração de juntas entre aderentes finos e componentes espessos introduz geralmente tensões  $\sigma_y$ , como mostrado na Figura 19(a). É também uma prática comum a colagem de reforços sobre aderentes finos com o objetivo de aumentar a sua rigidez. Todavia, nestes casos, as solicitações de flexão podem eventualmente induzir clivagem no adesivo. Consegue-se melhorar a resistência as forças de flexão aumentando a área colada, a flexibilidade do rebordo e a rigidez da base.

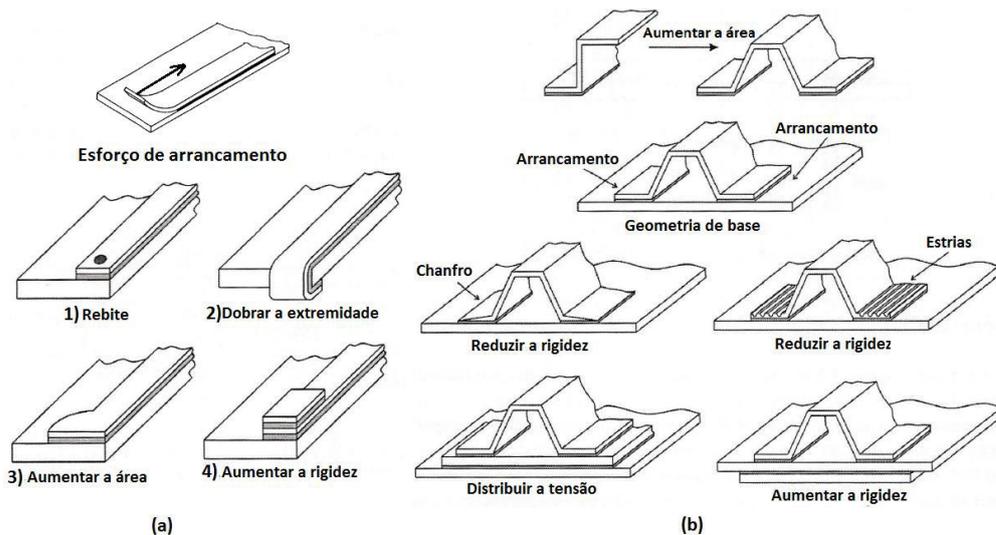


Figura 19-Configuração de reforços para minimizar:(a) o arrancamento e (b) a clivagem [4].

## 2.1.4 Adesivos

Existe uma grande variedade de adesivos, bem como diversos critérios para os agrupar. Os adesivos podem ser classificados segundo a sua natureza, tipo de estrutura molecular, composição química, entre outros critérios. Normalmente os adesivos caracterizam-se segundo o seu desempenho, dividindo-se em dois grupos distintos, os estruturais e os não estruturais. Os adesivos estruturais apresentam elevados valores de resistência mecânica e são normalmente utilizados em ligações de materiais de elevada resistência, tais como madeiras, compósitos e metais, permitindo uma resistência média ao corte da ligação adesiva superior a 7 MPa à temperatura ambiente. [16]. São também conhecidos com um material que não sofre fluência sob ação de cargas bastante elevadas. Os adesivos estruturais consistem em composições adesivas que são normalmente utilizados em aplicações permanentes de alta resistência [17]. Contudo os adesivos não estruturais também são bastante solicitados por diversas indústrias e para diversas aplicações e são estes que são retratados neste trabalho. A divisão dos adesivos pode ser observada na Figura 20.

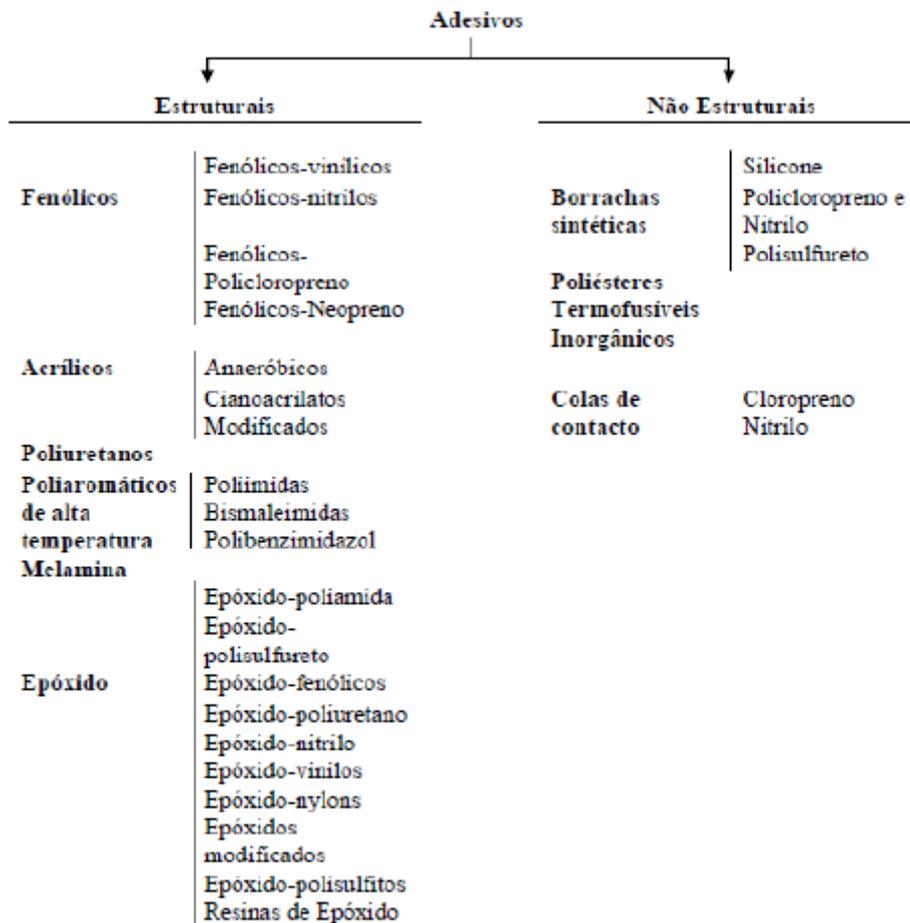


Figura 20-Divisão do tipo de adesivos dependendo do seu desempenho [4].

## 2.2 Polímeros

Polímero é um material orgânico, que são cadeias de átomos de carbono onde vários átomos estão lateralmente ligados, inorgânico, natural ou sintético. Esta descrição se origina no vocabulário grego *polumeres*, palavra constituída por *polu* que pode ser traduzido como muitas e *meres* que significa partes [18].

Os Polímeros são constituídos de moléculas organizadas em grandes cadeias entrelaçadas entre si. Devido ao seu tamanho avantajado, a molécula de um polímero é chamada de macromolécula. Estas unidades são chamadas de monómeros, do grego uma parte. A reação que promove a união dos monômeros para formar um polímero é chamada de polimerização. O monómero vai, sucessivamente, se unindo a outros, dando o dímero,

trímero, tetrâmero, até chegar ao polímero. Aparamente, este processo poderia seguir, sem parar, até produzir uma molécula de tamanho “infinito”, porem, fatores práticos limitam a continuação desta reação [19].

A alta massa molar dos polímeros e a diversidade de estruturas que podem ser formadas pelo encadeamento dos monômeros conferem a estas materiais propriedades químicas e físicas especiais, como por exemplo: alta viscosidade, elasticidade, resistência à corrosão e humidade.

A principal conquista industrial da química orgânica no século XX foi a fabricação em grande escala de polímeros sintéticos, como os plásticos, as borrachas e fibras sintéticas. Desde o fim da segunda guerra mundial, o campo dos materiais foi revolucionado pelo aparecimento dos polímeros sintéticos. A maioria dos polímeros sintéticos é de desenvolvimento bastante recente, quase todos surgiram nos últimos cinquenta anos [20].

Os três grandes grupos de polímeros sintéticos (plásticos, borrachas e fibras), se diferenciam pelas suas propriedades mecânicas, ou seja, como material responde quando é submetido a uma força ou tensão, dentre outras características típicas de cada grupo. Em algumas aplicações de engenharia de construção, peças metálicas e de madeira foram substituídas por polímeros, que possuem propriedades satisfatórias nesta substituição e um custo mais baixo, comparando com os materiais tradicionais.

As propriedades mecânicas dos polímeros são especificadas através dos mesmos parâmetros usados para os metais, isto é, o modulo de elasticidade, o limite de resistência á tração e as resistências a fadiga e ao impacto. O modulo de elasticidade e a ductilidade são determinados para os polímeros da mesma maneira que para os metais, porém, os polímeros são em muitos aspetos mecanicamente diferentes dos metais. Por exemplo, o modulo de elasticidade para materiais poliméricos altamente elásticos pode ser tão reduzido quanto 7 MPa ou tão elevado quanto 4 GPa, polímeros rígidos. Nos metais, os valores do módulo de elasticidade são muito mais elevados e variam entre 48-410 GPa. Enquanto os metais raramente se alongam de maneira plástica além dos 100%, alguns polímeros muito elásticos podem experimentar alongamentos de até 1000%. As características mecânicas dos polímeros são muito mais sensíveis a mudanças de temperatura na vizinhança da temperatura ambiente.

Na Figura 21 são encontrados três tipos de comportamento tensão-deformação tipicamente diferentes para materiais poliméricos. A curva A mostra um comportamento típico de tensão-deformação para um polímero frágil, onde este sofre fratura enquanto se deforma elasticamente. A curva B, material plástico, mostra um comportamento semelhante ao comportamento de muitos materiais metálicos, a deformação inicial é elástica e em seguida ocorre um escoamento com uma região de deformação plástica. Na curva C, a deformação é totalmente elástica, típica de borrachas, onde grandes deformações são produzidas sob pequenos níveis de tensão.

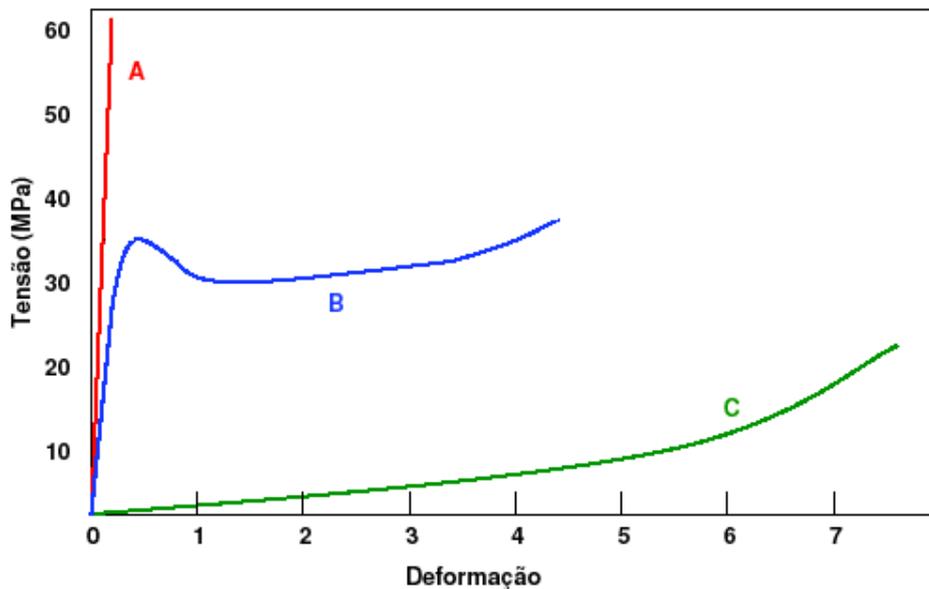


Figura 21-Comportamento de tensão-deformação para três tipos de polímeros: frágeis (A), plásticos (B) e elastoméricos (C) [19].

Os polímeros são estruturalmente muito mais complexos que metais ou materiais cerâmicos. Embora sendo mais baratos e de fabricação mais fácil, eles têm menores resistência mecânica e não são bons condutores de calor e eletricidade.

Podemos dividir os materiais poliméricos em três classes:

1. Materiais plásticos termoplásticos;
2. Materiais plásticos termoestáveis;
3. Elastômeros (borrachas).

Os termoplásticos são constituídos por moléculas que contem centenas até milhões de átomos de carbono. Neste tipo de polímero, aumentando a temperatura causa amolecimento que vai até a fusão do material, isto deve-se a diminuição gradual das forças de atração intermoleculares.

Os termoestáveis são polímeros onde o endurecimento (cura) tem como consequência reações químicas irreversíveis. São materiais insolúveis e infusíveis, não podendo ser amolecidos pelo calor, pois com o aquecimento as ligações moleculares ramificadas quebram-se, provocando a degradação do material.

Os elastômeros são materiais elásticos à temperatura ambiente, são obtidos através da cura do látex. Como propriedade mecânica possui extraordinária elasticidade e flexibilidade fazendo com que atinjam a rotura com uma deformação elástica muito elevada, de 300% a 700%, sem ocorrer deformação permanente.

Os materiais poliméricos são empregues em serviços com temperatura ambiente moderada, com baixo esforço mecânico, e com necessidade de resistência à corrosão.

### **2.2.1 Polidimetilsiloxano (PDMS)**

Os silicones (polissiloxenos) são elastômeros de baixo peso molecular e apresentam-se como um material líquido e viscoso [3]. O polímero conhecido como Polidimetilsiloxano (PDMS) pertence a este grupo de silicone, possuindo características de ser opticamente transparente, de não ser tóxico e não inflamável.

O PDMS possui alongamento de 100% a 800% e a sua faixa útil de temperatura é de -115 a 315°C. Os elastômeros à base de silicone têm grande flexibilidade a baixas temperaturas (de até -90°C), e ainda são estáveis a temperaturas tão elevadas quanto 250°C [21]. Como aplicações podem ser usados como isolamento térmico para temperaturas altas e baixas, vedações, calafetagens, tubos e para fins medicinais. A estrutura química do PDMS basicamente consiste numa cadeia linear de átomos de silício e oxigénio alternados (Si-O-Si) ligados a grupos laterais metil. A fórmula estrutural

do polímero representada na Figura 22 pode ser reescrita através da fórmula molecular ( $C_2 H_6 O Si$ ).

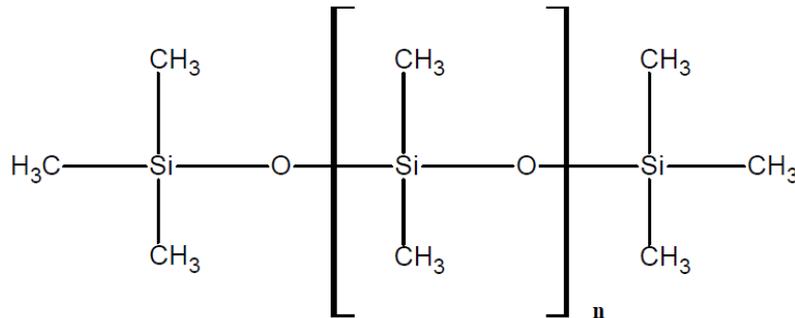


Figura 22-Estrutura química do PDMS [21].

O PDMS apresenta algumas boas propriedades mecânicas. Sua suavidade permite o movimento mecânico de válvulas e bombas além disso apresenta capacidade de deformação reversível. O facto de ser o único polímero com ligação silício-oxigénio ao invés da convencional estrutura de carbono torna-o menos sensível a temperatura.

### 2.3 Determinação das propriedades do adesivo

Torna-se necessário e fundamental compreender as propriedades físicas, térmicas e mecânicas dos adesivos de modo a que estes possam ser seleccionados e utilizados com sucesso em juntas adesivas. As propriedades físicas e térmicas são propriedades intrínsecas do adesivo que condicionam a sua preparação, aplicação e comportamento em diferentes condições ambientais e solicitações mecânicas [4]. Para a determinação das propriedades dos adesivos recorre-se a ensaios mecânicos de adesivos ou ensaios de junta. Contudo os únicos que aqui são retratados são ensaios mecânicos de adesivos, mais propriamente ensaios de tração.

### 2.3.1 Ensaio de tração/ curva tensão-deformação

A determinação das propriedades à tração de um adesivo pode ser realizada através do ensaio de um provete de adesivo de acordo com a norma **BS 2782** [22] onde os provetes de ensaio têm a forma de “osso de cão” [23]. As propriedades dos adesivos são sensíveis ao modo como os provetes se apresentam. A geometria e as dimensões do provete devem estar de acordo com a norma anterior e apresentam-se na Figura 23

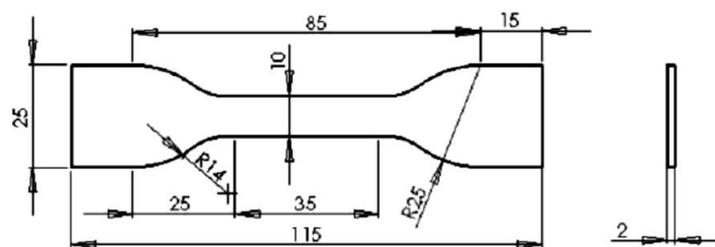


Figura 23-Geometria e dimensões (mm) dos provetes de acordo com a norma [22].

O ensaio de tração é dos procedimentos mais utilizados para avaliar várias propriedades mecânicas dos materiais tais como módulo de elasticidade, tensão de cedência, tensão de ruptura e deformação [22]. Este consiste na utilização de um provete de determinado material com a forma e dimensões padronizadas que é sujeito a uma força de tração uniaxial que o irá esticar ou alongar até que ocorra a sua ruptura [24]. A carga de tração exercida será gradualmente crescente e é aplicada uniaxialmente ao longo do eixo mais comprido do provete.

Por norma ao longo do ensaio, a deformação ocorre essencialmente na região central do provete visto que esta é a região com menor área. Por sua vez o provete é preso pelas amarras da máquina que o traciona com uma velocidade constante definida no início do ensaio, sendo medida a carga e o alongamento que resulta do tracionamento. Este tipo é designado de ensaio destrutivo pois o provete fica completamente destruído no final do ensaio.

No ensaio de tração regista-se a força e o alongamento que permitem calcular a tensão e a deformação dando o gráfico de tensão-deformação ou curva de engenharia como mostrado na Figura 24

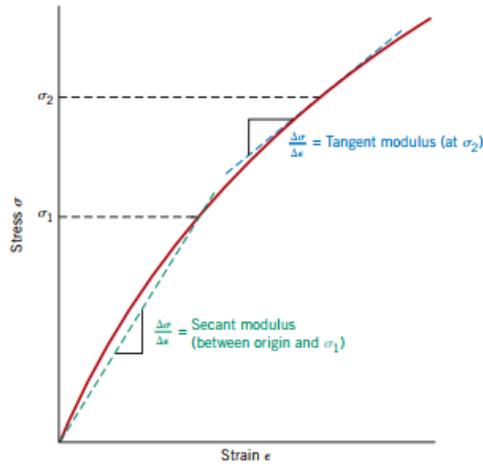


Figura 24-Curva tensão-deformação [24].

