



## Comparação de técnicas analíticas e numéricas para previsão de resistência de juntas adesivas de sobreposição simples

CARLA CRISTINA RAMOS GUIMARÃES DE SOUSA

Janeiro de 2016

Comparação de técnicas analíticas e numéricas para  
previsão de resistência de juntas adesivas de  
sobreposição simples

Carla Cristina Ramos Guimarães de Sousa

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



29 de dezembro de 2015



Relatório da Unidade Curricular de Dissertação do 2º ano do Mestrado em Engenharia  
Mecânica

Candidato: Carla Cristina Ramos Guimarães de Sousa, N° 1000680, 1000680@isep.ipp.pt  
Orientação Científica: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, RDS@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



29 de dezembro de 2015



*Dedico este trabalho aos meus pais, João e Alda.*

*Ao meu namorado Pedro e ao Nico.*



## *Agradecimentos*

Um especial agradecimento ao meu orientador, Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho por todo o tempo disponibilizado, empenho e apoio prestado no contributo deste trabalho. Ao Professor Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto pelo auxílio na realização do trabalho experimental mostrando-se sempre disponível durante a sua execução, orientando-me em todas as fases do processo.

À minha família, pais, irmã e sobrinho, por todas as horas e momentos de ausência. Por todo o apoio demonstrado, pelo carinho e motivação sempre que era necessário.

Um agradecimento enorme ao meu namorado, por todo o apoio, ajuda, motivação e incentivo nas horas mais difíceis e complicadas. Por toda a paciência e força inspiradora que me permitiu ultrapassar os obstáculos e continuar este trabalho até à sua conclusão.

Aos amigos que me apoiaram e a todos os que directa ou indirectamente contribuíram para o desenvolvimento do meu trabalho.



## *Resumo*

As juntas adesivas têm vindo a ser usadas em diversas áreas e contam com inúmeras aplicações práticas. Devido ao fácil e rápido fabrico, as juntas de sobreposição simples (JSS) são um tipo de configuração bastante comum. O aumento da resistência, a redução de peso e a resistência à corrosão são algumas das vantagens que este tipo de junta oferece relativamente aos processos de ligação tradicionais. Contudo, a concentração de tensões nas extremidades do comprimento da ligação é uma das principais desvantagens. Existem poucas técnicas de dimensionamento precisas para a diversidade de ligações que podem ser encontradas em situações reais, o que constitui um obstáculo à utilização de juntas adesivas em aplicações estruturais.

O presente trabalho visa comparar diferentes métodos analíticos e numéricos na previsão da resistência de JSS com diferentes comprimentos de sobreposição ( $L_0$ ). O objectivo fundamental é avaliar qual o melhor método para prever a resistência das JSS. Foram produzidas juntas adesivas entre substratos de alumínio utilizando um adesivo epóxico frágil (Araldite® AV138), um adesivo epóxico moderadamente dúctil (Araldite® 2015), e um adesivo poliuretano dúctil (SikaForce® 7888). Consideraram-se diferentes métodos analíticos e dois métodos numéricos: os Modelos de Dano Coesivo (MDC) e o Método de Elementos Finitos Extendido (MEFE), permitindo a análise comparativa.

O estudo possibilitou uma percepção crítica das capacidades de cada método consoante as características do adesivo utilizado. Os métodos analíticos funcionam apenas relativamente bem em condições muito específicas. A análise por MDC com lei triangular revelou ser um método bastante preciso, com excepção de adesivos que sejam bastante dúcteis. Por outro lado, a análise por MEFE demonstrou ser uma técnica pouco adequada, especialmente para o crescimento de dano em modo misto.

### *Palavras-Chave*

Adesivos, Juntas de sobreposição simples, Métodos analíticos, Métodos numéricos, Elementos Finitos, Modelos de Dano Coesivo, Método de Elementos Finitos Extendido.



## *Abstract*

Adhesive joints have been used in several fields of engineering and their applications are vast. Due to their easy and quick fabrication process, single lap joints (SLJ) are a common configuration. The increase of strength, weight reduction and resistance to corrosion are some of the advantages of this kind of joint over traditional joining methods. However, stress concentrations at the overlap edges are one of the main disadvantages. There are very few accurate design techniques for the diversity of bonded joints that can be found in real applications, which constitutes an obstacle to the use of this bonding method in structural applications.

This work aims at comparing different analytical and numerical methods in the strength prediction of SLJ with different overlap lengths ( $L_o$ ). The main objective is to evaluate which predictive method is the best. Adhesive joints were produced between aluminum adherends using a brittle epoxy adhesive (Araldite<sup>®</sup> AV138), a moderately ductile epoxy adhesive (Araldite<sup>®</sup> 2015) and a ductile polyurethane adhesive (SikaForce<sup>®</sup> 7888). Different analytical methods were considered, together with two numerical techniques: Cohesive Zone Model (CZM) and the Extended Finite Element Method (XFEM), allowing the comparative analysis.

This study allowed a critical perception of the accuracy of each method depending on the characteristics of each adhesive. The analytical methods showed that they only give relatively accurate results in very specific conditions. The CZM analysis with the triangular law revealed to be a very accurate method, with the exception of joints with very ductile adhesives. On the other hand, the XFEM analysis was not adequate, especially for crack growth in mixed mode.

### ***Keywords***

Adhesives, Single lap joint, Analytical methods, Numerical methods, Finite Elements, Cohesive Zone Models, Extended Finite Element Method.