### 2.3.1.1 Elasticidade Linear e Lei de Hooke

Os diagramas tensão deformação da maioria dos materiais estruturais apresentam uma região inicial de comportamento elástico e linear [25]. Diz-se que um material é elástico quando o material volta completamente a sua forma original depois de cessada a carga ou força.

Quando um material se comporta elasticamente e apresenta, também, uma relação linear entre a tensão e a deformação, diz-se que é linearmente elástico. Esta é uma propriedade extremamente importante de muitos materiais sólidos.

A relação linear entre a tensão e a deformação, no caso de um material a tração, pode ser expressão pela seguinte equação:

$$\sigma = E \times \varepsilon \tag{2.1}$$

Onde  $E$  é uma constante de proporcionalidade conhecida como módulo de elasticidade linear do material ou módulo de *Young*. Este é o coeficiente angular da parte linear do diagrama tensão-deformação e é diferente para cada material. Além disso a equação acima (Eq 1) é conhecida como *lei de Hooke*, que estabelece em outras palavras a relação linear entre tensão e deformação (Figura 25)

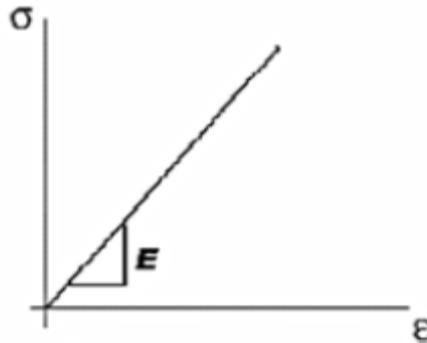


Figura 25-Representação gráfica da lei de Hooke [25].

### 2.3.1.2 Elasticidade não linear

Experiências levadas a cabo por Mooney [26] e Rivlin [27] em um ensaio uniaxial com uma amostra de borracha foi possível verificar a falha de captação na elasticidade linear, mostrando evidências suficientes de que a teoria linear da elasticidade se trata de uma abordagem impropria para as propriedades mecânicas de materiais hiperelásticos. Assim foi desenvolvida uma clássica teoria sobre a elasticidade não linear [28] para estudar materiais que sofrem grandes deformações com pequenas tensões aplicadas.

A teoria não linear de elasticidade utiliza uma função ( $\Psi$ ) que relaciona tensão-energia para descrever em termos energéticos o comportamento mecânico desses materiais [29].

Para simulações computacionais, modelos constitutivos foram desenvolvidos para melhor representar esses comportamentos.

## 2.4 Modelos Constitutivos

Um modelo constitutivo numa análise mecânica representa a relação entre a resposta de um organismo (por exemplo, estado de tensão) devido às forças que atuam sobre esse corpo. Uma grande variedade de comportamentos de materiais são descritos com algumas classes diferentes de equações constitutivas [30].

Os modelos hiperelásticos têm sido amplamente utilizados para modelar o comportamento não linear e anisotrópico de materiais, uma vez que estes sob grandes deformações muitas vezes recuperam a sua elasticidade. O comportamento constitutivo de materiais hiperelásticos é definido em termos de potencial de energia.

De entre os modelos constitutivos mais usuais para materiais hiperelásticos, abordaremos aqueles que melhor se adaptam ao estudo em causa, sendo eles, *Mooney-Rivlin*, *Ogden* e *Yeoh*.

### 2.4.1 Modelo de *Mooney-Rivlin*

O modelo de *Mooney-Rivlin* é usado para modelar o comportamento de materiais hiperelásticos. A fórmula clássica da energia de deformação deste modelo para materiais hiperelásticos incompressíveis, é muitas vezes empregada na descrição do comportamento dos materiais isotrópicos incompressíveis, tipo borracha e os tecidos moles [31]. Estes materiais podem ser caracterizados como materiais altamente não-lineares submetidos a tensões finitas. O modelo de *Mooney-Rivlin*, é um dos primeiros modelos hiperelásticos e tem boa convergência para um intervalo relativamente grande de deformações [32]. A lei constitutiva de *Mooney-Rivlin* derivada de materiais hiperelásticos incompressíveis, encontra-se descrita a partir da seguinte equação:

$$\Psi = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3), \tag{2.2}$$

Onde  $\Psi$  é a função de densidade de energia de deformação,  $I_1$  e  $I_2$  são constantes de deformação e  $C_{10}$  e  $C_{01}$  são as constantes do material [31], [33]. Em princípio, os coeficientes de *Mooney-Rivlin*,  $C_{10}$  e  $C_{01}$ , podem ser determinados de forma independente por ajuste de uma curva de carga de deformação adequada.

### 2.4.2 Modelo de *Ogden*

O modelo de *Ogden*, Equação (3), descreve as mudanças das principais extensões de uma referência para a configuração atual. Este desempenha um papel crucial na teoria da elasticidade finita [31]. O modelo de *Ogden* pode ser descrito da seguinte forma:

$$\Psi = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} [\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3], \quad (2.3)$$

Onde  $\alpha_n$  e  $\mu_n$  são constantes do material,  $N$  o número de termos na série e  $\lambda_1$  as três diferentes relações de forças principais [33]. O modelo de borracha de *Ogden* pode descrever o comportamento incompressível e quase incompressível, em contraste com o modelo de *Mooney-Rivlin*.

### 2.4.3 Modelo de *Yeoh*

O método *Yeoh* de materiais hiperelásticos provou ser popular porque depende apenas da primeira deformação invariante,  $I_1$ , e tem sido usado para modelar satisfatoriamente várias formas de deformação com base apenas nos dados obtidos a partir do ensaio de tração uniaxial. Este modelo tem, no entanto, demonstrado ser impreciso a calcular e modelar pequenas deformações [34]. A função densidade de energia de deformação *Yeoh* é dada por:

$$\Psi = \sum_{n=1}^3 C_{10} (I_1 - 3)^i, \tag{2.4}$$

Onde I é a constante de deformação e C as constantes do material [35].

## 2.5 Método Numérico

Nos dias que correm e com a constante evolução dos computadores, chips e seus processadores é muito usual para problemas de engenharia recorrer a métodos numéricos para a sua resolução, uma vez que os métodos tradicionais são de extrema dificuldade de resolução, devido as complexidades matemáticas e físicas envolvidas.

Uma das ferramentas desenvolvidas é o MEF, que tem sido amplamente estudado e desenvolvido em códigos computacionais para análise e simulação de diversos problemas de engenharia [36]. Este método consiste na busca de soluções numéricas para um conjunto de equações relacionadas a um problema físico. O método prevê a divisão do domínio de integração num número finito de regiões denominadas elementos finitos, o conjunto desses elementos é denominada malha de elementos finitos, e é na malha que são programadas as propriedades do material e da estrutura a ser estudada [36].

Atualmente muitos softwares são desenvolvidos para resolver problemas que envolvam o MEF. O software utilizado no estudo em causa é denominado de Ansys® sendo utilizado para modelar sólidos, de forma a resolver problemas do cotidiano na modelação de formas/funções, tensões, fluxo de fluidos, entre outros [37]. Desta forma é possível visualizar, calcular e compreender no comportamento de uma determinada estrutura/fluido perante tensões impostas, fazendo estudos mais precisos e a curto prazo, de modo a prever situações que eventualmente possam vir a acontecer.

## 3 Procedimento Experimental

Neste capítulo encontram-se descritos detalhadamente todos os procedimentos efetuados, bem como as soluções do problema em estudo. Inicialmente é descrito o procedimento feito para preparação do provete de ensaio, seguido do teste à tração elaborado para obter a tão necessária curva de engenharia que será severamente importante para o estudo através do método de elementos finitos.

Através da obtenção da curva de engenharia segue-se o procedimento seguinte, o estudo numérico, onde se abordam todas as etapas necessárias para chegar aos resultados pretendidos, para posterior análise.

### 3.1 Elaboração dos provetes de ensaio

O polidimetilsiloxano utilizado para obtenção dos provetes de ensaio foi o Sylgard 184, este é fornecido num conjunto composto pelo pré polímero e pelo agente de cura (Figura 26) que devem ser misturados a uma proporção de 10:1 [38]. Para a mistura ser realizada com boa precisão foi utilizada uma balança eletrónica (Figura 27)

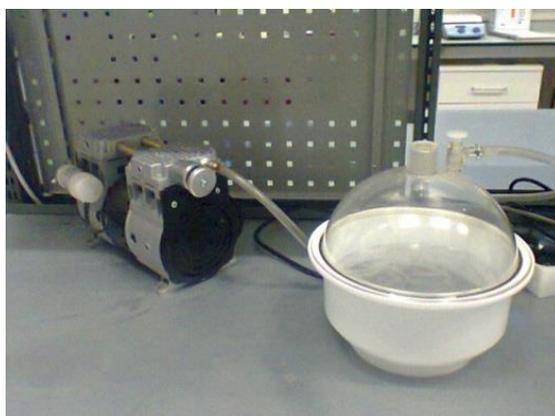


*Figura 26- PDMS pré polímero e agente de cura.*



*Figura 27- Balança eletrônica*

Posteriormente, a pesagem foi elaborada a mistura dos dois elementos durante cerca de 3 minutos, até a solução apresentar transparência e homogeneidade. Logo que esta apresente a homogeneidade é colocada num exsicador (Figura 28) que está ligado a uma bomba de vácuo de forma a remover todas as bolhas de ar existentes na solução, visto que o ar afeta a estrutura do proverte e conseqüentemente suas propriedades mecânicas.



*Figura 28-Exsicador ligado a bomba de vácuo.*

Após a remoção das bolhas de ar presentes da resina elastomérica, esta é vazada num molde com as dimensões que podem ser observadas na Figura 29, sendo estas determinadas a partir da norma **BS 2782** [22].

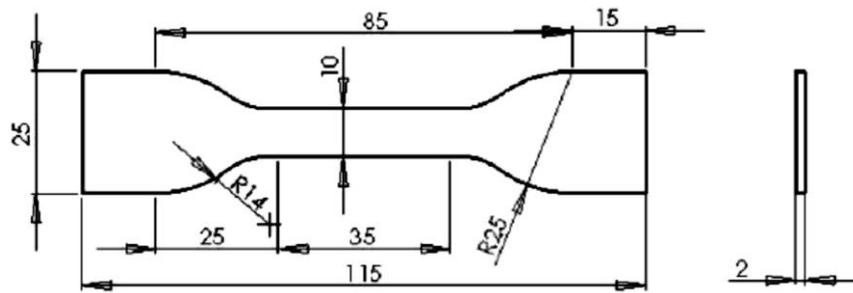
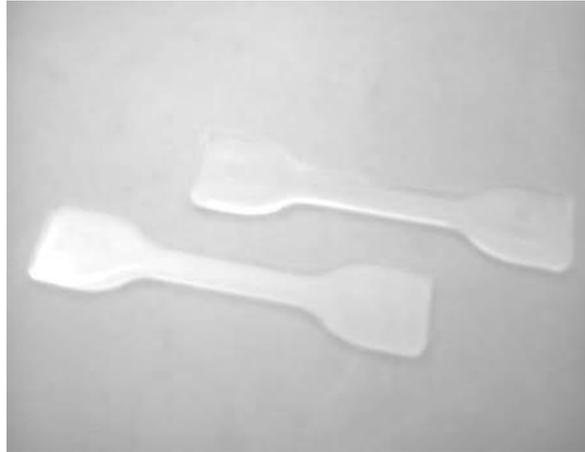


Figura 29-Desenho técnico do provete padronizado [22].

Posteriormente ao vazamento do PDMS no molde (Figura 30) é necessário efetuar a sua cura, para isso o molde é colocado num forno para acelerar o processo de polimerização. Apesar do processo poder ser efetuado à temperatura ambiente, tinha o inconveniente ser muito moroso e, por essa razão, ter-se optado pelo aumento artificial de temperatura. Assim, o tempo de cura necessário no forno para uma temperatura de 80° é de apenas 45 minutos enquanto à temperatura ambiente a cura poderia demorar cerca de 48 horas. Depois de decorrido esse tempo retiraram-se os provetes do molde e assim ficaram prontos para o ensaio de tração (Figura 31).



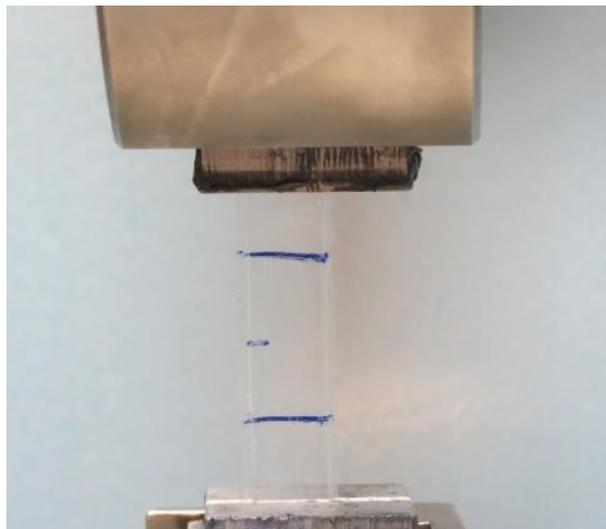
Figura 30-Molde em aço para os provetes de ensaio.



*Figura 31-Provetes de ensaio.*

### **3.2 Ensaio de tração**

Antes de se iniciar o teste propriamente dito, os provetes foram marcados, sendo feitos dois traços na horizontal na zona retangular separados por 10 mm entre si (Figura 32), sendo esperado que a rotura do material ocorra nessa zona. Após a marcação, o provete é colocado na máquina de ensaio de tração (INSTRON) como é visível na Figura 32 que irá tracionar os provetes a uma velocidade de 10 mm/min, até que ocorra a rotura.



*Figura 32-Provete de Ensaio devidamente marcado e colocado na máquina de tração.*

Enquanto todo o ensaio é realizado a máquina transmite informações em simultâneo para o computador através de um software chamado *Instron WaveMatrix for Dynamic and Fatigue Materials Test* (Figura 33) que reproduzia parâmetros como tempo total, total de ciclos, passo a ser seguido, posição, deslocamento e carga aplicada.

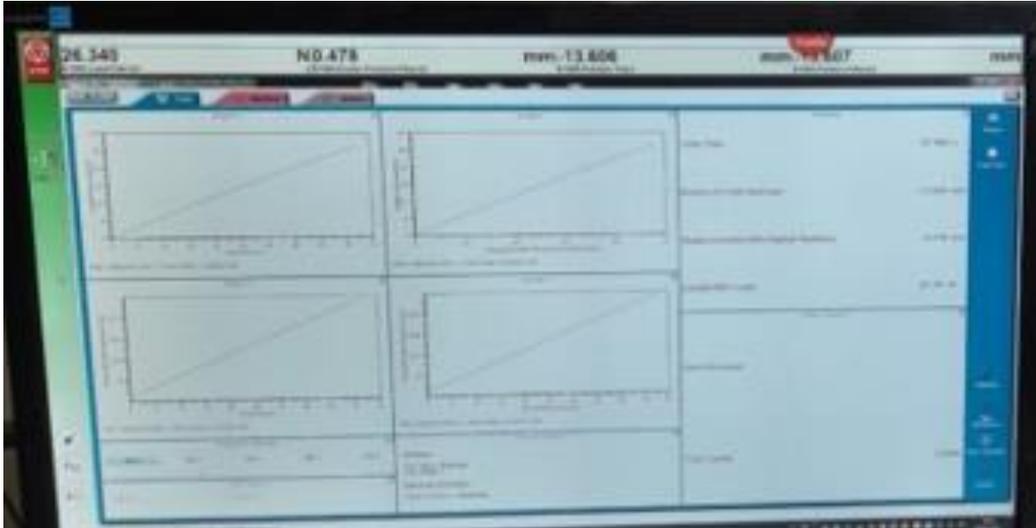
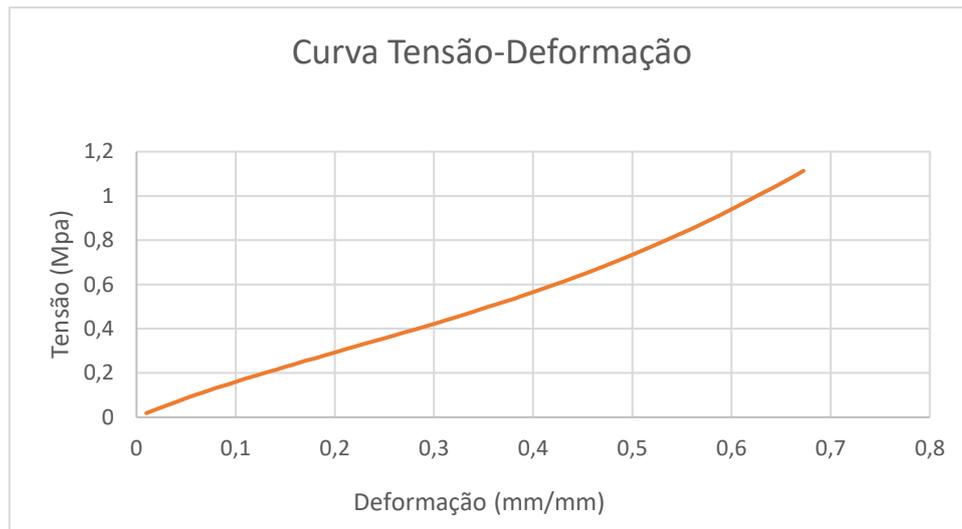


Figura 33-Imagem ilustrativa do software associado á máquina de tração.

Perante os dados recolhidos pelo software associado à máquina de tração foi possível elaborar o gráfico de tensão-deformação ou a chamada curva de engenharia. Com o valor da área e da carga aplicada em intervalos de tempo subdivididos e o deslocamento provocado se torna possível os cálculos.

Como é possível observar na Figura 34, depois de todo o processo necessário para a correta realização do teste de tração, obteve-se o gráfico tensão-deformação.



*Figura 34-Curva Tensão-Deformação do PDMS.*

Depois de obtida a anterior curva de tensão-deformação torna-se possível a utilização das propriedades mecânicas do material para eventuais simulações numéricas que se pretendam implementar.

### **3.3 Estudo Numérico**

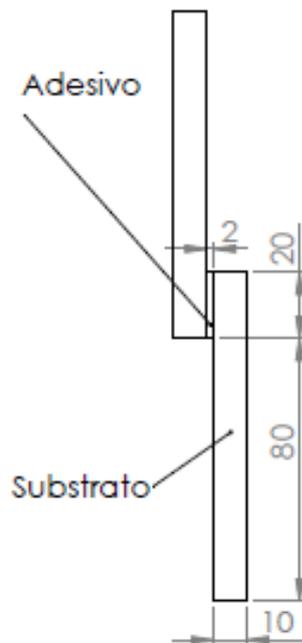
Para a realização da simulação numérica, foi utilizado o polímero Polidimetilsiloxano (PDMS), a fim de avaliar o seu comportamento mecânico durante um ensaio de corte simples e de que forma os parâmetros da junta, deslocamento aplicado e modelos constitutivos utilizados influenciam a resposta do adesivo perante as solicitações impostas.