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>VII</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>IX</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XXIII</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>XXV</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2 OBJECTIVOS.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....	3
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
2.1 LIGAÇÃO DE COMPONENTES POR JUNTAS ADESIVAS .....	5
2.1.1 <i>Caracterização das juntas adesivas</i> .....	7
2.1.2 <i>Aplicações comuns das juntas adesivas</i> .....	10
2.1.3 <i>Esforços típicos em juntas adesivas</i> .....	14
2.1.3.1 Tracção / Compressão .....	15
2.1.3.2 Corte.....	16
2.1.3.3 Clivagem .....	16
2.1.3.4 Arrancamento.....	17
2.1.4 <i>Tipos de rotura</i> .....	18
2.1.5 <i>Configurações possíveis de junta</i> .....	18
2.1.6 <i>Parâmetros que afectam o desempenho das juntas</i> .....	21
2.1.6.1 Características mecânicas dos aderentes e dos adesivos.....	22
2.1.6.1.1 Propriedades do adesivo .....	22
2.1.6.1.2 Propriedades do substrato.....	23
2.1.6.2 Geometria da junta .....	24
2.1.6.2.1 Espessura do adesivo.....	24
2.1.6.2.2 Filete de adesivo.....	25
2.1.6.2.3 Espessura do substrato.....	25
2.1.6.2.4 Comprimento de sobreposição .....	26
2.1.6.2.5 Geometria dos substratos.....	27
2.1.6.3 Tratamento superficial.....	28
2.1.6.3.1 Rugosidade da superfície.....	29

2.1.6.3.2	Desengorduramento das superfícies .....	29
2.1.6.3.3	Remoção de óxidos.....	30
2.1.6.4	Condições ambientais.....	30
2.2	ADESIVOS.....	31
2.2.1	<i>Caracterização dos adesivos</i> .....	31
2.2.1.1	Composição química .....	33
2.2.1.2	Forma física.....	35
2.2.1.3	Modo de aplicação ou reacção.....	36
2.2.2	<i>Tipos de adesivos estruturais</i> .....	36
2.2.2.1	Epóxidos.....	36
2.2.2.2	Fenólicos .....	37
2.2.2.3	Poliuretanos.....	37
2.2.2.4	Acrílicos .....	38
2.3	PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DAS JUNTAS.....	39
2.3.1	<i>Mecânica dos meios contínuos</i> .....	39
2.3.1.1	Análise Elástica Linear Simples .....	41
2.3.1.2	Modelo de Volkersen .....	42
2.3.1.3	Modelo de Goland & Reissner .....	43
2.3.1.4	Modelo de Hart-Smith.....	45
2.3.1.5	Tensão de Cedência Generalizada.....	47
2.3.1.6	Outras análises considerando o comportamento linear elástico .....	47
2.3.2	<i>Mecânica da fractura</i> .....	48
2.3.3	<i>Modelos de dano coesivo</i> .....	51
2.3.3.1	Modelo de dano triangular.....	52
2.3.4	<i>Mecânica do dano</i> .....	54
2.3.5	<i>Método dos Elementos Finitos Extendido</i> .....	55
<b>3</b>	<b>TRABALHO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>59</b>
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS .....	59
3.1.1	<i>Substratos</i> .....	59
3.1.2	<i>Adesivos</i> .....	60
3.1.2.1	Araldite® AV138.....	60
3.1.2.2	Araldite® 2015.....	62
3.1.2.3	SikaForce® 7888.....	63
3.2	GEOMETRIA DOS PROVETES.....	65
3.3	FABRICO DAS JUNTAS ADESIVAS .....	66
3.3.1	<i>Preparação das superfícies</i> .....	67
3.3.2	<i>Colagem dos substratos</i> .....	70
3.3.3	<i>Preparação dos provetes para ensaio</i> .....	72
3.4	ENSAIOS REALIZADOS .....	73
3.4.1	<i>Caracterização do equipamento</i> .....	73
3.4.2	<i>Metodologia do ensaio de tracção</i> .....	73

## ÍNDICE

---

3.5	RESULTADOS .....	74
3.5.1	<i>Modos de rotura</i> .....	74
3.5.2	<i>Curvas <math>P</math>-<math>\delta</math></i> .....	78
3.5.3	<i>Resistência das juntas</i> .....	85
<b>4</b>	<b>PREVISÃO DA RESISTÊNCIA .....</b>	<b>87</b>
4.1	MECÂNICA DOS MEIOS CONTÍNUOS.....	87
4.1.1	<i>Modelo analítico de Volkersen</i> .....	87
4.1.2	<i>Modelo analítico de Goland e Reissner</i> .....	91
4.1.3	<i>Modelo analítico de Hart-Smith</i> .....	97
4.1.4	<i>Tensão de cedência generalizada</i> .....	104
4.1.5	<i>Comparação entre os vários métodos analíticos</i> .....	105
4.2	MODELOS DE DANO COESIVO.....	107
4.2.1	<i>Condições da análise numérica</i> .....	107
4.2.2	<i>Determinação das propriedades coesivas</i> .....	112
4.2.3	<i>Previsão da resistência</i> .....	114
4.3	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO .....	118
4.3.1	<i>Condições da análise numérica</i> .....	118
4.3.2	<i>Critérios utilizados para a previsão do início do dano</i> .....	119
4.3.3	<i>Determinação das propriedades de dano</i> .....	120
4.3.4	<i>Previsão da resistência</i> .....	121
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>125</b>
	<b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS .....</b>	<b>129</b>



## *Índice de Figuras*

Figura 1 – Geometria de uma JSS [12]. .....	7
Figura 2 - Distribuição de tensões entre juntas adesivas e juntas rebitadas [2].....	9
Figura 3 – Aplicações de adesivos em automóveis [15]. .....	10
Figura 4 – Exemplos de ligações adesivas num avião [17].....	11
Figura 5 – Comparação de uma ligação unida com adesivos com uma ligação rebitada [17]. .....	11
Figura 6 – Aplicação clínica de sistemas adesivos [19]. .....	12
Figura 7 – Principais partes constituintes de um sapato [21]. .....	12
Figura 8 – Aplicação de madeira laminada na construção civil [23]. .....	13
Figura 9 – PCI com componentes tradicionais [28]. .....	14
Figura 10 - Tipos de carregamento em juntas adesivas [29]. .....	14
Figura 11 – Distribuição da tensão numa junta topo a topo sob carregamento axial (esquerda) e sob carregamento não axial (direita) [2]. .....	15
Figura 12 – Distribuição da tensão de corte numa JSS [11].....	16
Figura 13 – Distribuição das tensões de clivagem e de arrancamento [11]. .....	17
Figura 14 – Adesivos flexíveis e tenazes permitem tensões mais distribuídas [2].....	17
Figura 15 - Modos de rotura em juntas adesivas [2]. .....	18
Figura 16 – Configurações mais comuns de juntas adesivas [2]. .....	19
Figura 17 – Juntas topo a topo com geometrias alternativas [2]. .....	20
Figura 18 – Geometria da junta tubular: a) sem chanfro, b) com chanfro [2]. .....	21
Figura 19 – Junta de ressalto ( <i>joggle lap joint</i> ) [11]. .....	21
Figura 20 - Principais factores que afectam a resistência de juntas adesivas [33]. .....	22
Figura 21 – Zonas de máxima concentração de tensões e de deformação plástica dos aderentes [2]. .....	23
Figura 22 – Distribuição das tensões de corte no adesivo para diferentes valores de $t_A$ [2]. .....	25
Figura 23 – Filete de adesivo numa JSS [2]. .....	25
Figura 24 – Distorção dos aderentes devido à carga aplicada [33]. .....	26
Figura 25 – Variação da resistência de uma JSS com $L_0$ [33]. .....	26

Figura 26 – Resistência de uma JSS em função de $L_0$ [2].	27
Figura 27 – Variação da força de rotura com $L_0$ em adesivos dúcteis e frágeis [10].	27
Figura 28 – Distribuição das tensões $\tau_{xy}$ em juntas com e sem chanfro exterior [2].	28
Figura 29 – Proposta de melhoria da eficiência de uma JSS segundo Hart-Smith [2].	28
Figura 30 – Variação da tensão de rotura ao corte da junta com a rugosidade superficial [33].	29
Figura 31 – Comparação das curvas tensão – deformação típicas entre um adesivo frágil e um dúctil [42].	33
Figura 32 - Efeito de Poisson tridimensional (efeito anti-clástico) numa JSS [50].	41
Figura 33 – Análise linear elástica da tensão $\tau_{xy}$ numa JSS [2].	42
Figura 34 – Deformações longitudinal numa JSS com aderentes elásticos [53].	42
Figura 35 – Análise de uma JSS pelo método de Volkersen [53].	42
Figura 36 – Excentricidade do carregamento numa JSS [42].	43
Figura 37 – Tensão $\sigma_y$ devido à excentricidade do carregamento numa JSS [42].	43
Figura 38 – Deformação da junta proposta por Goland e Reissner e diagrama de forças na zona de ligação [50].	43
Figura 39 – Representação geométrica de $k$ proposto por Goland e Reissner [2].	44
Figura 40 – Tensões $\sigma_y$ numa JSS [2].	44
Figura 41 – Representação elasto-plástica do adesivo [2].	45
Figura 42 – Explicação esquemática de $\tau_{xy}$ , segundo Hart-Smith [2].	46
Figura 43 – Modelo elasto-plástico de Hart-Smith [57].	46
Figura 44 – Método de previsão da resistência de juntas sugerido por Adams, baseado na cedência do adesivo e do substrato [2].	47
Figura 45 – Modos de propagação de uma fenda [67].	49
Figura 46 - Elementos coesivos para a) simular caminhos de rotura com espessura nula: aproximação local e b) a modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua [79].	52
Figura 47 – MDC triangular [44].	53
Figura 48 – Propagação do dano no MEF usando o conceito de nós fantasmas antes (a) e depois (b) da repartição de elementos fracturados em subelementos [104].	57
Figura 49 – Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ da liga de alumínio AW6082 T651 e respectiva aproximação numérica [106].	60
Figura 50 - Adesivo Araldite® AV138.	61

Figura 51 – Curvas $\sigma$ - $\varepsilon$ do adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138 [108].	61
Figura 52 – Adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015.	62
Figura 53 - Curvas $\sigma$ - $\varepsilon$ do adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015 [107].	63
Figura 54 – Adesivo SikaForce <sup>®</sup> 7888.	64
Figura 55 – Curva $\sigma$ - $\varepsilon$ do adesivo SikaForce <sup>®</sup> 7888 [44].	64
Figura 56 – Configuração e dimensões das JSS.	65
Figura 57 – Guilhotina utilizada para o corte das tiras de alumínio para o comprimento desejado dos substratos.	66
Figura 58 – Granalhadora Cidblast RT6S do LEM (ISEP).	67
Figura 59 – Processo de granalhagem dos substratos.	68
Figura 60 – Substratos após limpeza da superfície com acetona.	68
Figura 61 – Fita-cola com fios de pesca colada nos substratos de um provete.	69
Figura 62 – Tiras de Teflon <sup>®</sup> entre substratos e barra de apoio.	70
Figura 63 – Pistola de accionamento manual para aplicação do Araldite <sup>®</sup> 2015.	70
Figura 64 – Pistola de ar comprimido para aplicação do SikaForce <sup>®</sup> 7888.	70
Figura 65 – Aspecto de um provete após posicionamento dos aderentes e fixação com grampos.	71
Figura 66 – Aspecto dos provetes após a cura.	71
Figura 67 – Aspecto de um provete após remoção do excesso de adesivo.	72
Figura 68 – Localização dos calços nos provetes.	72
Figura 69 – Máquina universal Shimadzu AG-X.	73
Figura 70 – Posicionamento de um provete na máquina de tracção.	74
Figura 71 – Superfícies de rotura do adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138 para os diferentes valores de $L_0$ .	75
Figura 72 – Vista lateral dos aderentes de uma junta colada com Araldite <sup>®</sup> AV138 para $L_0=50$ mm.	75
Figura 73 – Superfícies de rotura do adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015 para os diferentes valores de $L_0$ .	76
Figura 74 – Vista lateral dos aderentes de uma junta colada com o adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015: $L_0=25$ mm (a), 37,5 mm (b) e 50 mm (c).	76
Figura 75 – Superfícies de rotura do adesivo SikaForce <sup>®</sup> 7888 para os diferentes valores de $L_0$ .	77