#### **3.3.1 Apresentação da geometria e das variáveis da simulação**

Foi usada uma junta colada para transferir o carregamento do substrato para o adesivo. Esta junta foi feita com o substrato de liga de alumínio 6061 e o adesivo como já foi

referido de PDMS, isto afim de garantir que somente o adesivo sofresse as solicitações impostas, uma vez que a rigidez do substrato é muito superior à do adesivo.

A geometria e dimensões da junta foram escolhidas e determinados com base na norma ASTM D1002 – 10 e que se pode observar na Figura 35.



*Figura 35-Geometria da Junta*

Através da análise da Figura 35 podemos observar que o adesivo tem uma espessura de 2 mm sendo que o substrato tem uma espessura de 10 mm, ambos com uma largura de 20 mm não observável na imagem uma vez que se trata de um desenho em 2 dimensões.

Convém frisar que a espessura do adesivo varia, 2, 4 e 6 mm a fim de analisar o seu efeito nos resultados obtidos. As variáveis de simulação encontram-se descritas na Tabela 1.

Tabela 1-Variáveis da simulação

Simulação	Espessura do adesivo (mm)	Deslocamento aplicado (mm)
1	2	2
2	2	3
3	2	4
4	4	2
5	4	3
6	4	4
7	6	2
8	6	3
9	6	4

Para além das variáveis acima descrita, espessura do adesivo e deslocamento aplicado, todas as simulações foram testadas com três modelos constitutivos diferentes, como referido no capítulo 2.4, (*Mooney-Rivlin, Ogden e Yeoh*) a fim de testar o que melhor se adapta ao presente caso.

### 3.3.2 Desenvolvimento do estudo numérico

A simulação numérica foi executada recorrendo ao programa comercial de elementos finitos ANSYS®. Neste programa existem dois módulos distintos de trabalho e que o são o *Mechanical APDL* e o *Workbench*. No caso específico do trabalho desenvolvido nesta dissertação, foi utilizado o módulo *Mechanical APDL*, essencialmente, por quatro razões a saber, a geometria de juntas de simples sobreposição é muito simples e torna-se mais prática desenhar no simulador de CAD do *Mechanical APDL*, neste módulo permite um melhor controlo tamanho e geometria da malha do que o *Workbench*, no pós-processamento o módulo *Mechanical APDL* permite uma análise da variação das tensões ao longo de uma linha de forma mais intuitiva e simples, finalmente, como o problema em análise pode ser simplificado para condições de estado plano de tensão, o módulo escolhido torna-se menos exigente sob o ponto de vista de cálculo.

Tal como em qualquer programa de elementos finitos, as simulações numéricas envolvem três fases, pré-processamento, processamento e pós-processamento. No pré-

processamento é definido o tipo de análise a realizar (estrutural, térmica, modal, etc.), o tipo de elemento finito, a geometria, as propriedades mecânicas, as condições de fronteira e a geração da malha. No processamento o programa efetua os cálculos matriciais para a determinação dos deslocamentos. No pós-processamento é possível analisar os resultados obtidos, no presente caso, os campos de deslocamentos, deformações e tensões.

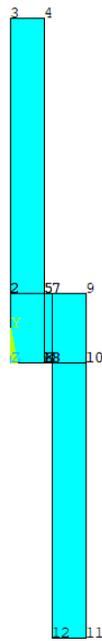
Assim, no pré-processamento escolhe-se o tipo de análise em questão, neste caso trata-se de uma análise estrutural, seguido da escolha do tipo de elemento (*solid 8 node 183* – elemento sólido quadrangular com 8 nós) para todos os elementos inserindo também as constantes do elemento neste caso a espessura do material.

De seguida, criou a geometria definida no ponto 3.3.1. Para simplificação do processo, definiu-se uma tabela (Tabela 2) com as coordenadas dos pontos chaves da geometria. Como a geometria é muito simples, iniciou-se o processo pela criação dos *keypoints* indicados na Tabela 2, entre estes criaram-se linhas, que foram agrupadas em quatro gerando uma área no interior de cada grupo, Figura 36.

*Tabela 2-Coordenadas dos pontos chave da geometria.*

<b>Ponto Nº</b>	<b>x</b>	<b>y</b>
1	0	0
2	0	20
3	0	100
4	10	100
5	10	20
6	10	0
7	12	20
8	12	0
9	22	20
10	22	0
11	22	-80
12	12	-80

1  
AREAS  
TYPE NUM



ANSYS  
R16.2  
Academic  
AUG 30 2018  
22:48:32

Figura 36-Figura ilustrativa dos pontos chave, linhas e áreas da geometria.

O passo seguinte, definiram-se as propriedades mecânicas dos materiais utilizados. Neste caso, existem dois tipos de materiais distintos para o aderente (liga de alumínio) e para o adesivo (PDMS). Para o primeiro caso, considera-se que, para o regime de funcionamento, o material tem um comportamento linear elástico e, sendo assim, basta introduzir os valores do coeficiente de *Poisson* (0,3) e o módulo de elasticidade (70 GPa). Já o PDMS tem um comportamento hiperelástico não linear e, para estes casos, é necessário utilizar a curva tensão-deformação obtida no ensaio experimental associado a um modelo constitutivo que descreva o comportamento hiperelástico do material. No presente trabalho foram analisados três modelos constitutivos, nomeadamente, *Mooney-Rivlin*, *Odgen* e *Yeoh*. Para uma análise mais completa das propriedades mecânicas e físicas dos materiais em questão, o leitor poderá consultar o Anexo A. Na Figura 37 é possível observar a janela do software onde são introduzidas as propriedades dos materiais.

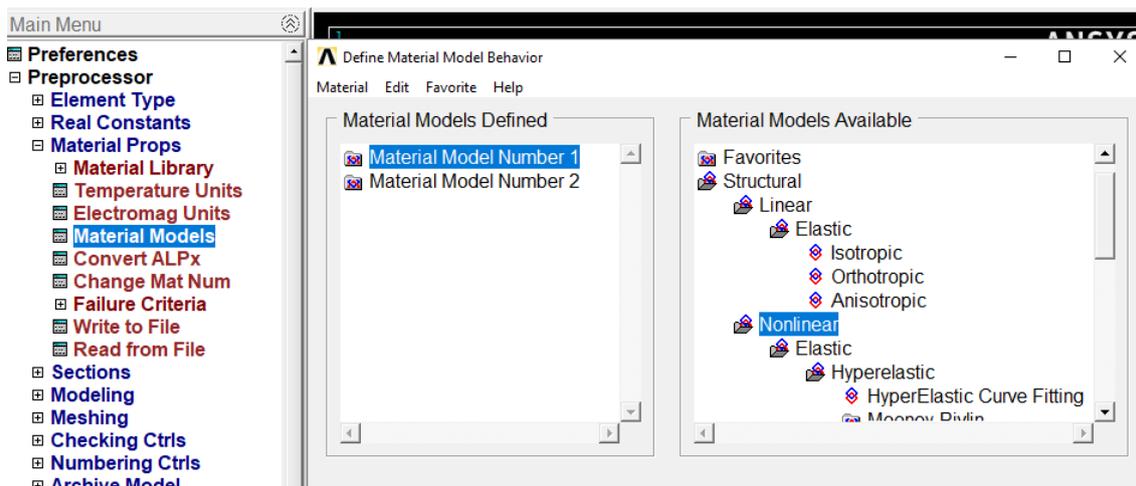


Figura 37-Escolha das propriedades dos materiais em questão.

Definidas a geometria e as propriedades mecânicas dos materiais, é necessário efetuar a correspondência das áreas da geometria com as propriedades do material. Assim, a área central, correspondente ao adesivo, terá as propriedades do PDMS e as outras áreas, correspondentes aos aderentes, terão as propriedades da liga de alumínio.

A próxima fase deve ter especial atenção, geração das malhas, onde se define o tamanho e geometria da malha, bem como, a necessidade de a refinar em regiões de concentração de tensão. Convém frisar que a malha é mais refinada na área do adesivo, e vai ficando mais grosseira ao longo do eixo y no substrato, Figura 38. Para as simulações realizadas neste trabalho, foram geradas malhas de elementos finitos com 2790 elementos e 8707 nós, sendo que, na malha mais refinada o tamanho do elemento é de 0,75 mm.

Posteriormente à caracterização das malhas vem a aplicação das condições de fronteira e carregamento. Posto isto, e a partir da análise da Figura 39, pode observar-se que na lateral do substrato existem condições de fronteira que permitem o movimento livre na direção do eixo y, na parte inferior do aderente considera-se um encastramento e na parte superior do aderente, considerou-se um deslocamento linear na direção y com um valor de 2 mm, para a primeira simulação.

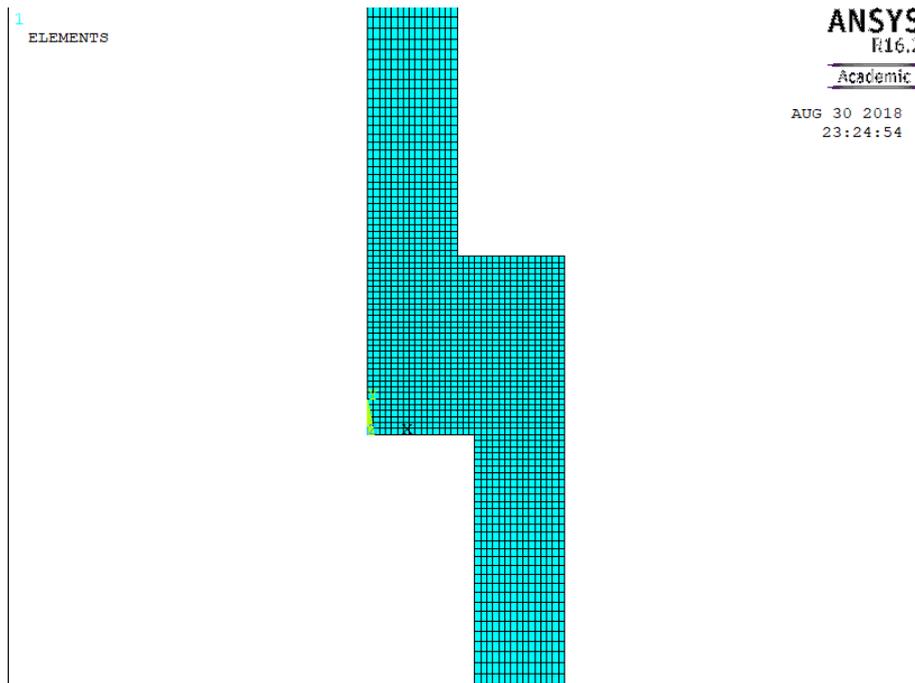


Figura 38-Estrutura da malha junto ao adesivo.

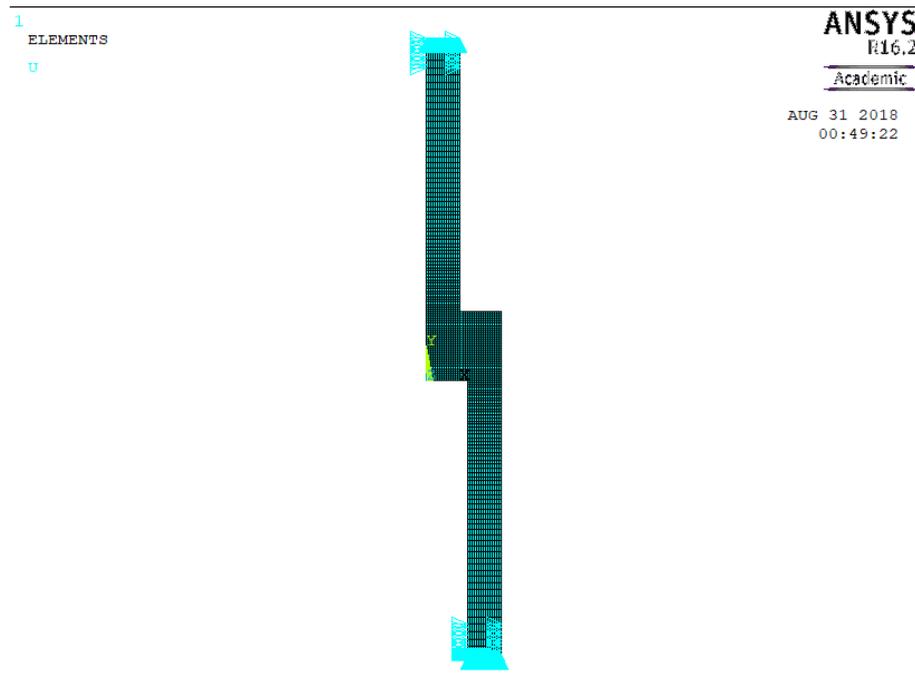


Figura 39-Ilustração das condições de fronteira e deslocamentos aplicados.

Como o problema em análise é não-linear, é necessário indicar o número de iterações a realizar, e ir verificando se encontra solução, ou seja, se converge dentro do intervalo selecionado. Neste caso, o número mínimo de iterações foi de 150 sendo o máximo 500, encontrando solução nesse intervalo e este processo corresponde à fase de processamento.

O processo descrito para o pré-processamento repetiu-se para todas as simulações realizadas neste trabalho, mudando apenas a espessura do adesivo, o deslocamento aplicado e o modelo constitutivo utilizado, sendo que este processo foi repetido cerca de 24 vezes, 9 simulações como se indica na Tabela 1 e cada simulação foi realizada com os três modelos constitutivos.

A análise e a avaliação do pós-processamento é efetuada no capítulo seguinte.

## 4 Análise e Discussão de Resultados

Ao longo deste capítulo serão analisados e avaliados os resultados obtidos, relativos às tensões de corte no adesivo para as 9 simulações efetuadas. Encontram-se ainda em anexo outras abordagens dos resultados obtidos.

Para uma melhor compreensão de como foram obtidos os dados referentes às tensões de corte de corte pode observar-se a Figura 40, onde foram definidos três caminhos independentes de modo a obter as tensões de corte nos nós pertencentes a esses caminhos. Esses nós são os que fazem fronteira com o substrato na lateral esquerda (Caminho a) e na direita (Caminho b) do adesivo e a linha de centro do adesivo (Caminho c). Com esta análise ao longo desses três caminhos tem-se uma melhor percepção da variação das tensões de corte ao longo do adesivo.

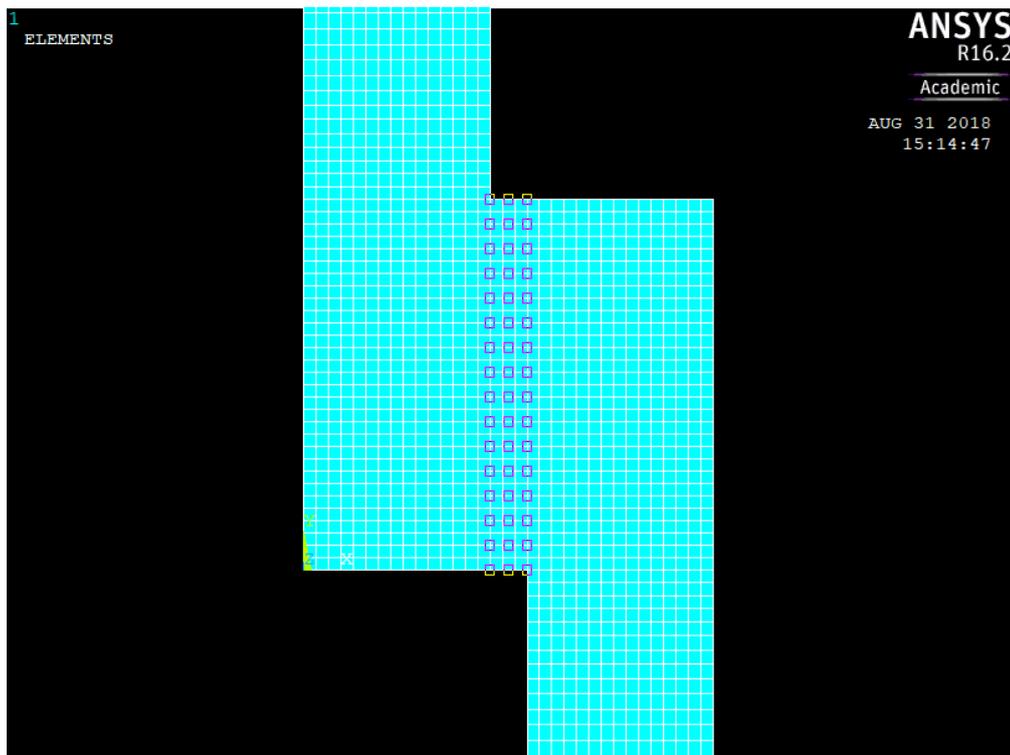


Figura 40- Marcação dos três caminhos: a) Fronteira lateral esquerda, c) Linha de centro do adesivo, b) Fronteira lateral direita.

## 4.1 Simulação 1

Dados obtidos para uma espessura de adesivo de 2 mm e um deslocamento aplicado, também, de 2 mm.