Figura 76 - Vista lateral dos aderentes de juntas coladas com o SikaForce® 7888: $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c) e $L_0=50$ mm (d). .....	77
Figura 77 - Curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® AV138: 12,5 mm (a), 25 mm (b), 37,5 mm (c) e 50 mm (d).....	79
Figura 78 – Curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® 2015: $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c) e $L_0=50$ mm. ....	81
Figura 79 - Curvas $P-\delta$ do adesivo SikaForce® 7888: $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c) e $L_0=50$ mm. ....	83
Figura 80 – Variação de $P_{max}$ com $L_0$ para as juntas coladas com os três adesivos.....	85
Figura 81 – Sistema de eixos utilizado no modelo de Volkersen. ....	88
Figura 82 - Distribuição de tensões $\tau_{xy}$ pelo método de Volkersen para: $L_0=12,5$ mm (a) e $L_0=37,5$ mm (b). ....	89
Figura 83 – Comparação entre as previsões de $P_{m\acute{a}x}$ pelo método de Volkersen e os valores experimentais, para o adesivo: Araldite® AV138 (a), Araldite® 2015 (b) e SikaForce® 7888 (c). ....	90
Figura 84 - Distribuição de tensões $\tau_{xy}$ pelo método de Goland e Reissner para: $L_0=12,5$ mm (a) e $L_0=37,5$ mm (b). ....	93
Figura 85 - Comparação entre as previsões de $P_{m\acute{a}x}$ pelo método de Goland e Reissner e os valores experimentais, para o adesivo: Araldite® AV138 (a), Araldite® 2015 (b) e SikaForce® 7888 (c).....	93
Figura 86 – Distribuição de tensões $\sigma_y$ pelo método de Goland e Reissner para: $L_0=12,5$ mm (a) e $L_0=37,5$ mm (b). ....	95
Figura 87 – Comparação entre as previsões de $P_{m\acute{a}x}$ através do critério da tensão $\sigma_y$ máxima pelo método de Goland e Reissner e os valores experimentais, para o adesivo: Araldite® AV138 (a), Araldite® 2015 (b) e SikaForce® 7888 (c). ....	96
Figura 88 - Distribuição de tensões $\tau_{xy}$ pelo método Elástico de Hart-Smith para: $L_0=12,5$ mm (a) e $L_0=37,5$ mm (b).....	99
Figura 89 - Comparação entre as previsões de $P_{m\acute{a}x}$ pelo método Elástico de Hart-Smith e os valores experimentais, para o adesivo: Araldite® AV138 (a), Araldite® 2015 (b) e SikaForce® 7888 (c).....	99
Figura 90 - Distribuição de tensões $\sigma_y$ pelo método elástico de Hart-Smith para: $L_0=12,5$ mm (a) e $L_0=37,5$ mm (b).....	101

Figura 91 - Comparação entre as previsões de $P_{m\acute{a}x}$ através do critério da tensão $\sigma_y$ máxima pelo método elástico de Hart-Smith e os valores experimentais, para o adesivo: Araldite <sup>®</sup> AV138 (a), Araldite <sup>®</sup> 2015 (b) e SikaForce <sup>®</sup> 7888 (c). .....	102
Figura 92 – Processo de plastificação no modelo de Hart-Smith Elasto-Plástico [13] .....	103
Figura 93 – Comparação de $P_{m\acute{a}x}$ entre o método da cedência generalizada e os valores experimentais, para o adesivo: Araldite <sup>®</sup> AV138 (a), Araldite <sup>®</sup> 2015 (b) e SikaForce <sup>®</sup> 7888 (c). .....	105
Figura 94 – Comparação entre os dados obtidos experimentalmente com os métodos analíticos para o Araldite <sup>®</sup> AV138.....	106
Figura 95 – Comparação entre os dados obtidos experimentalmente com os métodos analíticos para o Araldite <sup>®</sup> 2015. ....	106
Figura 96 – Comparação entre os dados obtidos experimentalmente com os métodos analíticos para o SikaForce <sup>®</sup> 7888. ....	106
Figura 97 – Atribuição das secções dos substratos e adesivo para análise por MDC no ABAQUS <sup>®</sup> . .....	108
Figura 98 – JSS modelada no ABAQUS <sup>®</sup> .....	108
Figura 99 - Desenho 2D de uma junta com $L_o=12,5$ mm no ABAQUS <sup>®</sup> .....	108
Figura 100 - Diferentes partições na simulação das juntas no ABAQUS <sup>®</sup> .....	109
Figura 101 – Definição de incrementos para análise no ABAQUS <sup>®</sup> .....	110
Figura 102 – Representação das condições fronteira na simulação. ....	110
Figura 103 – Detalhe da malha do MEF na zona de sobreposição para uma junta com $L_o=12,5$ mm. ....	111
Figura 104 – Deformação de uma JSS após simulação.....	112
Figura 105 –Rotura numa JSS obtida por MDC, para os adesivos: (a) Araldite <sup>®</sup> AV138 e (b) SikaForce <sup>®</sup> 7888, com $L_o=50$ mm. ....	115
Figura 106 – Curvas $P - \delta$ obtidas experimentalmente e numericamente pelo MDC: (a) adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138 ( $L_o=25$ mm), (b) adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015 ( $L_o=37,5$ mm) e (c) adesivo SikaForce <sup>®</sup> 7888 ( $L_o=50$ mm). ....	116
Figura 107 – Comparação entre os valores experimentais e numéricos de $P_{m\acute{a}x}$ em função de $L_o$ e do adesivo.....	116
Figura 108 – Comparação entre os valores experimentais e numéricos de $P_{m\acute{a}x}$ em função de $L_o$ e do adesivo.....	117

Figura 109 – Atribuição das secções dos substratos e adesivo no ABAQUS® na análise por MEFE.....	118
Figura 110 – Escolha da direcção de propagação do dano pelo MEFE para o critério MAXE. .....	121
Figura 111 – Início do dano numa JSS na direcção longitudinal da camada adesiva.....	122
Figura 112 –Variação de $P_{\text{máx}}$ em função de $L_0$ para o critério MAXS. ....	122
Figura 113 – Comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os resultados obtidos pelo MEFE, com o critério MAXE, para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. ....	123

## *Índice de Tabelas*

Tabela 1 – Classificação dos adesivos segundo a função [11].	32
Tabela 2 – Materiais poliméricos e suas propriedades [11].	34
Tabela 3 – Propriedades da liga de alumínio AW6082 T651 [105].	60
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do Araldite® AV138 [109].	62
Tabela 5 – Propriedades mecânicas do Araldite® 2015 [107].	63
Tabela 6 - Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7888 [44].	65
Tabela 7 – Dimensões dos provetes.	66
Tabela 8 – Valores obtidos dos ensaios relativos ao Araldite® AV138.	80
Tabela 9 – Valores obtidos dos ensaios relativos ao Araldite® 2015.	82
Tabela 10 – Valores obtidos dos ensaios relativos ao SikaForce® 7888.	84
Tabela 11 – Valores utilizados nos métodos analíticos.	88
Tabela 12 – Valores de $P_{máx}$ obtidos pelo método de Volkersen.	89
Tabela 13 - Valores de $P_{máx}$ obtidos pelo método de Goland e Reissner.	92
Tabela 14 – Valores de $P_{máx}$ obtidos através do critério da tensão $\sigma_y$ máxima pelo método de Goland e Reissner.	96
Tabela 15 - Valores de $P_{máx}$ obtidos pelo método de Hart-Smith elástico.	98
Tabela 16 – Valores de $P_{máx}$ obtidos através do critério da tensão $\sigma_y$ máxima pelo método de Hart-Smith elástico.	101
Tabela 17 – Valores de $P_{máx}$ obtidos pelo método da cedência generalizada.	104
Tabela 18 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para o adesivo Araldite® AV138 [105].	113
Tabela 19 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para o adesivo Araldite® 2015 [118].	114
Tabela 20 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para o adesivo SikaForce® 7888 [44].	114
Tabela 21 – Parâmetros utilizados no MEFÉ para o adesivo Araldite® AV138.	120
Tabela 22 – Parâmetros utilizados no MEFÉ para o adesivo Araldite® 2015.	120
Tabela 23 – Parâmetros utilizados no MEFÉ para o adesivo SikaForce® 7888.	121



## *Nomenclatura*

### **Caracteres Romanos**

$b$  – Largura

$c$  – Metade do comprimento de sobreposição

$D$  – Rigidez de flexão do aderente

$E$  – Módulo de elasticidade longitudinal

$G$  – Módulo de elasticidade transversal

$G_a$  – Módulo da tensão de corte do adesivo

$G_c$  – Tenacidade

$G_{IC}$  – Tenacidade à tracção

$G_{IIC}$  – Tenacidade ao corte

$G_t$  – Taxa de libertação de energia

$k$  – Factor de momento flector

$\bar{k}$  – Factor de força transversa

$l$  – Comprimento da junta

$L_0$  – Comprimento de sobreposição

$L_S$  – Comprimento dos substratos

$L_{UP}$  – Comprimento útil dos provetes

$L_{US}$  – Comprimento útil dos substratos

$L_C$  – Comprimento dos calços

$M$  – Momento flector

$P$  – Força aplicada

$\bar{P}$  – Força por unidade de largura

$P_{\text{máx}}$  – Força máxima

$P_{\text{máx Méd}}$  – Força máxima média

$\Delta P_{\text{máx}}$  – aumento percentual

$t_A$  – Espessura do adesivo

$t_b$  – Espessura do aderente inferior

$t_m^0$  – Resistência em modo misto

$t_n$  – Componente de tensão normal

$t_n^0$  – Resistência coesiva à tracção

$t_s$  – Espessura do substrato

$t_s$  – Componente de tensão ao corte

$t_s^0$  – Resistência coesiva ao corte

$t_t$  – Espessura do aderente superior

$\omega$  – Distância característica da deformação diferencial

### **Caracteres Gregos**

$\varepsilon$  – Deformação

$\varepsilon_{\text{máx}}$  – Deformação máxima à tracção

$\nu$  – Coeficiente de Poisson

$\sigma_{\text{máx}}$  – Tensão principal máxima

$\sigma_{\text{máx}}^0$  – Resistência à tracção

$\sigma_y$  – Tensão de arrancamento

$\tau_{xy}$  – Tensão de corte

$\tau_y$  – Tensão de cedência ao corte

$\delta$  – Deslocamento

## **Abreviaturas**

2D – Bidimensional

3D – Tridimensional

a. C. – Antes de Cristo

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

JSD – Junta de sobreposição dupla

JSS – Junta de sobreposição simples

LEM – Laboratório de Ensaios Mecânicos

MDC – Modelos de dano coesivo

MEF – Método de Elementos Finitos

MEFE – Método de Elementos Finitos Extendido

MFLE – Mecânica da Fractura Linear Elástica

MFVF – Método de Fecho Virtual de Fenda

PCI – Placas de circuito impressas

PVC – Policloreto de vinilo

UV – Ultravioleta

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

O rigor na quantificação de forças e tensões envolvidas em estruturas é cada vez mais exigido, dentro de um mercado cada vez mais forte e competitivo, impondo novos produtos, de elevada qualidade e a preços reduzidos. As juntas adesivas apresentam uma distribuição de tensões mais uniforme, adaptam-se melhor na união de superfícies irregulares, possuem um bom comportamento quando são sujeitas a cargas cíclicas e são de fácil execução. Contudo, a utilização de juntas adesivas em estruturas é ainda limitada devido à falta de confiança dos projectistas no seu desempenho. Este aspecto está relacionado com a falta de modelos de previsão da resistência que permitam prever com rigor o seu comportamento mecânico para diferentes condições geométricas e materiais. Um grande número de ligações adesivas usam a junta de sobreposição na sua construção. As juntas de sobreposição simples (JSS) são as mais comuns devido à sua geometria [1].