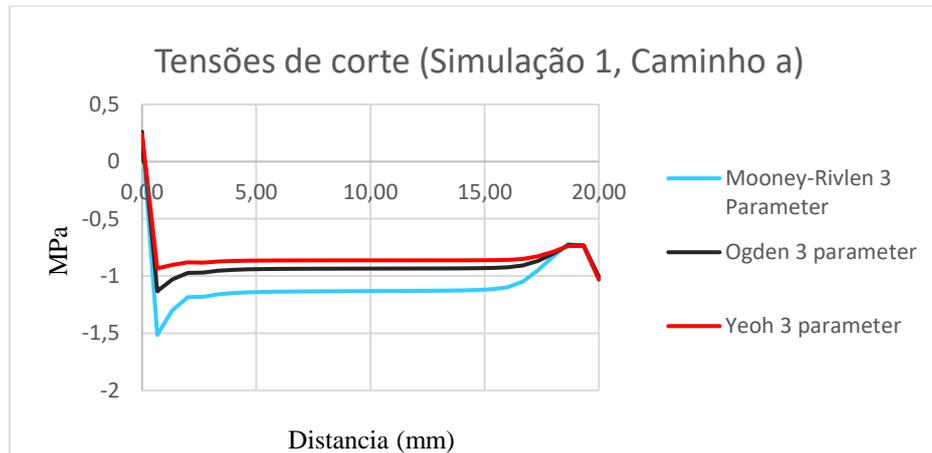


Figura 41-Tensões de corte (Simulação 1, Caminho a)

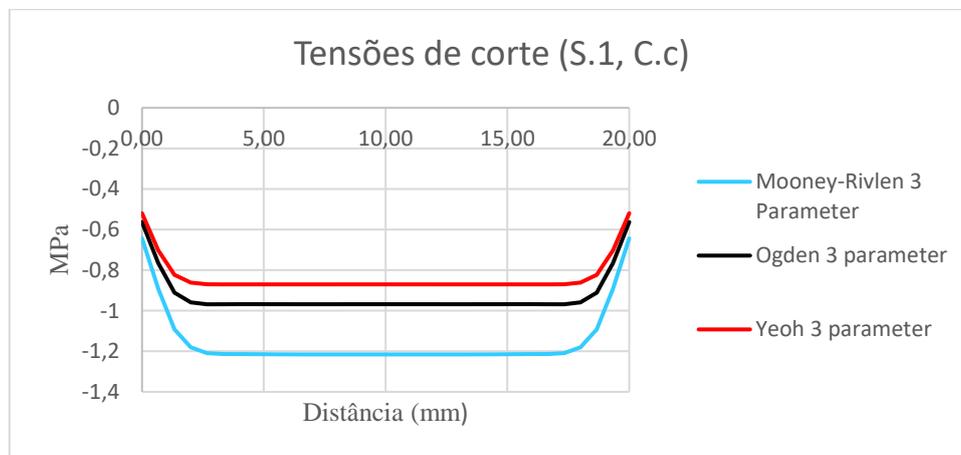


Figura 42-Tensões de corte (S.1, C.c).

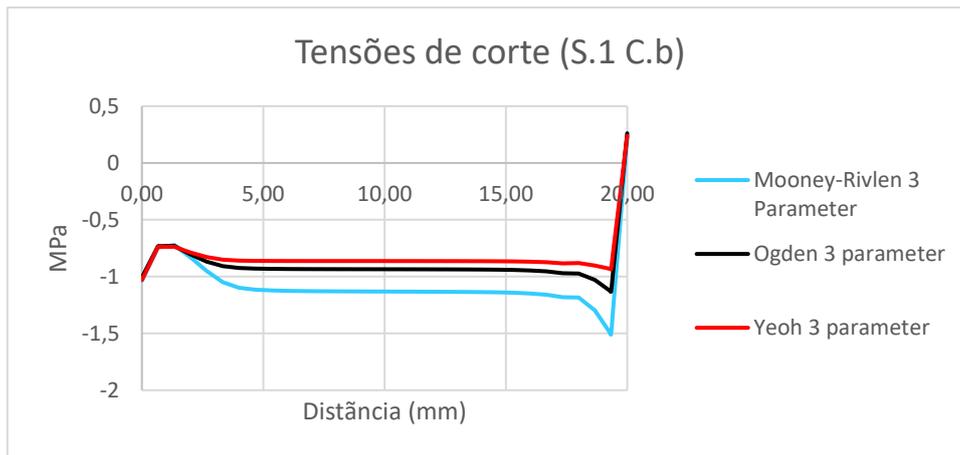


Figura 43-Tensões de corte (S.1, C.b).

Analisando as Figuras 41, 42 e 43 é notório que as tensões mais elevadas se encontram junto às fronteiras do adesivo com o substrato, sendo de valor inferior ocorre no centro do adesivo. Para um deslocamento aplicado de 2 mm, e espessura do adesivo de 2 mm, verifica-se que tensões de corte máximas ocorrem na zona de fronteira com um valor aproximado de 1,5 MPa, e na zona central do adesivo, tensões de 1,2 MPa.

## 4.2 Simulação 2

Resultados obtidos na simulação para uma espessura de adesivo de 2 mm e um deslocamento aplicado de 3 mm.

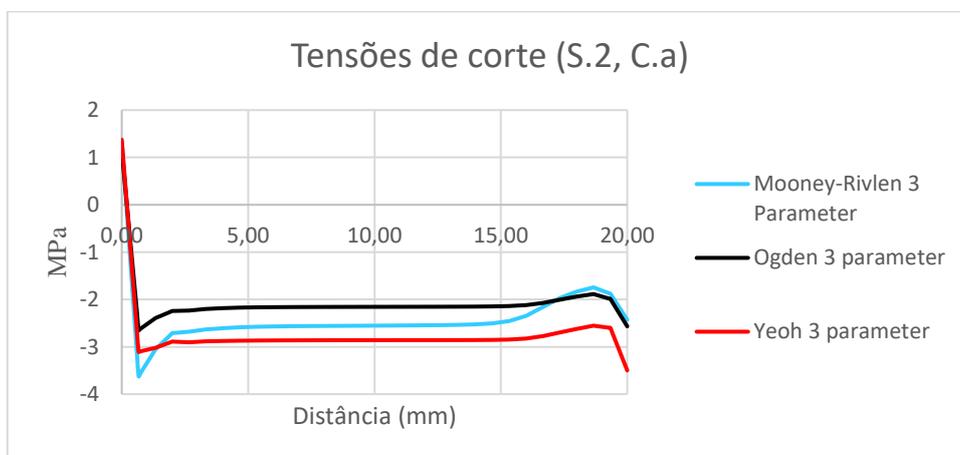


Figura 44-Tensões de corte (S.2, C.a).

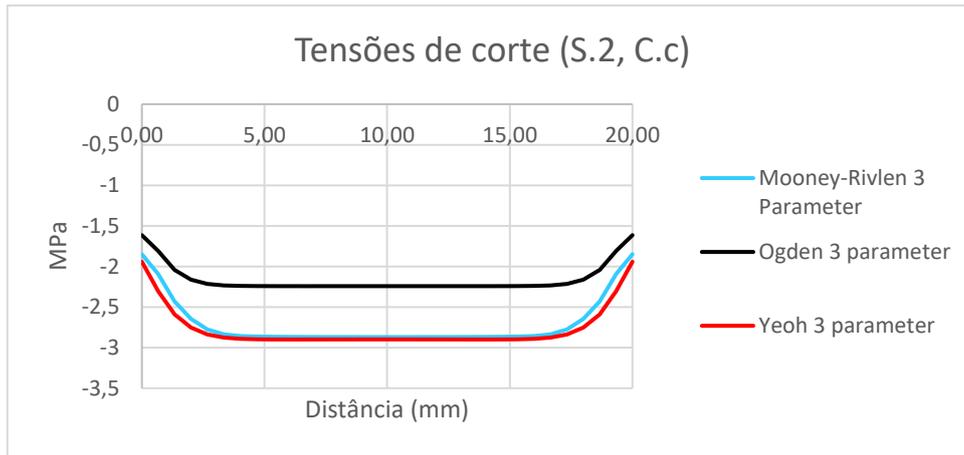


Figura 45-Tensões de corte (S.2, C.c).

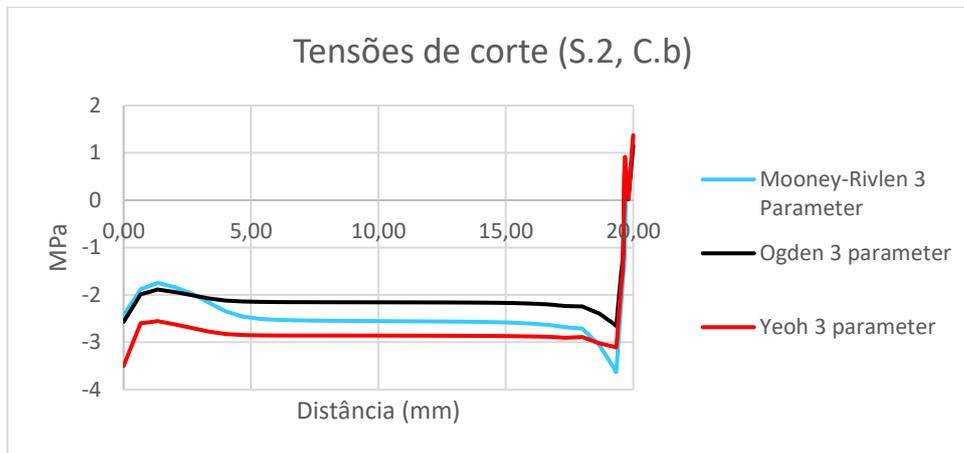


Figura 46-Tensões de corte (S.2, C.b).

Analisando as Figuras 44, 45 e 46 e comparando com as anteriores da simulação 1 é notório um aumento gradual das tensões máximas, o que era de esperar, uma vez que a espessura se mantém e o deslocamento aplicado é agora de 3 mm. Sendo que a tensão máxima é agora cerca de 4 MPa.

### 4.3 Simulação 3

Resultados obtidos na simulação 3 para uma espessura de adesivo de 2 mm e com um deslocamento aplicado de 4 mm.

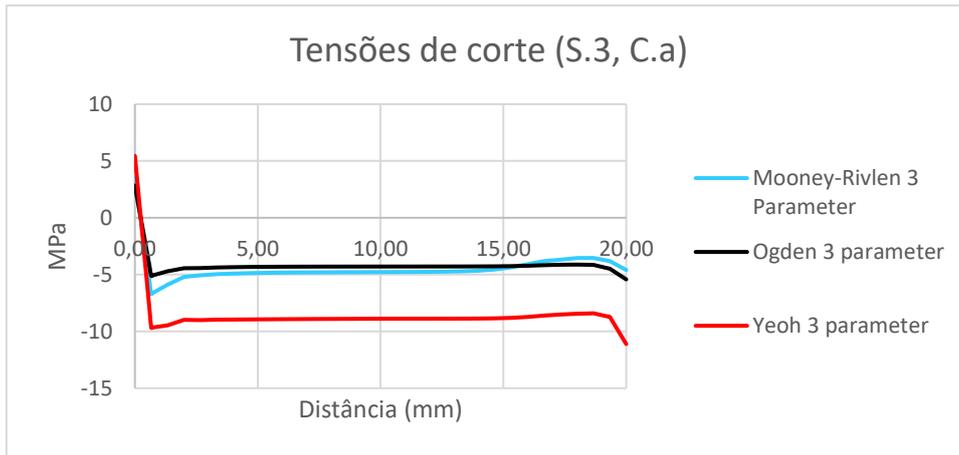


Figura 47-Tensões de corte (S.3, C.a).

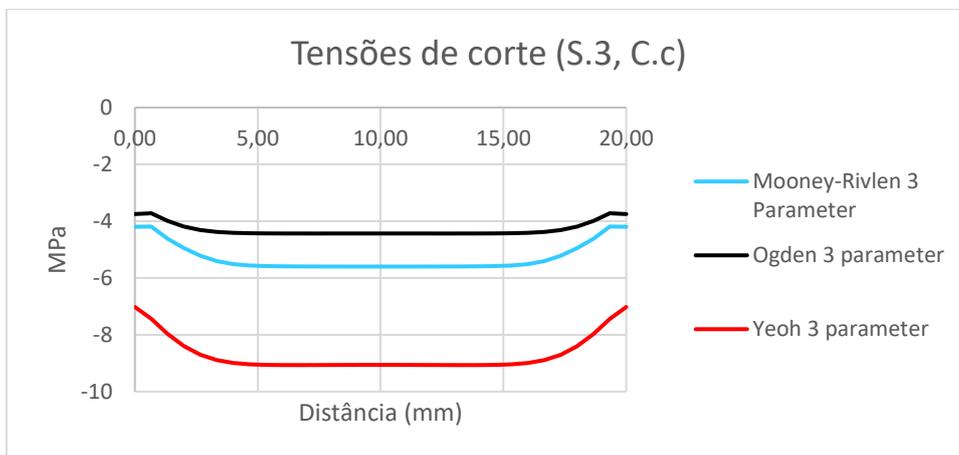


Figura 48-Tensões de corte (S.3, C.c).

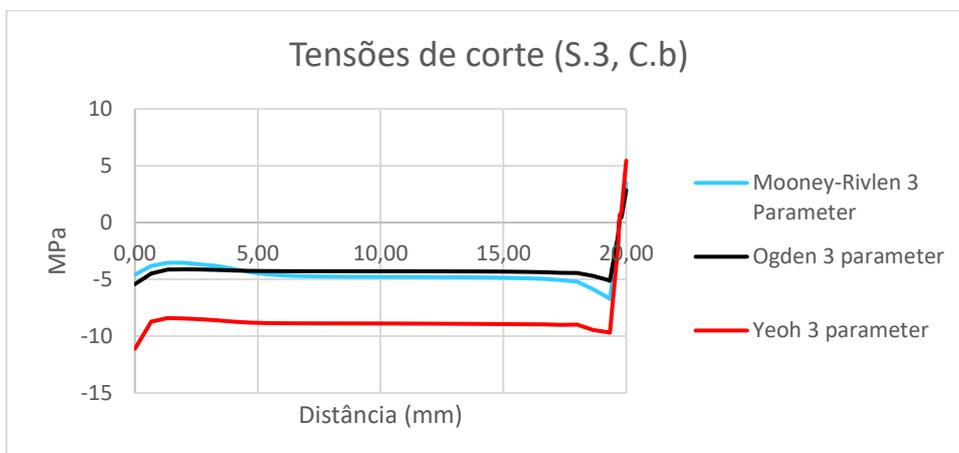


Figura 49-Tensões de corte (S.3, C.b).

Os resultados obtidos na simulação 3 e observando as Figuras 47, 48 e 49 pode afirmar-se que os modelos constitutivos de *Mooney-Rivlen* e *Odgen*, apresentam resultados muito próximos, enquanto que com o modelo de *Yeoh* verificam-se valores bastante superiores aos outros dois modelos. Assim sendo, a tensão máxima encontra-se, como esperado, na zona de fronteira e o seu valor é de cerca de 10 MPa, valor bastante elevado para o PDMS.

#### 4.4 Simulação 4

Resultados referentes à simulação 4, com uma espessura do adesivo de 4 mm e um deslocamento aplicado de 2 mm.

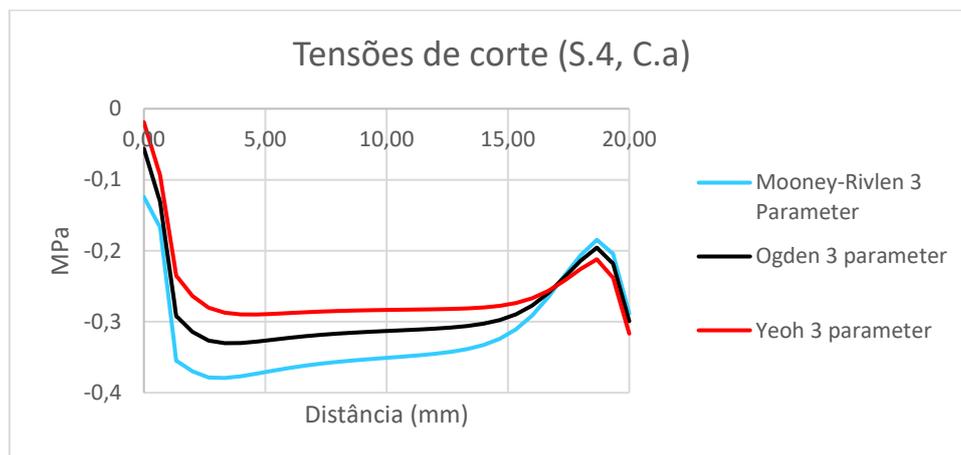


Figura 50-Tensões de corte (S.4, C.a).

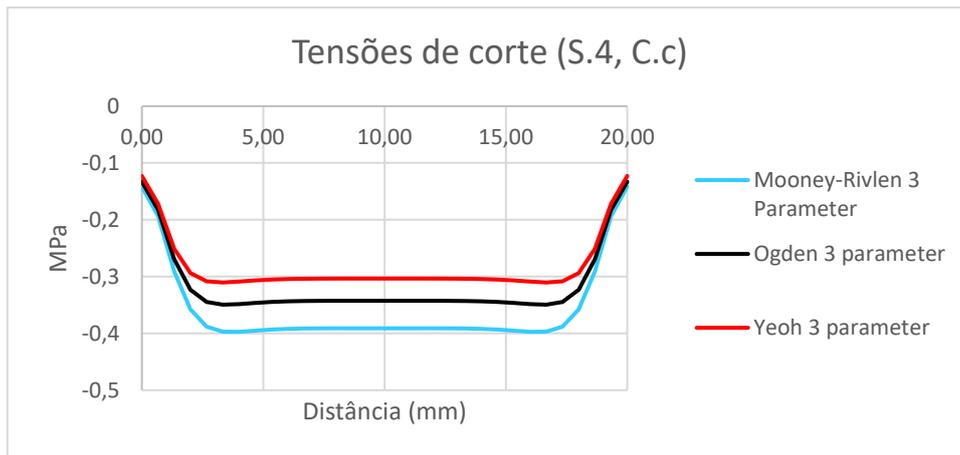


Figura 51-Tensões de corte (S.4, C.c).

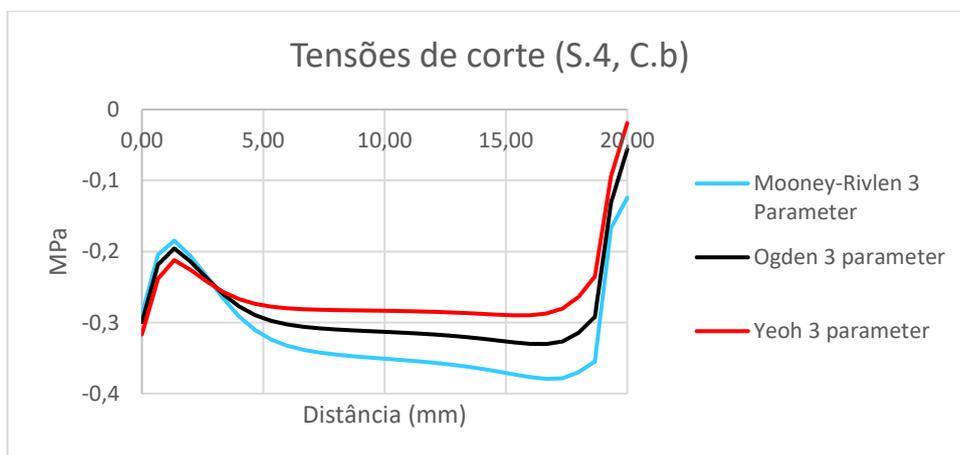


Figura 52-Tensões de corte (S.4, C.b).

Verificando as imagens anteriores Figura 50, 51 e 52 é perceptível que o valor das tensões de corte é bastante inferior do que em todas as simulações anteriores (Simulação 1, 2 e 3). Tal deve-se ao facto de a espessura do adesivo, nesta simulação ser superior e o deslocamento aplicado ser de apenas 2 mm. É visível também que os resultados são bastante próximos, independentemente do modelo constitutivo utilizado.

## 4.5 Simulação 5

Resultados referentes à simulação 5, com uma espessura do adesivo de 4 mm e um deslocamento aplicado de 3 mm.

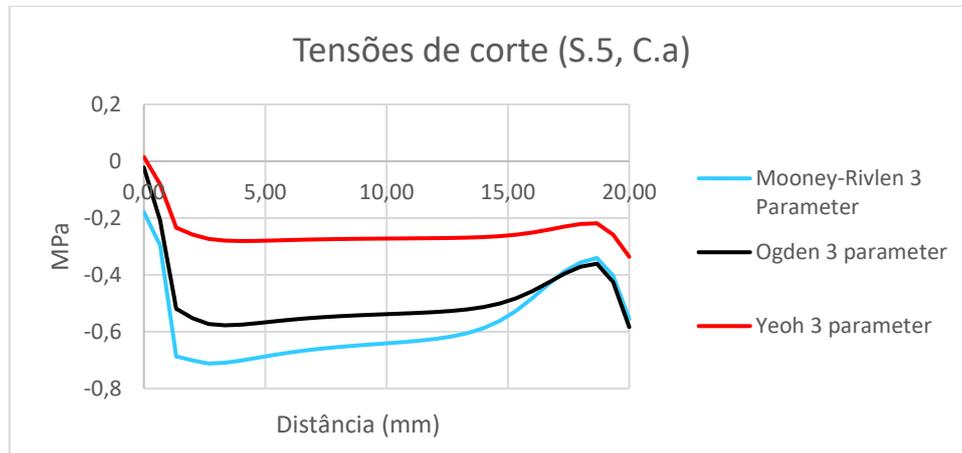


Figura 53-Tensões de corte (S.5, C.a).

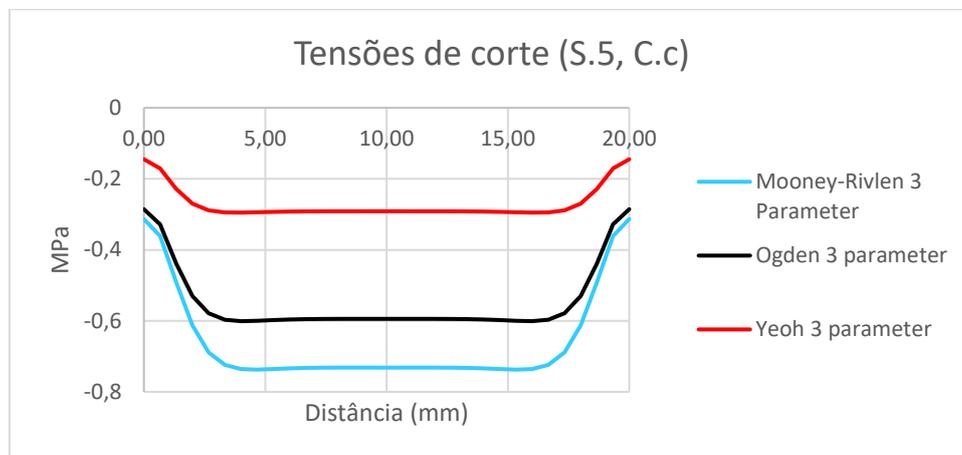


Figura 54-Tensões de corte (S.5, C.c).

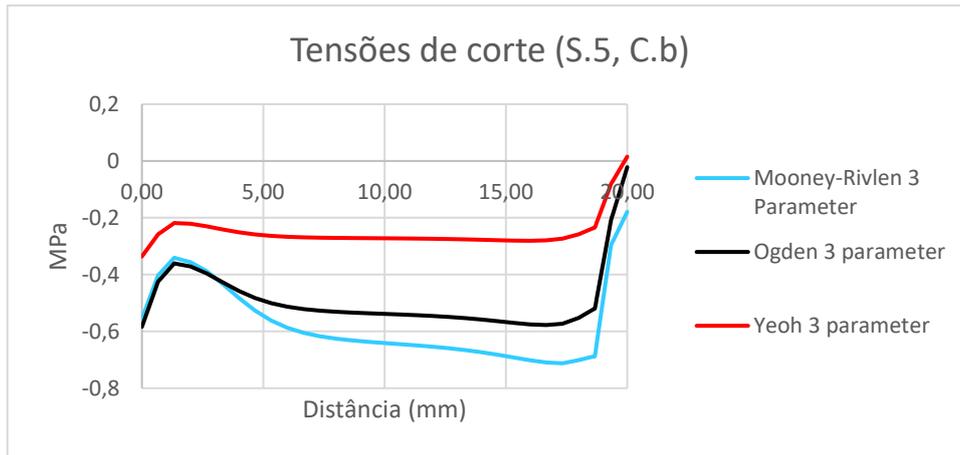


Figura 55-Tensões de corte (S.5, C.b).

Com as variáveis da simulação 5 (espessura de 4 mm e deslocamento aplicado de 3 mm) pode afirmar-se que o método que apresenta valores mais elevados de tensão é o modelo de *Mooney-Rivlin*, com tensões máximas de 0,7 MPa, sendo que estes valores são praticamente iguais em todos os caminhos (a, b e c).

#### 4.6 Simulação 6

Resultados obtidos para a simulação 6, com espessura do adesivo de 3 mm e deslocamento aplicado de 4 mm.

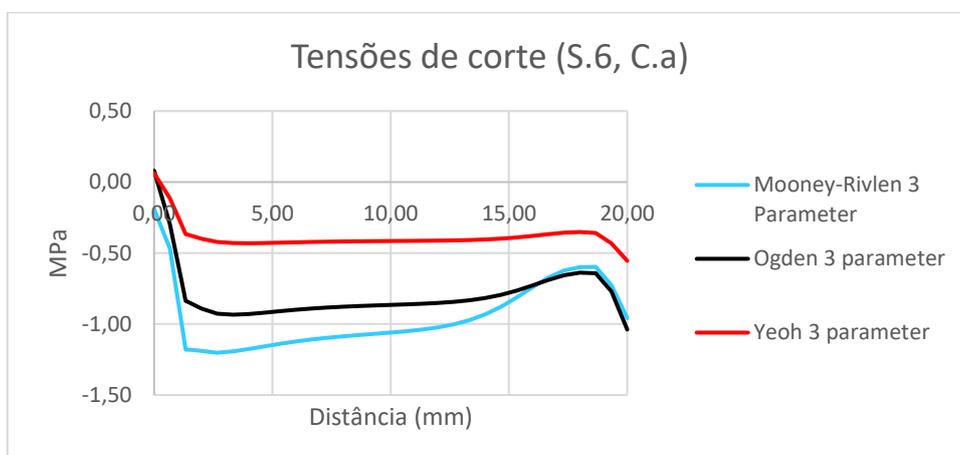


Figura 56-Tensões de corte (S.6, C.a).

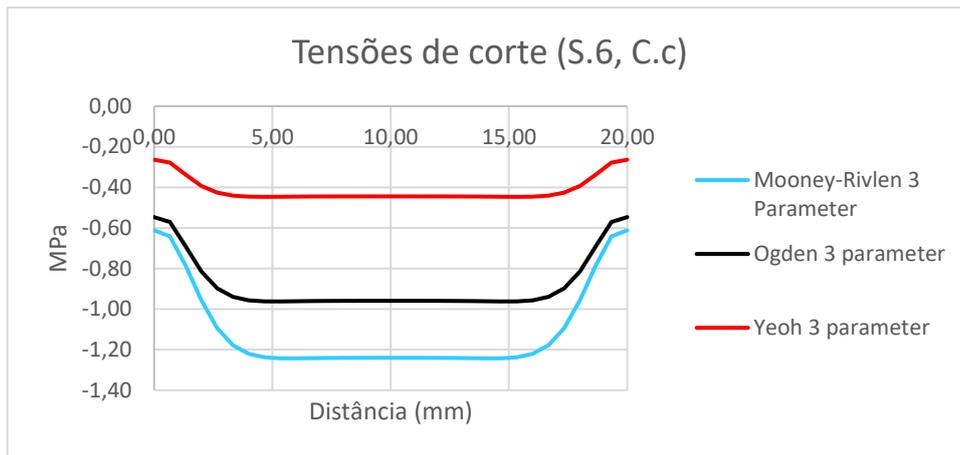


Figura 57-Tensões de corte (S.6, C.c).

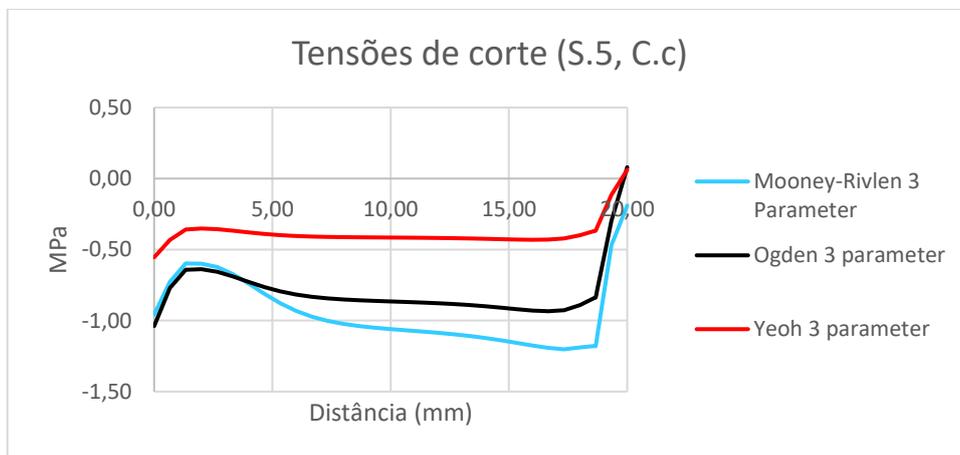


Figura 58-Tensões de corte (S.6, C.b).

Observando as imagens da simulação 6 é possível concluir-se que o valor máximo da tensão de corte é igual para todos os caminhos. Pode, também, concluir-se que o modelo constitutivo que apresenta valores de tensão mais baixos é o modelo de Yeoh, sendo o modelo de Mooney-Rivlen aquele que apresenta valores mais altos de tensões de corte. O valor mais alto registado nesse modelo é de cerca de 1,20 MPa sendo o mais baixo para esse mesmo modelo de 0,20 MPa.

## 4.7 Simulação 7

Dados relativos à solução da simulação 7, onde o adesivo possui uma espessura de 6 mm e o deslocamento aplicado é de 2 mm.

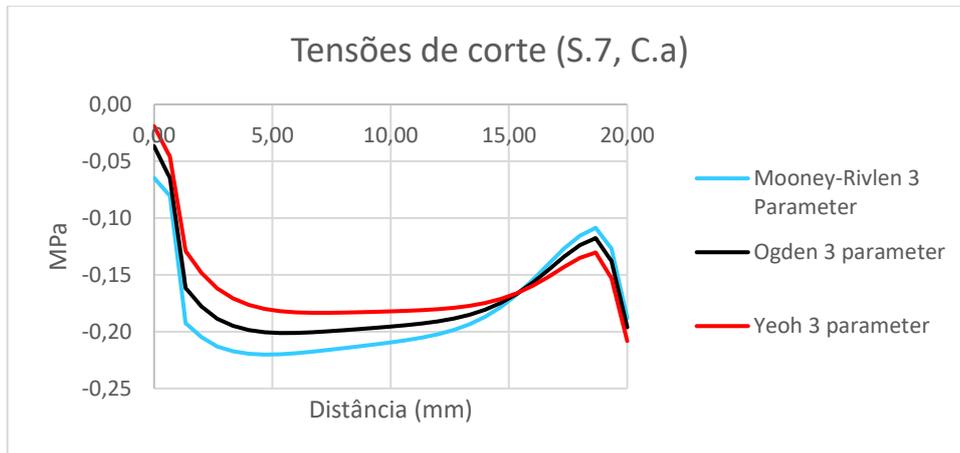


Figura 59-Tensões de corte (S.6, C.b).

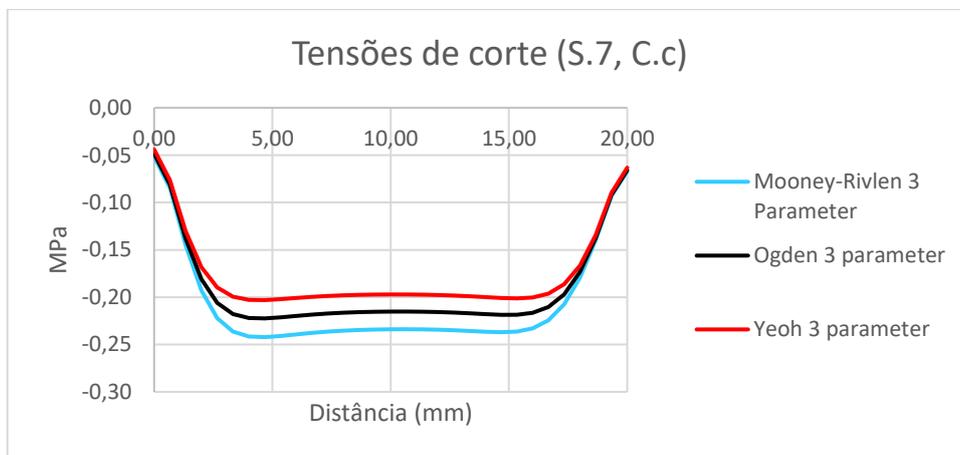


Figura 60-Tensões de corte (S.7, C.c).

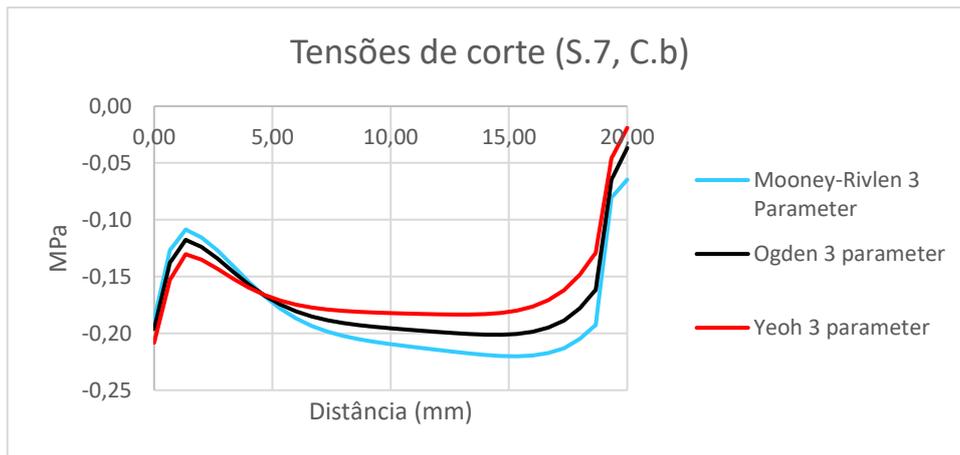


Figura 61-Tensões de corte (S.7, C.b).

Entre todas os resultados já apresentados as Figuras 59, 60 e 61 são aquelas que apresentam os valores de tensão mais baixo até ao momento, com máximas de 0,23 MPa. Resultado este espetável uma vez que se trata da simulação com a espessura de adesivo mais alta (6 mm) e valores de deslocamento aplicado mais baixo (2 mm). É também de fácil percepção a coerência dos diferentes métodos constitutivos, com diferenças de valores muito baixas.

## 4.8 Simulação 8

Resultados referentes à simulação 8, onde a espessura do adesivo é 6 mm e o deslocamento aplicado 3 mm.

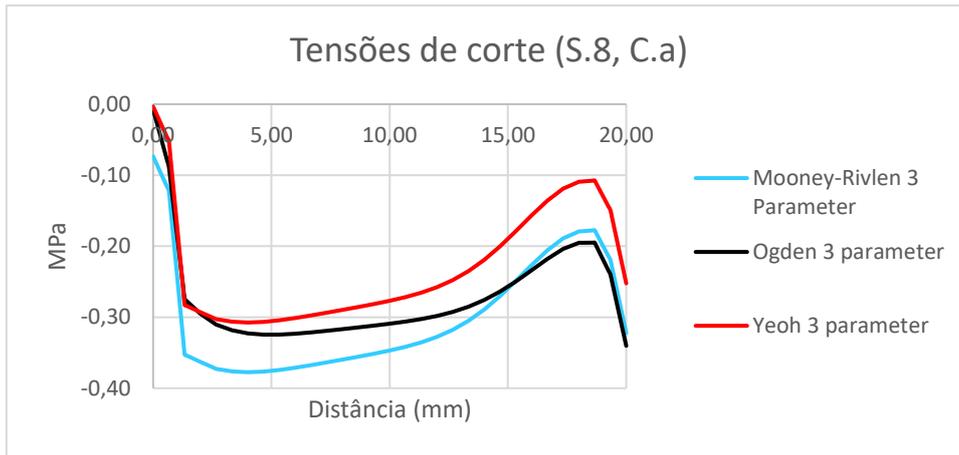


Figura 62-Tensões de corte (S.8, C.a).

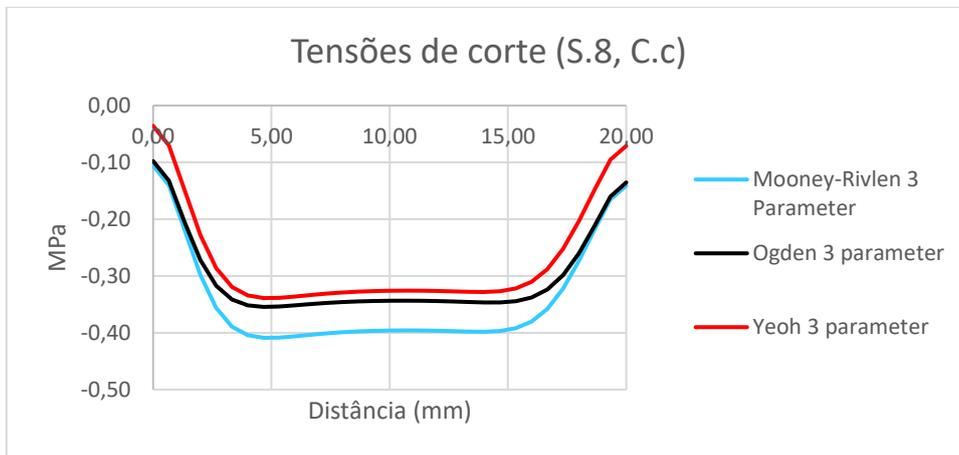


Figura 63-Tensões de corte (S.8, C.c).