No projecto de uma junta adesiva devem ser considerados alguns factores, como o tipo de substrato, o custo de fabricação e respectiva montagem, o tipo de carregamento a que esta vai estar solicitada, a sua intensidade e também a facilidade de inspecção da junta [2]. No projecto de ligações estruturais o projectista deve ter em consideração formas e meios necessários, por forma a encontrar técnicas e materiais que visem a melhor solução, englobando a previsão de forças e tensões que possam ocorrer. De facto, para a utilização destas juntas torna-se necessária uma análise detalhada das estruturas, passando pela escolha da geometria de junta mais adequada, para o tipo de ligações em causa.

Uma extensa revisão bibliográfica sobre os modelos analíticos existentes mostrou que a grande maioria dos modelos para juntas adesivas são a duas dimensões. Em geral, esta análise é suficiente porque as tensões na direcção da largura ( $b$ ) são significativamente menores do que as tensões na direcção do carregamento. Os adesivos e substratos são considerados linear-elásticos na maioria das análises, porque a consideração de não-linearidades materiais tornaria a solução demasiado complexa. Os primeiros estudos realizados relativamente a uma junta adesiva datam de 1938 por Volkersen [3]. No entanto, devido à falta de modelos de materiais bem como critérios de rotura adequados, actualmente as juntas ainda são sobredimensionadas. À medida que o grau de complexidade e o número de componentes de tensão no adesivo e no aderente aumenta, o problema inicial deixa de ter uma solução analítica, pelo que tem de ser resolvido numericamente, por exemplo com recurso ao Método de Elementos Finitos (MEF). Surge desta forma o interesse em estudar os vários métodos apresentados na previsão da resistência das juntas adesivas, aplicados a um caso real.

## 1.2 Objectivos

Na presente dissertação apresenta-se um estudo experimental e numérico de JSS com substratos de alumínio e diferentes tipos de adesivo, considerando também diferentes valores de comprimentos de sobreposição ( $L_o$ ). O objectivo principal do trabalho é a comparação de diferentes técnicas de previsão de resistência das juntas, desde métodos analíticos até numéricos, e averiguação da capacidade e aplicabilidade de cada um deles. Pretende-se analisar técnicas analíticas simples, no que concerne aos comportamentos dos materiais das juntas, bem como Modelos de Dano Coesivo (MDC) aplicados em análises pelo MEF, e ainda o Método de Elementos Finitos Extendido (MEFE).

Os modelos analíticos considerados foram os de Volkersen, Goland e Reissner, Hart-Smith e Adams (critério da cedência generalizada). Nas técnicas numéricas, com recurso ao *software* ABAQUS® e aos elementos coesivos, foi efectuada a previsão da resistência das juntas adesivas e respectiva validação com os resultados experimentais. Este *software* baseia-se no MEF com o módulo integrado do MDC para previsão da resistência das juntas. Nas soluções numéricas foi usada a lei triangular, os aderentes foram modelados como sólidos elasto-plásticos e o adesivo modelado com elementos de MDC.

O trabalho experimental envolve o fabrico de provetes e realização de ensaios experimentais para obtenção da resistência à tracção das juntas em função da geometria e adesivo utilizado. De seguida, é efectuada uma comparação das forças de rotura previstas pelos modelos com os valores obtidas experimentalmente e determina-se qual a técnica que melhor se adequa à previsão da resistência.

### **1.3 Organização do relatório**

Este trabalho está dividido em cinco capítulos.

No primeiro capítulo é feita uma breve introdução ao problema proposto para estudo, contextualizando o tema das juntas adesivas. Faz-se uma referência à necessidade de métodos que consigam prever a resistência de juntas adesivas, recorrendo aos vários métodos estudados na literatura. São também citados os objectivos propostos onde se apresentam as etapas que se pretendem realizar. É ainda apresentada a estrutura do relatório.

No segundo capítulo é feita a revisão bibliográfica sobre o estado de arte, fazendo referência à ligação de componentes por juntas adesivas, aos adesivos e às diferentes técnicas de previsão da resistência das juntas. Caracterizam-se as juntas mais comuns, descrevem-se os esforços a que podem estar solicitadas e as configurações que podem ser utilizadas, assim como os tipos de rotura a que podem estar sujeitas.

No terceiro capítulo é apresentado o trabalho experimental, onde se faz referência aos adesivos escolhidos e aos valores de  $L_0$  adoptados. Faz-se a descrição do fabrico das juntas e explica-se qual o procedimento efectuado. É apresentada a metodologia de ensaio utilizada para a realização dos ensaios, são mostrados e discutidos os resultados obtidos.

No quarto capítulo é efectuada a previsão da resistência através de vários modelos, tanto analíticos como numéricos, e procede-se à sua comparação com os resultados experimentais. Os modelos analíticos considerados foram os de Volkersen, Goland e Reissner, Hart-Smith e Adams (critério da cedência generalizada). As técnicas numéricas consideradas foram os MDC e o MEFE. Como complemento a esta comparação é discutida a adequabilidade de cada um destes métodos para a previsão da resistência das JSS.

Por fim, no último capítulo, são apresentadas as conclusões e feitas referências a trabalhos futuros que complementem o trabalho realizado.



## 2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é efectuada uma revisão bibliográfica sobre juntas adesivas. São abordados assuntos como a ligação entre componentes e a caracterização das juntas adesivas com as respectivas vantagens e desvantagens. São também referidas as aplicações mais comuns, os esforços típicos, configurações possíveis de juntas adesivas e os parâmetros que mais afectam directamente o seu desempenho. Procede-se à caracterização dos adesivos e é feita uma exposição detalhada dos tipos de adesivos estruturais mais relevantes, desenvolvidos e melhorados ao longo dos tempos. É ainda tratado neste capítulo o tema de previsão da resistência das juntas, onde se expõem pormenorizadamente as principais técnicas de análise (analíticas ou numéricas) a considerar para juntas adesivas.