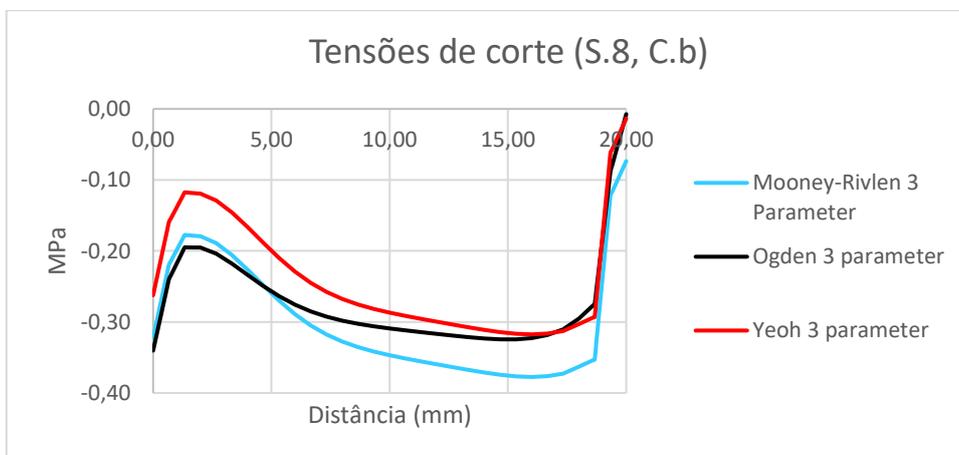


Figura 64-Tensões de corte (S.8, C.b).

Relativamente aos resultados da simulação 8 com uma espessura de adesivo de 6 mm e deslocamento aplicado de 3 mm pode afirmar-se que os resultados dos diferentes modelos constitutivos são muito semelhantes não havendo grande variação entre eles. Relativamente à simulação anterior (simulação 7) é perceptível que apenas com o aumento do deslocamento em 1 mm, as tensões de corte máximas aumentam para próximo do dobro, neste caso cerca de 0,40 MPa.

#### 4.9 Simulação 9

Por último, são aqui apresentados os resultados obtidos para a simulação 9, onde o adesivo possui uma espessura de 6 mm e o deslocamento aplicado é de 4 mm.

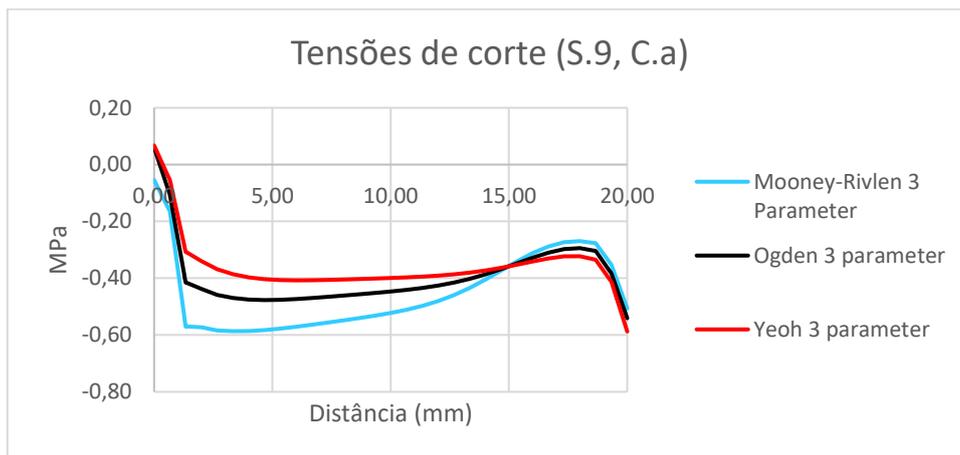


Figura 65-Tensões de corte (S.9, C, a).

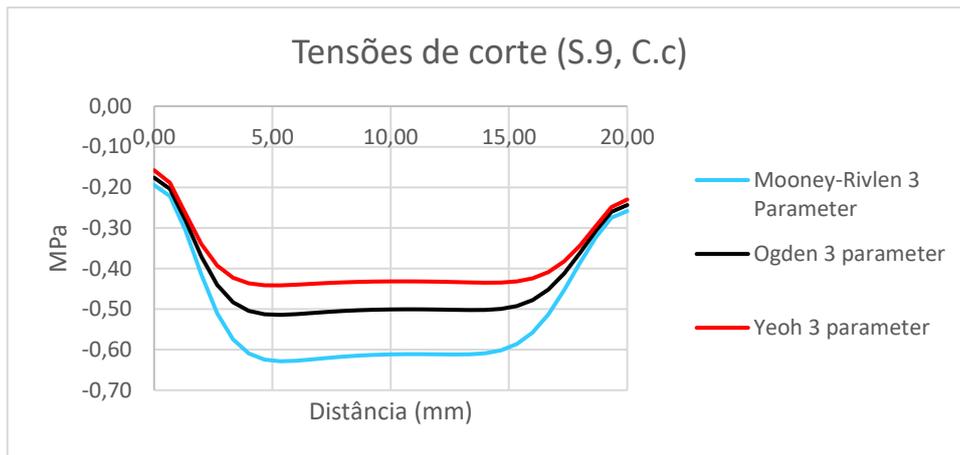


Figura 66-Tensões de corte (S.9, C.c).

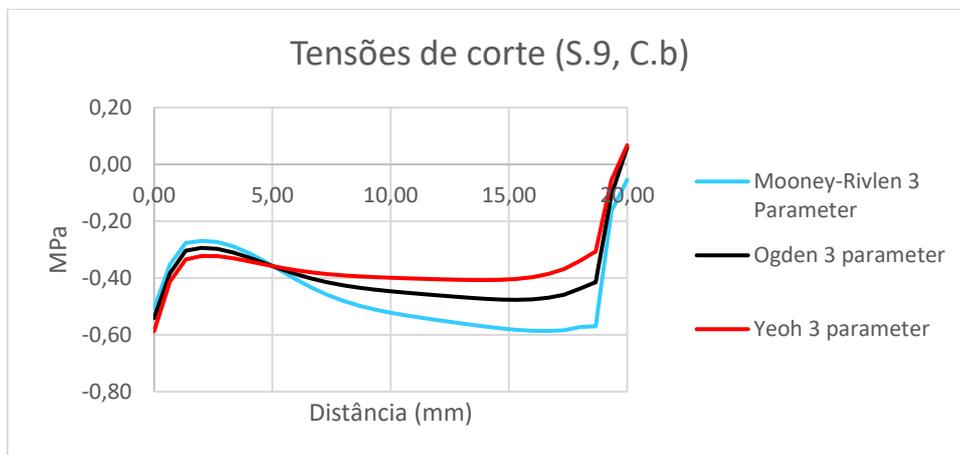


Figura 67-Tensões de corte (S.9, C,b).

Analisando a Figuras 65, 66 e 67 correspondentes à simulação 9, é perceptível que apesar de aplicado um grande deslocamento (4 mm), as tensões de corte apresentam valores relativamente baixos (0,61 MPa, para o pior cenário), isso deve-se ao aumento significativo da espessura do adesivo, que neste caso corresponde a 6 mm.

Verificando não só os resultados relativos à simulação 9, mas todos os outros, de todas as simulações já apresentadas, há três características relativas aos modelos constitutivos que ressaltam à vista do observador. O primeiro é que o modelo constitutivo de *Ogden* é aquele que apresenta sempre valores intermédios. O segundo ponto também muito importante é que para espessuras baixas e grandes deslocamentos aplicados (tensões de

corte de valor elevado) o modelo de *Yeoh* é aquele que apresenta valores mais altos, com diferenças significativas para com os outros dois. E, por último, para tensões de corte mínimas (espessura elevada e deslocamento aplicado baixo) o modelo de *Mooney-Rivlen* apresenta sempre os valores de tensões de corte mais elevados. Para uma melhor percepção do melhor modelo constitutivo a aplicar em determinado caso seria necessário efetuar um estudo experimental.

Como já foi referido anteriormente, a espessura do adesivo tem grande influências nas tensões de corte geradas, como se pode observar, para o mesmo deslocamento aplicado as tensões de corte diminuem com o aumento da espessura do adesivo.

## 5 Conclusões e propostas de trabalhos futuros

### 5.1 Conclusões

Neste trabalho foi realizado inicialmente um trabalho experimental para caracterizar o polímero polidimetilsiloxano (PDMS) com o intuito de, posteriormente, ser elaborado um estudo numérico a fim de perceber o comportamento do polímero como adesivo quando solicitado por um deslocamento externo. Para isso foram realizados estudos com diferentes parâmetros e modelos constitutivos para compreender a influência dos mesmos nas tensões de corte geradas.

Ao decorrer da elaboração da segunda parte do presente trabalho, realização do estudo numérico, foi possível analisar como o deslocamento aplicado e a espessura do adesivo influenciam a resistência ao corte. Assim sendo, é possível verificar que um aumento do deslocamento aplicado para a mesma espessura do adesivo origina tensões de corte mais elevadas, para além disso, observa-se que este aumento ocorre de uma forma praticamente linear.

Relativamente ao outro parâmetro em estudo (espessura do adesivo), conclui-se que o aumento da espessura do adesivo provoca uma maior resistência ao corte, sendo apenas linear para pequenos deslocamentos aplicados.

No que aos modelos constitutivos diz respeito, pode concluir-se que qualquer um deles pode ser utilizado neste tipo de estudos numéricos com materiais hiperelásticos, contudo, uns apresentam melhores resultados que outros dependendo das condições aplicadas ao problema. De entre os três modelos constitutivos estudados, verifica-se que, para a maioria das simulações realizadas para diferentes condições, o modelo de *Ogden*, apresenta sempre resultados intermédios relativamente aos outros dois modelos. Contudo, pode afirmar-se que em situação real o modelo de *Yeoh* deve ser utilizado em situações onde exista um grande deslocamento aplicado e pequena espessura do adesivo. Pois analisando os resultados em 4.2 e 4.3 é notório que o modelo constitutivo que apresenta valores máximos de tensão de corte (3 MPa e 10MPa) respetivamente, é o modelo de *Yeoh*. Assim em situação real o projetista deve optar sempre por o modelo que apresenta os resultados mais desfavoráveis. Sendo que para a situação contrária (pequeno

deslocamento aplicado e espessura do adesivo elevada) o projetista deve optar pelo modelo de *Mooney-Rivlen*, por este apresentar os resultados mais desfavoráveis, como é possível observar em 4.4 e 4.7.

Ainda em relação a segunda parte do trabalho pode afirmar-se que, com os resultados obtidos, é possível verificar o comportamento de um material hiperelástico, ou seja material que pode sofrer grandes deslocamentos sem que a sua estrutura seja danificada.

Por último, pode afirmar-se que os materiais hiperelásticos são materiais muito importantes no mundo da engenharia e que podem ter as mais diversas aplicações, sempre que seja necessário um material que necessite de sofrer grandes deformações, sem que ocorra a rotura do mesmo.

## **5.2 Propostas de trabalhos futuros**

A partir dos resultados obtidos, podem ser sugeridos como trabalhos futuros:

1. Efetuar o mesmo estudo para outros tipos de materiais hiperelásticos;
2. Efetuar o mesmo estudo, mas com a presença de filete no adesivo, comparando assim a influência do mesmo nos resultados obtidos;
3. Realizar um procedimento experimental com as mesmas condições que o estudo numérico efetuado a fim de comparar os resultados obtidos.
4. Elaborar o mesmo tipo de estudo com outras tipologias de junta de modo a perceber qual a influência da junta escolhida.
5. Realizar o mesmo tipo de estudo alterando o material do substrato a fim de perceber a influência do mesmo nas tensões de corte obtidas no adesivo.

## 6 Referências

- [1] J. A. B. P. Neto, R. D. S. G. Campilho, and L. F. M. Da Silva, “Parametric study of adhesive joints with composites,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 37, pp. 96–101, 2012.
- [2] E. . Petrie, *Handbook of adhesives and sealants*. McGraw-Hill, 2000.
- [3] A. Kumar and R. K. Gupta, *Fundamentals of polymer engineering, revised and expanded*. CRC Press, 2003.
- [4] L. F. M. da Silva, A. G. de Magalhães, and M. F. S. F. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. Porto: Publindústria, 2007.
- [5] A. M. G. Pinto, “Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos,” Dissertação de doutoramento. Faculdade de engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.
- [6] D.Araújo, “Ciência Hoje On-line,” *Instituto Ciência Hoje*. [Online]. Available: <http://www.cienciahoje.uol.com.br>.
- [7] T. Faneco, “Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductibilidade,” Dissertação de Mestrado, Faculdade de engenharia do Porto, Porto, 2014.
- [8] M. Santos, “Estudo numérico da fratura em modo misto de juntas adesivas pelo ensaio single-leg bending,” Tese de mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2016.
- [9] M. Cabello, J. Zurbitu, J. Renart, A. Turon, and F. Martínez, “A non-linear hyperelastic foundation beam theory model for double cantilever beam test with thick flexible adhesive,” *Int. J. Solids Struct.*, 2016.
- [10] I. Lubowiecka, M. Rodríguez, E. Rodríguez, and D. Martínez, “Experimentation, material modelling and simulation of bonded joints with a flexible adhesive,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 37, pp. 56–64, 2012.

- [11] J. C. P. Figueiredo, R. D. S. G. Campilho, E. A. S. Marques, J. J. M. Machado, and L. F. M. da Silva, “Adhesive thickness influence on the shear fracture toughness measurements of adhesive joints,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 83, no. March, pp. 15–23, 2018.
- [12] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. Moura, and J. J. M. S. Domingues, “Modeling single and double lap repairs and composite materials,” *Compos. Sci. Technol.*, pp. 1948–1958, 2005.
- [13] R. D. Adams and R. G. H. Davies, *Strength of lap shear joints, in The Mechanics of adhesion*. Amesterdão: Elsevier, 2002.
- [14] R. D. Adams, J. Comyn, and W. W. C. Wake, *Strutural adhesive Joints in Engeneering*, Second edi. London: Chapman & Hall, 1997.
- [15] ASTM D 5573 - 99, "Standart Practice for Classifying Failure Modes in Fiber Joints"
- [16] A. V. Pocius, *Adhesion and Adhesives Technology*, 2nd ed. An Introduction.
- [17] E. . Petrie, “The fundamentals of adhesive joint design and construction: Function-specific construction is the key to proper adhesion and load-bearing capabilities.,” *Met. Finish.*, pp. 41–47, 2008.
- [18] Y. H. Lin, S. W. Kang, and T. Y. Wu, “Fabrication of polydimethylsoxane (PDMS) pulsating heat pipe,” *Appl. Therm. Eng.*, 2009.
- [19] R. Brown, *Handbook of Polymer Testing*. Shropshire: Rapra Tecnology Limited, 2002.
- [20] J. W. Dally and W. F. Riley, *Experimental Stress Analysis*, 4th Ed. McGraw-Hill, 2005.
- [21] N. R. P. Moreira, “Estudo de várias propiedades mecânicas do polidimetilsiloxano (PDMS) usado em dispositivos biomédicos,” Tese de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2013.
- [22] M. Banea, “Mechanical characterization of flexible adhesives,” *J. Adhes.*, vol. 85,

no. 4–5, 2009.

- [23] F. S. . de Sousa, “Caracterização de adesivos de altas temperaturas para aplicações aeroespaciais,” Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, 2010.
- [24] A. F. Padilha, *Materiais de Engenharia*. Hemus, 1997.
- [25] S. P. Timoshenko, *Mecânica dos Sólidos Timoshenko*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1983.
- [26] M. Mooney, “A theory of large elastic deformation,” *J. Appl. Phys.*, vol. 11, no. 9, pp. 582–592, 1940.
- [27] R. Rivlin, “Large elastic deformations of isotropic materials. IV Further developments of the general theory,” *Philos. Trans. R. Soc. a Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 241, no. 835, pp. 379–397, 1948.
- [28] P. Martins, R. M. Natal Jorge, and A. J. M. Ferreira, “A comparative study of several material models for prediction of hyperelastic properties: Application to silicone rubber and soft tissues,” *Strain*, vol. 42, no. 3, pp. 135–147, 2006.
- [29] R. W. Ogden, *Non-linear elastic deformations*. Courier Corporation, 1997.
- [30] P. R. Fernandes and P. Bartolo, *Tissue Engineering: Computer Modeling Biofabrication and Cell Behavior*. Lisbon: Editora Springer, Livro Computacional Methods in Applied Sciences, 2014.
- [31] T. Proulx, “Mechanics of Biological Systems and Materials,” in *Proceedings of the 2011 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics*, Editor Springer, 2012, vol. 16, p. 21.
- [32] J. Ribeiro, H. Lopes, B. Mendonça, and P. Martins, “Determinação do Campo de deslocamentos de tecidos biológicos hiperelásticos,” *Rev. Ibero Am. Ing. Mecânica*, vol. 16, no. 11, 2012.
- [33] A. K. Bhowmick, M. Hall, and H. Benarey, “Rubber Products Manufacturing Technology,” in *Editor Disclaim and Liability for loss*, 2004, pp. 504–505.
- [34] B. Donald, “Practical Stress Analysis with Finite Elements,” *Glas. Publishing*,

*Irel.*, p. 159, 2007.

- [35] E. Austrell and L. Kari, “Constitutive Models for Rubber IV,” in *Proceedings of the fourth European Conference on Constitutive Models for Rubber*, 2005, p. 90.
- [36] J. P. Pascon, “Modelos constitutivos para materiais hiperelásticos: estudo e implementação computacional,” Tese de Mestrado, Universidade do Minho, 2008.
- [37] K. L. Lawrence, *ANSYS Tutorial: Release 14*. SDC Publications, 2012.
- [38] J. I.D., D. K. McCluskey, and C. K. L. Tan, “Mechanical characterization of bulk Sylgard 184 for microfluidics and microengineering,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 24, no. 3, pp. 17–35, 2014.

## Anexo A: Propriedades do adesivo (Sylgard 184) e do Substrato (Alumínio 6061)

Tabela 3- Propriedades do Adesivo Sylgard 184

Propriedades	Sylgard 184
<b>Mecânicas</b>	
Dureza	50
Resistência a Tração	6,75 (MPa)
Alongamento (%)	--
Retração (%)	--
Índice de Refração	1,41
<b>Elétricas</b>	
Força Dielétrica (V/mm)	540
Constante Dielétrica até 100 Hz	2,7
Fator de Dissipação até 100 Hz	<0,001
Volume de Resistividade	$2,9 \times 10^{14}$
<b>Térmicas</b>	
Faixa de Temperatura útil (°C)	-45 até 200
Condutividade Térmica	0,2 (W/mK)
Coefficiente de Expansão	--
Calor Específico (cal/g°C)	--

Tabela 4- Propriedades Físicas de algumas ligas de alumínio

### Propriedades Físicas Típicas

Liga	Peso Específico (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de Elasticidade MPa	Módulo de Rigidez MPa	Temperatura de Fusão (°C)	Calor Específico (0-100°C) (Cal./g°C)	Coefficiente de Expansão Linear (L/°C)	Condutibilidade Térmica (25°C) (Cal./cm °C)	Condutibilidade Elétrica (IACS)%
1050	2,70	70000	26500	650-660	0,22	24x10-6	0,50	60,0
1350	2,70	70000	26500	650-660	0,22	23x10-6	0,54	61,8
2011	2,82	72500	27500	535-645	0,23	23x10-6	0,37	40,0
2014	2,80	75000	28500	510-640	0,21	23x10-6	0,37	38,0
2017	2,80	73500	28000	510-640	0,22	24x10-6	0,29	34,0
2024	2,77	74500	28500	500-640	0,22	23x10-6	0,29	30,0
3003	2,73	70000	26500	640-655	0,22	23x10-6	0,38	43,0
5052	2,68	72000	27500	595-650	0,23	23x10-6	0,33	34,0
5356	2,63	72500	27500	570-640	0,23	24x10-6	0,27	26,0
6060 6063 e X6463	2,71	70000	26500	600-650	0,21	23x10-6	0,48	52,0
6061	2,71	70000	26500	580-650	0,22	24x10-6	0,37	40,0
6101	2,71	70000	26500	605-655	0,22	23x10-6	0,49	55,0
6261	2,71	70000	26000	570-655	0,22	23x10-6	0,44	47,0
6262	2,71	70000	26700	582-652	0,21	23x10-6	0,37	44,0
6351	2,71	70000	26500	555-650	0,21	24x10-6	0,44	45,5
7075	2,80	73000	27500	475-630	0,23	24x10-6	0,29	30,0

Tabela 5- Propriedades Mecânicas do alumínio 6061

### Propriedades Mecânicas

Liga	DIN	Tempera	Limite de Resistência à Tração Mpa (N/mm <sup>2</sup> )		Limite de escoamento Mpa (N/mm <sup>2</sup> ) Min.	Alongamento Mínimo "50mm" (%)	Dureza Brinell (HB)
			MÍN.	MÁX.			
6061	Al Mg Si Cu	T4	180	-	110	16	65
		T6	260	-	240	8	95

# Anexo B: tensões de corte simulação 1 modelo de Ogden

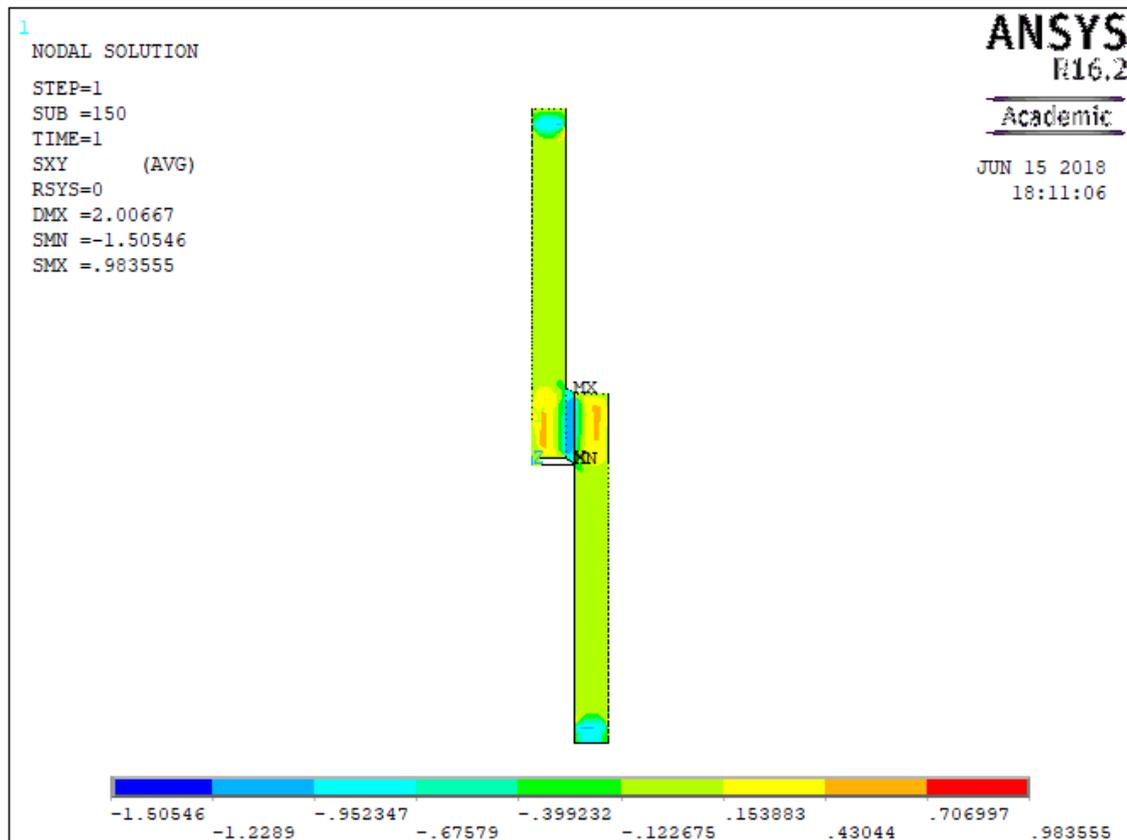


Figura 68- Tensões de corte simulação 1 modelo de Ogden

# Anexo C: Tensões de corte simulação 2 modelo de Ogden

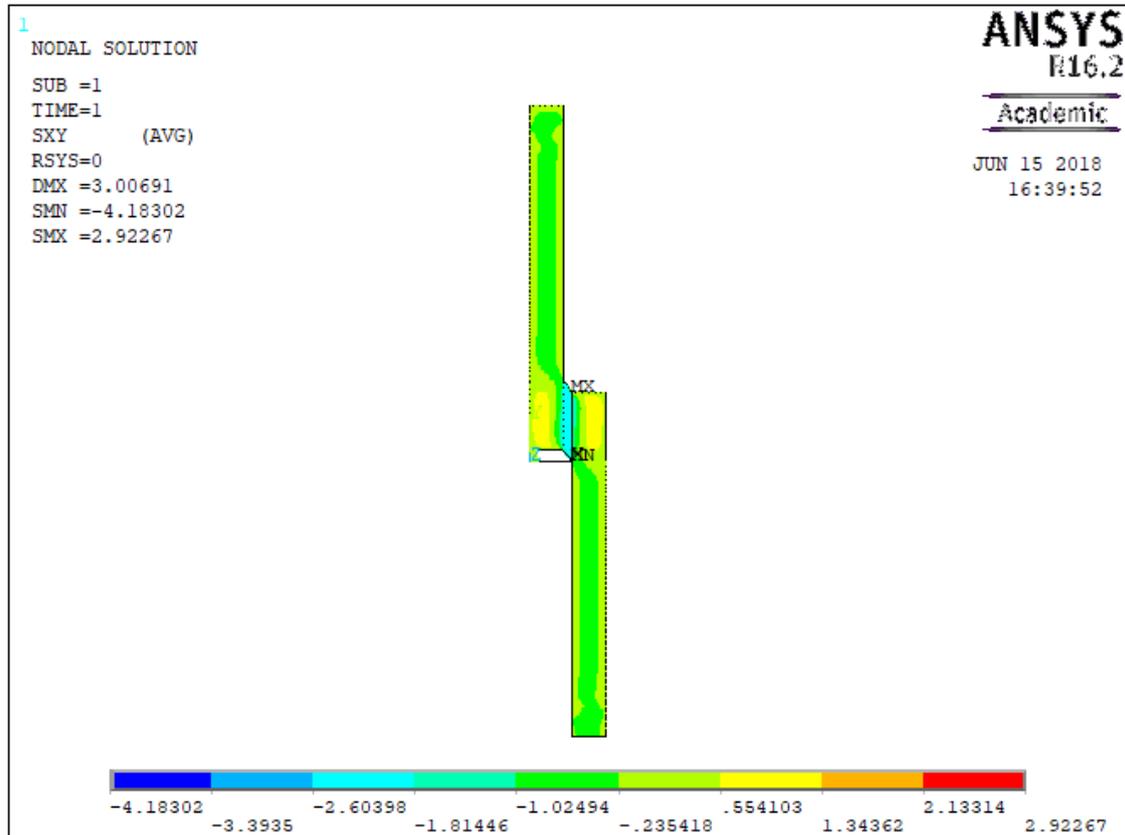


Figura 69- Tensões de corte simulação 2 modelo de Ogden.

# Anexo D: Tensões de corte simulação 3 modelo de Ogden

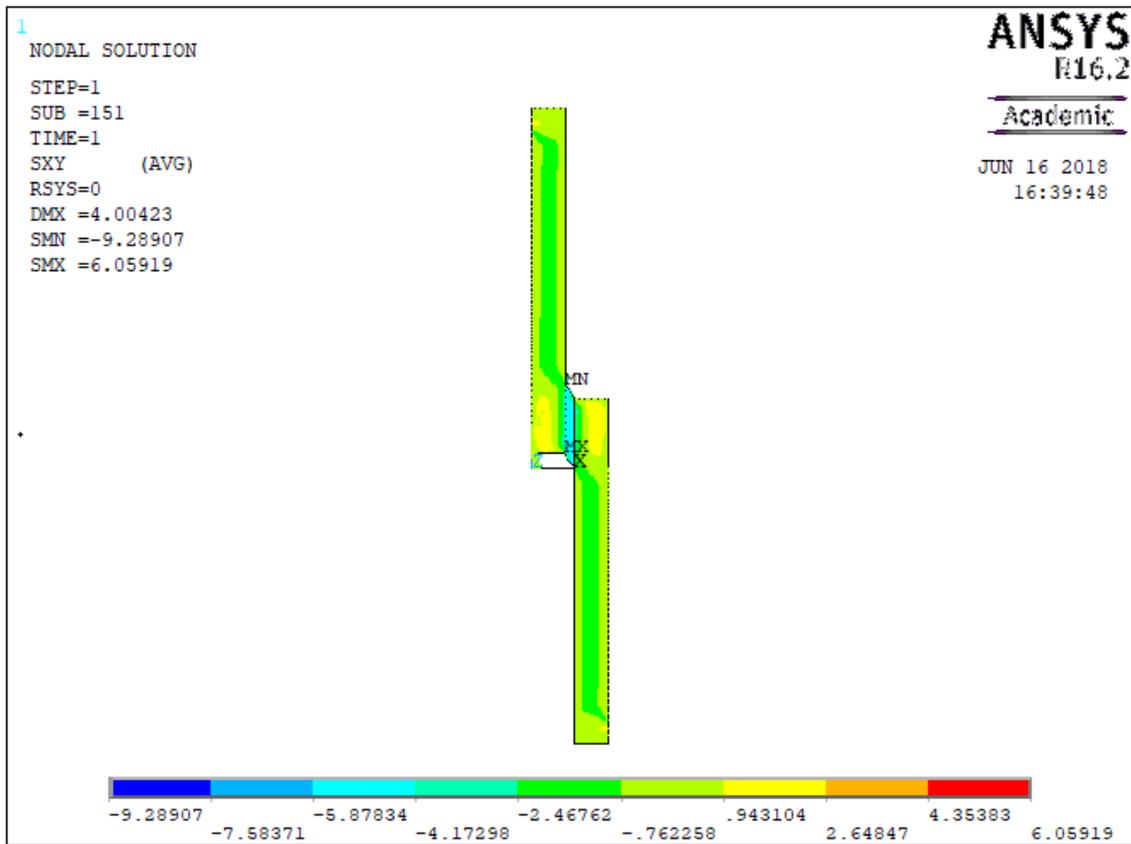


Figura 70- Tensões de corte simulação 3 modelo de Ogden.

# Anexo E: Tensões de corte simulação 4 modelo de Ogden

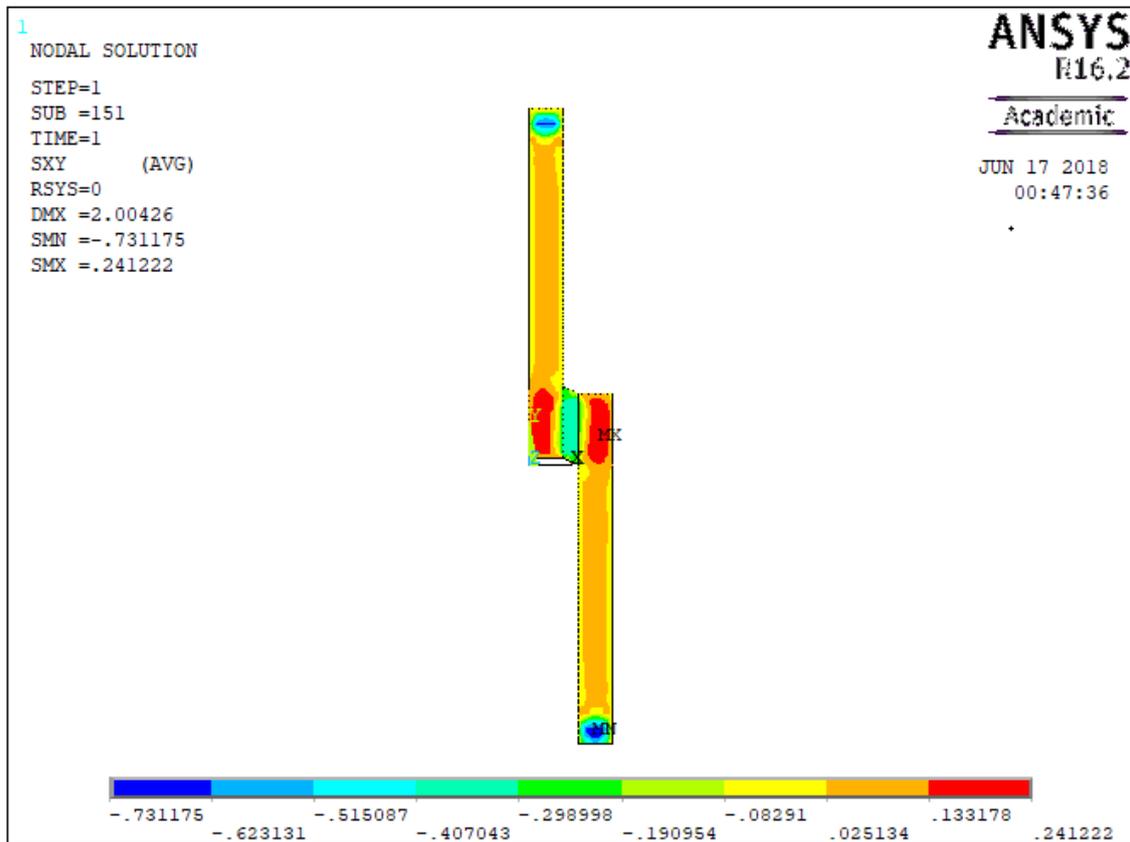


Figura 71- Tensões de corte simulação 4 modelo de Ogden.