### **2.1 Ligação de componentes por juntas adesivas**

Aproximadamente há cerca de 3000 a.C. teve início a ligação de componentes pelo método da colagem [4]. Nessa época utilizavam-se adesivos naturais, nomeadamente colas animais e vegetais, na realização de colagens de materiais como o papel. A utilização de técnicas já com algum grau de sofisticação remonta ao tempo dos Egípcios, que utilizavam colas à base de ovo, caseína, gelatina e resinas extraídas de árvores [5].

No início do séc. XX surgiram novos avanços com a introdução da borracha e dos adesivos sintéticos. Durante a primeira guerra mundial recorreu-se ao uso da cola de caseína, considerado um material polimérico natural (derivado do leite) [2] e exploraram-se novas aplicações das ligações adesivas, nomeadamente na indústria aeronáutica, em construções de madeira e em estruturas em que é necessária uma boa resistência à humidade [5, 6].

Estes adesivos naturais funcionavam bem excepto quando submetidos a determinados tipos de ambientes, tais como ambientes húmidos. Aquando da absorção de água os adesivos tornavam-se fracos e emitiam odores pouco agradáveis. Por outro lado, através dos odores era detectado quando o adesivo estava deteriorado, tornando-se deste modo num método não destrutivo de controlo da qualidade da ligação [2].

O problema relativo à fraca durabilidade dos adesivos baseados em produtos naturais foi ultrapassado entre os anos 20 e 40, devido ao desenvolvimento de novos adesivos com resinas sintéticas [6, 7]. As propriedades eram melhores e de maior reprodutibilidade, o que permitia a utilização de adesivos em grande escala [8]. De Bruyne [7] e os seus colegas modificaram a química dos adesivos recorrendo à adição de polímeros com boa tenacidade, tal como a combinação de polivinilo formal com resol fenólico.

Os primeiros adesivos de vinil, fenol e epóxido apareceram nos anos 50. Os adesivos epóxidos possibilitaram a adesão entre metais, usados em estruturas primárias, tornando-se numa extraordinária mais-valia, promovendo o desenvolvimento e um forte crescimento da indústria aeronáutica [9, 10]. Devido à boa rigidez e resistência, aliadas ao baixo peso, a combinação vinilo formal/resol fenólico revelou-se uma invenção muito importante que permitiu o progresso na tecnologia dos adesivos [2].

Nos anos 60 surgem as poliimidas, *polibenzimidazole* e *polyquinoxaline*. Apenas nos anos 70 foi possível ultrapassar o problema da fraca durabilidade das juntas adesivas presentes nas aeronaves, com o aparecimento da segunda geração de acrílicos e dos poliuretanos estruturais, que permitiram definir e introduzir sistemas adesivos avançados [10].

Posteriormente, nos anos 80, surgiram as resinas termoendurecíveis modificadas, os epóxidos em dispersão aquosa, os adesivos de contacto em dispersão aquosa, os termofusíveis espumados e as resinas policromáticas para elevadas temperaturas. Nos anos 90 foram desenvolvidos os epóxidos modificados com poliuretano e os poliuretanos com cura por humidade. Os termofusíveis curáveis e os sistemas de cura por luz e ultravioletas (UV) também contribuíram para as descobertas desta época [10].

O desenvolvimento da indústria moderna dos adesivos está intimamente ligado à indústria aeroespacial, que permitiu desenvolver substancialmente as ligações adesivas, e hoje a sua aplicação noutras indústrias é cada vez mais comum e diversificada [10]. A indústria

automóvel é um bom exemplo desta generalização, dada a crescente preocupação em reduzir o peso do automóvel no sentido de reduzir os consumos e aumentar velocidades, obrigando à utilização de materiais mais leves, como o alumínio ou plástico reforçado com fibras. Sendo estes materiais difíceis de ligar pelos métodos tradicionais de ligação, os adesivos podem constituir-se como o método preferido de ligação. Outro contributo de extrema relevância ocorreu na área da medicina, onde os adesivos e os vedantes impulsionaram o incremento do conforto nos pacientes. Fechar feridas e lacerações ou reduzir cicatrizes são aspectos bastante importantes apenas possíveis através da aplicação de adesivos. É comum utilizarem-se adesivos curados por luz ou UV na restauração dentária [10, 11]. De uma maneira geral, as juntas adesivas têm vindo a ser usadas em diversas áreas (componentes electrónicos, construção civil) [9] e contam com inúmeras aplicações práticas, desde as indústrias de ponta (aeronáutica, automóvel), até às indústrias mais tradicionais (calçado, móveis), estando em franca expansão.

Com a tendência cada vez mais acentuada da substituição dos materiais metálicos em aplicações estruturais por materiais compósitos, o sucesso destes novos materiais depende também do desenvolvimento tecnológico e conhecimento do comportamento das ligações adesivas [2].

### 2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

A ligação por adesivos estruturais é uma tecnologia emergente que permite solucionar muitos problemas associados às técnicas tradicionais de ligação, como as ligações aparafusadas, rebitadas, soldadas, entre outras [2, 11]. Devido ao fácil e rápido fabrico, as JSS são muito utilizadas (Figura 1).

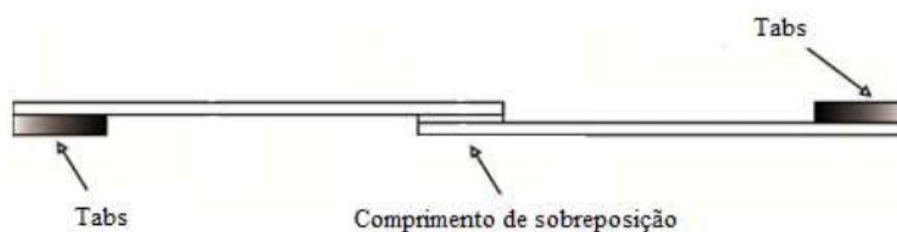


Figura 1 – Geometria de uma JSS [12].