# Anexo F: Tensões de corte simulação 5 modelo de Ogden

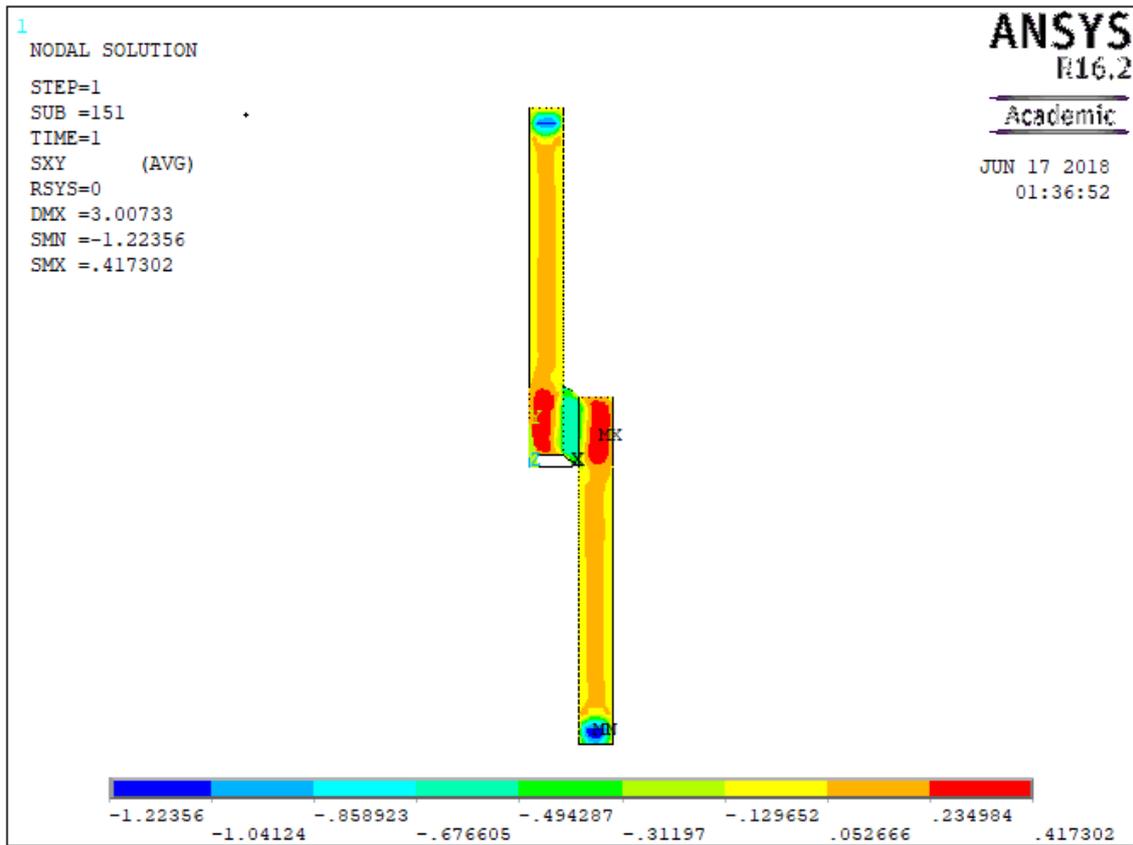


Figura 72- Tensões de corte simulação 5 modelo de Ogden

# Anexo G: Tensões de corte simulação 6 modelo de Ogden

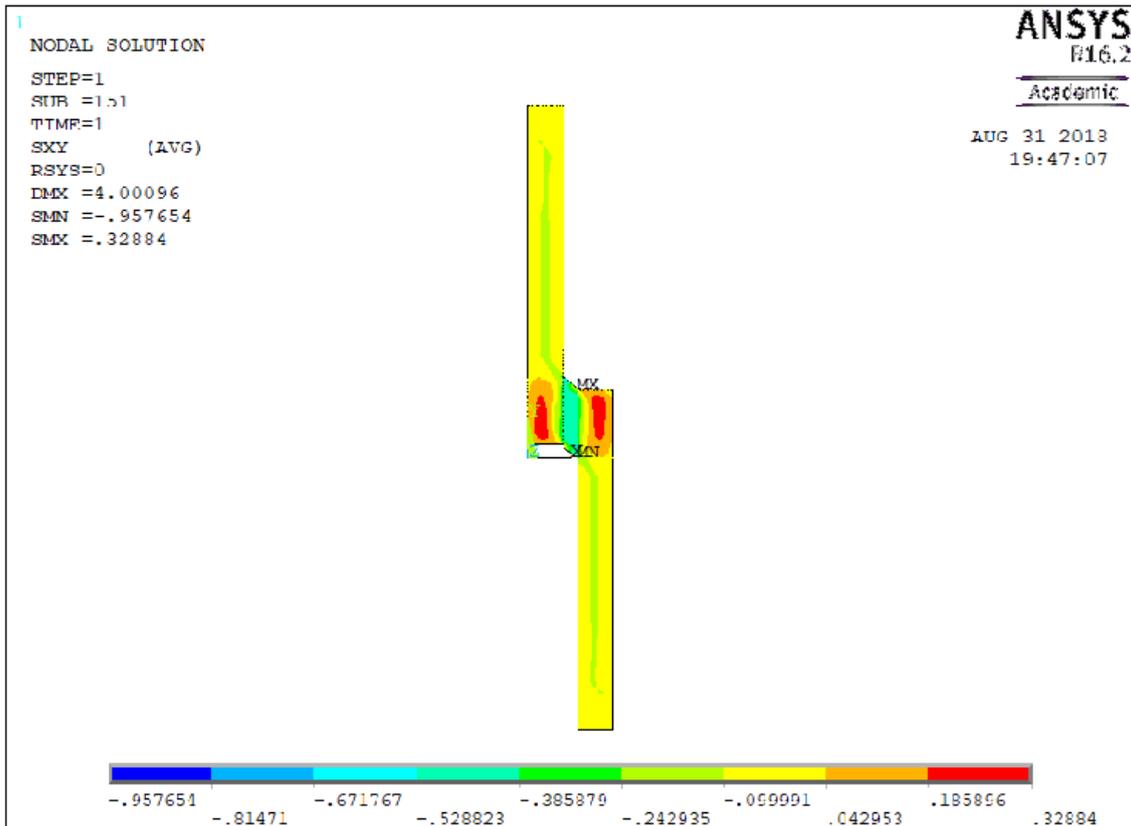


Figura 73- Tensões de corte simulação 6 modelo de Ogden

# Anexo H: Tensões de corte simulação 7 modelo de Ogden

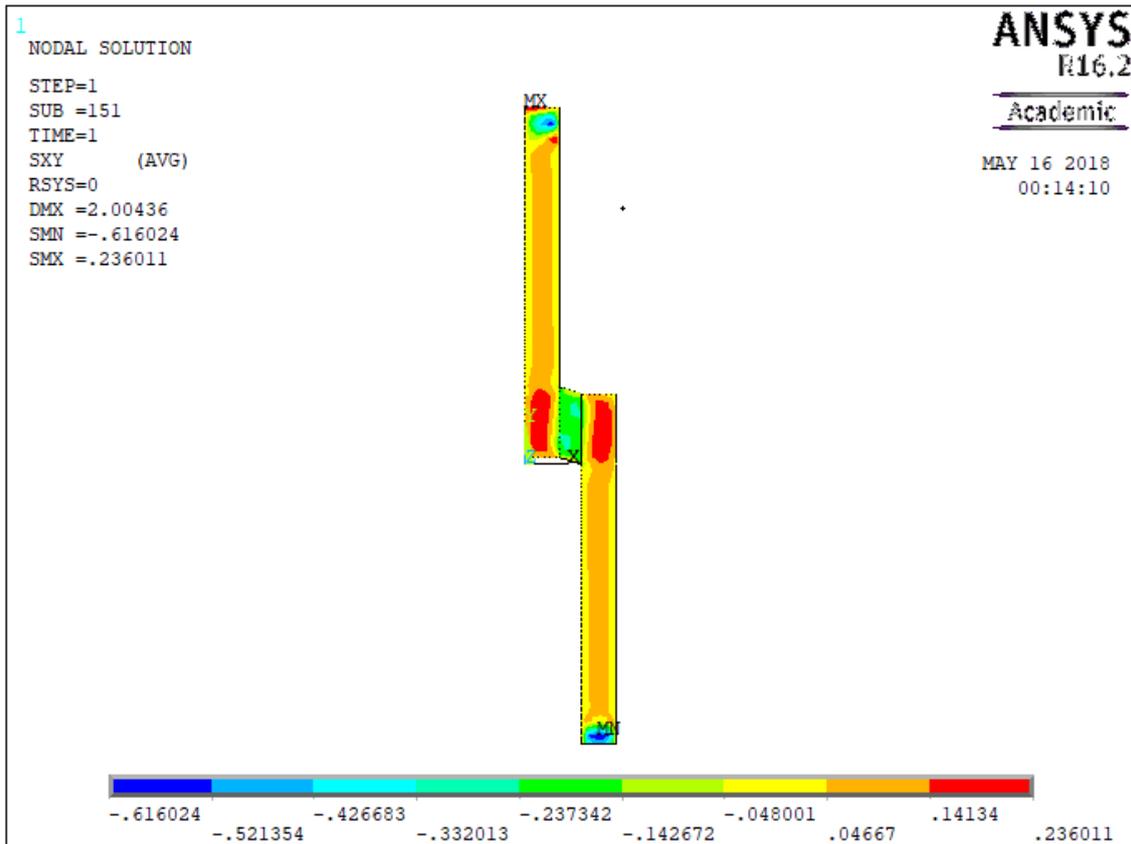


Figura 74- Tensões de corte simulação 7 modelo de Ogden.

# Anexo I: Tensões de corte simulação 8 modelo de Ogden

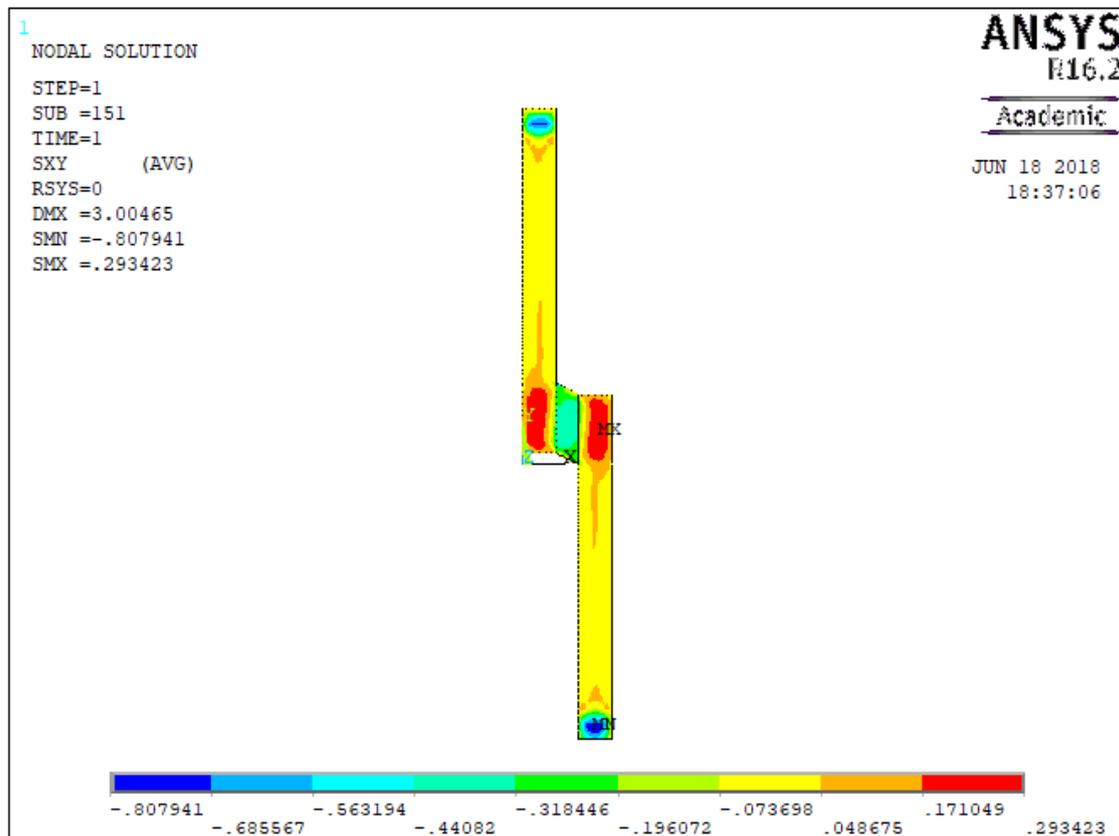


Figura 75- Tensões de corte simulação 8 modelo de Ogden.

# Anexo J: Tensões de corte simulação 9 modelo de Ogden

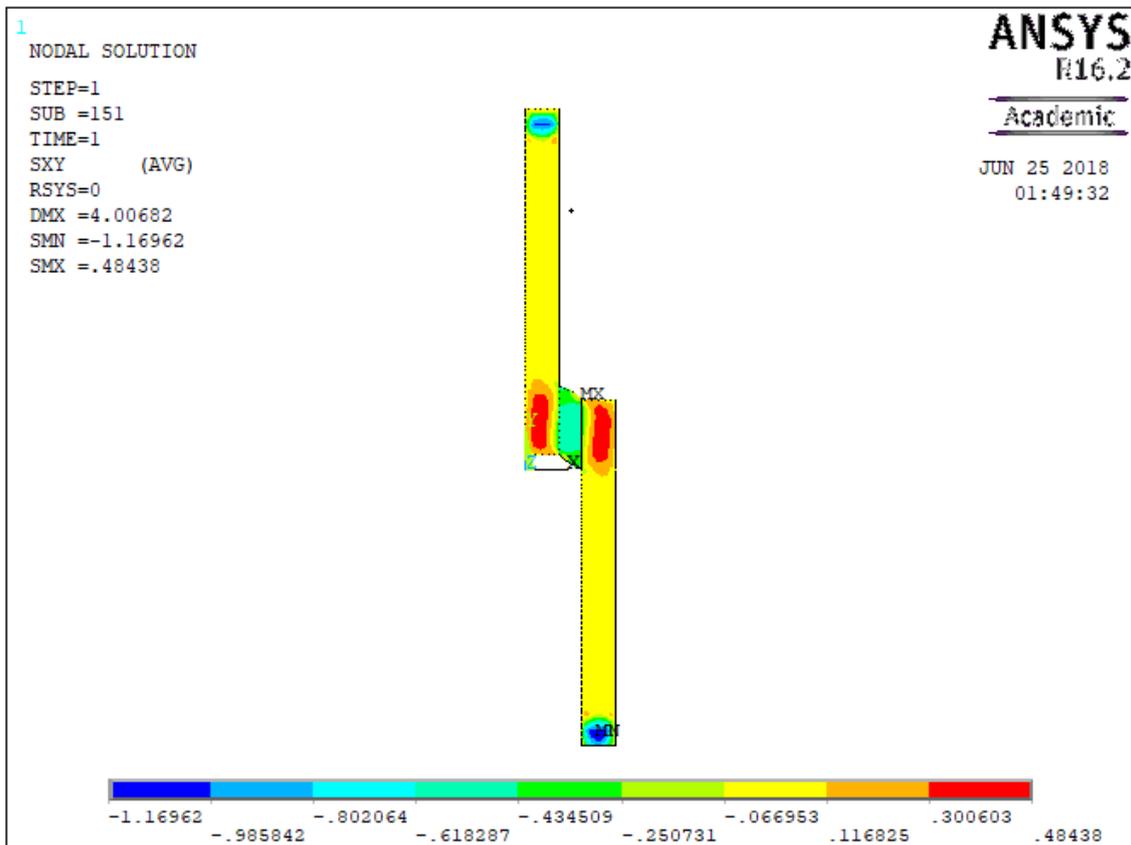


Figura 76- Tensões de corte simulação 9 modelo de Ogden.

## Anexo K: Influência da espessura para o mesmo deslocamento aplicado (3mm) modelo de Ogden

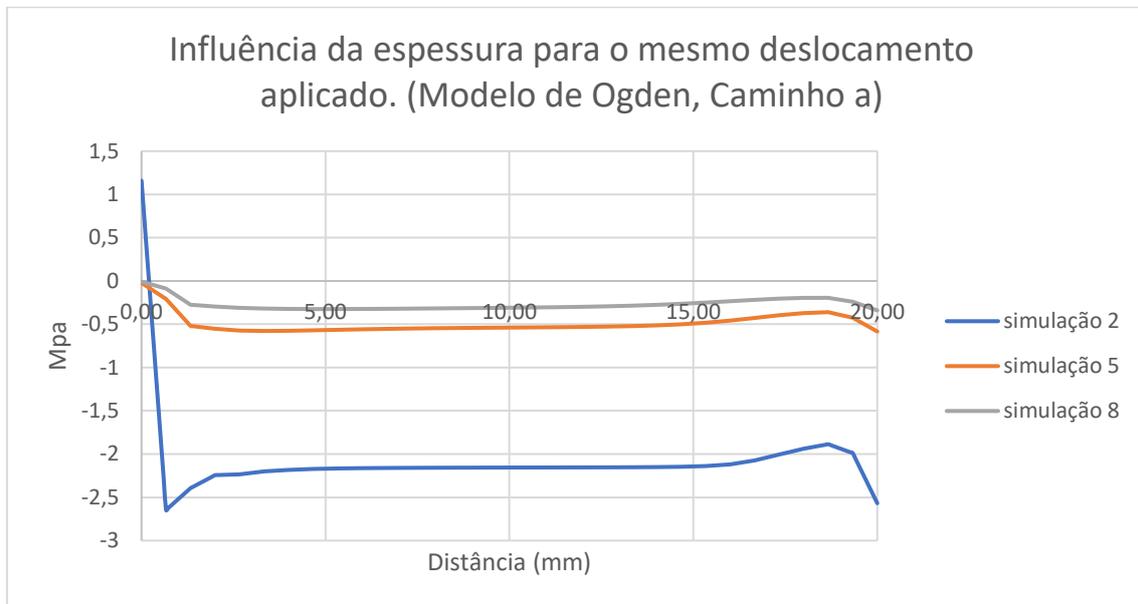


Figura 77- Influência da espessura para o mesmo deslocamento aplicado (modelo de Ogden e caminho a).

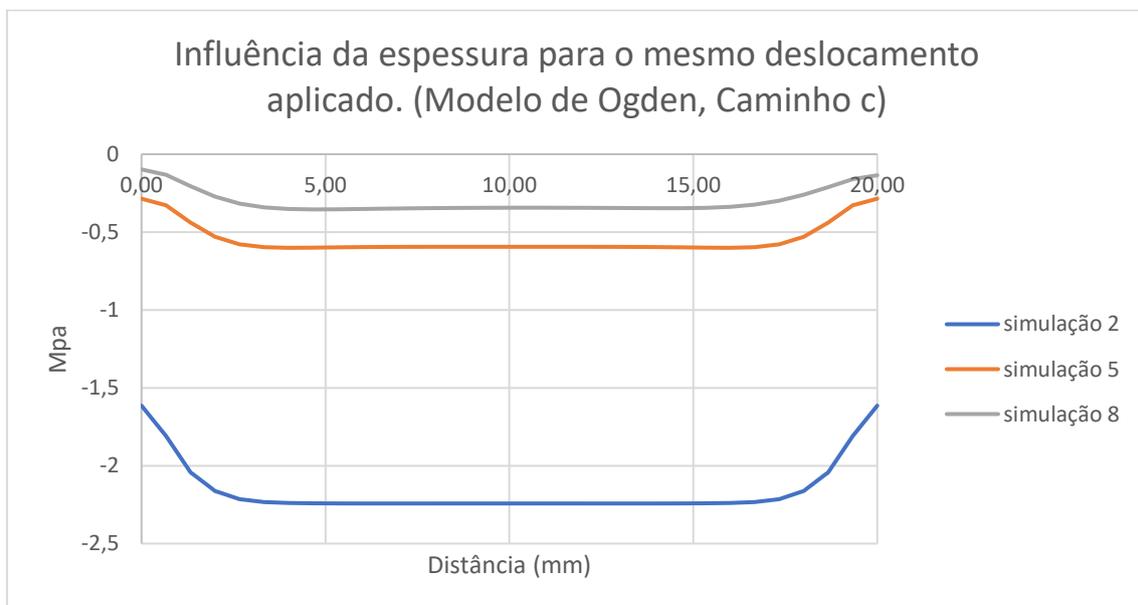


Figura 78- Influência da espessura para o mesmo deslocamento aplicado (modelo de Ogden, caminho c).

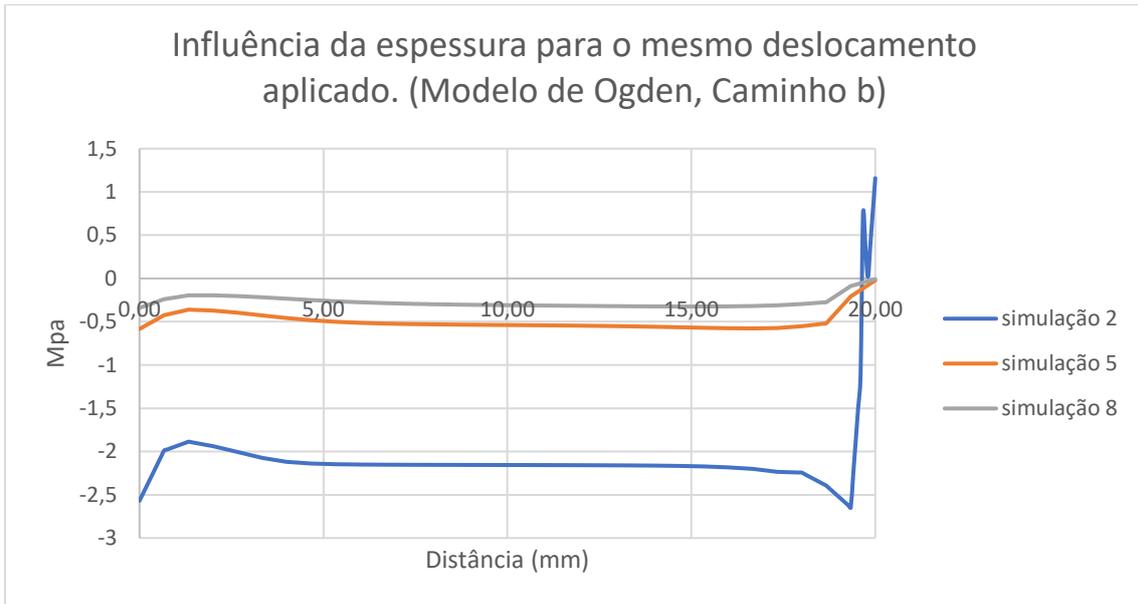


Figura 79- Influência da espessura para o mesmo deslocamento aplicado (modelo de Ogden, caminho b).