A relação de elevada resistência e baixo peso das ligações adesivas é uma característica que se revela muito apelativa, para além de estas apresentarem baixo custo e bom

comportamento à fadiga. É comum a ocorrência de roturas prematuras em JSS devido à concentração de tensões que se verifica nas extremidades das juntas, o que constitui o principal problema destas juntas. Um número considerável de pesquisas tem vindo a ser efectuado no sentido de desenvolver técnicas mais eficientes de ligações com adesivos e suprimir as referidas concentrações de tensões [12].

Comparativamente aos métodos tradicionais, as ligações com adesivos apresentam várias vantagens, entre as quais se destacam [2, 9, 13]:

- Tensões distribuídas mais uniformemente pelas superfícies de ligação;
- Possibilidade de criação de estruturas que eram inviáveis devido a limitações geométricas ou de peso;
- Estruturas com melhor acabamento, dado que evitam furos e alterações geométricas decorrentes do processo de soldadura;
- Possibilidade de unir materiais diferentes e de formas complexas, o que é extremamente difícil pelos métodos comuns;
- Elevada capacidade de amortecimento de vibrações;
- Menor perturbação geométrica na zona da ligação;
- Criação de um contacto contínuo entre as peças ligadas;
- Aumento da resistência à fadiga;
- Ligação de chapas finas;
- Redução do peso das estruturas e dos custos.

É possível verificar através da Figura 2 que, numa ligação adesiva, as cargas e tensões são distribuídas sobre a área total da ligação, ao invés de se concentrarem em apenas alguns pontos, como acontece na ligação efectuada por rebites. Desta forma, as cargas estáticas e dinâmicas são distribuídas mais uniformemente, o que torna a ligação adesiva mais resistente à flexão e a vibrações [11].

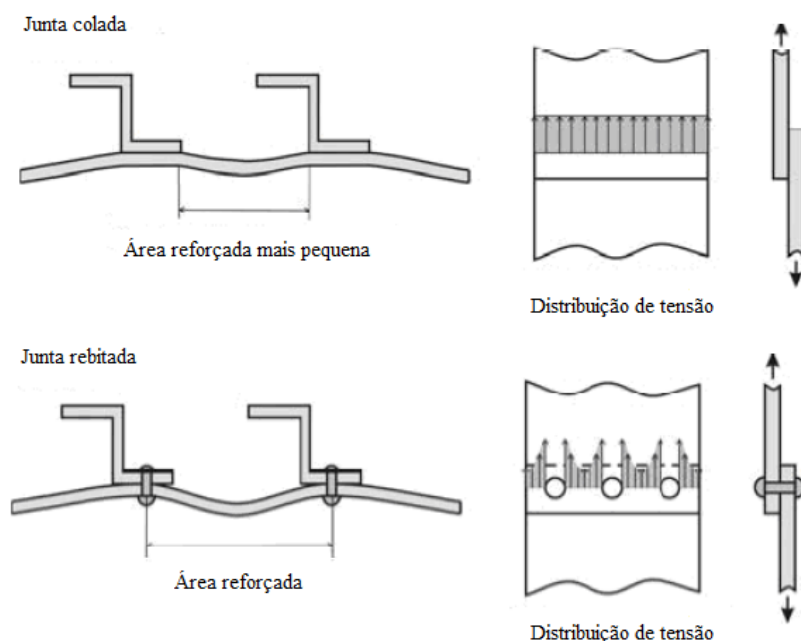


Figura 2 - Distribuição de tensões entre juntas adesivas e juntas rebetadas [2].

Relativamente a desvantagens ou limitações das juntas adesivas comparativamente aos métodos tradicionais existem alguns aspectos a considerar, tais como [9]:

- Necessidade de tratamentos superficiais para garantir a resistência da junta;
- Durabilidade da junta limitada em condições de serviço extremas;
- Métodos destrutivos requeridos no controlo da qualidade;
- Custos acrescidos com o uso de ferramentas de fixação na sua fabricação;
- Processos produtivos lentos;
- Fraca resistência ao arrancamento;
- Toxicidade de alguns adesivos;
- Baixa resistência de alguns adesivos à propagação de fendas.

Alguns processos de ligação apresentam vantagens e desvantagens consoante as características que se pretendem obter dependendo dos requisitos de projecto. Assim, a escolha do processo de ligação deve ser cuidada. Dependendo da aplicação, um dado

processo de ligação pode ser a melhor ou pior opção possível quando se pretende unir dois substratos. Outras vezes, é apenas uma alternativa [10].

### 2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

A indústria automóvel é uma das várias indústrias que recorre ao uso de juntas adesivas (Figura 3). Existem aplicações que se usam há décadas, como é o caso da aplicação do pára-brisas ao automóvel. Os chassis, tabliers, calços de travões e até as estruturas interiores e exteriores de camiões podem conter uniões por ligações adesivas, dado que estas permitem a união de diferentes materiais a diferentes componentes [14].

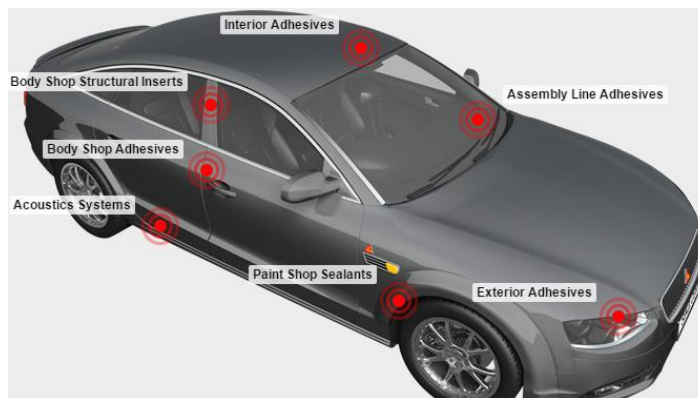


Figura 3 – Aplicações de adesivos em automóveis [15].

Com a necessidade de estruturas mais leves e novos materiais, foram também introduzidos os adesivos sintéticos na indústria aeronáutica (Figura 4). Estes adesivos permitem unir diferentes materiais e materiais de formas irregulares, melhorar a resistência à fadiga, além de serem mais económicos e leves [16]. Todos estes factores são muito atractivos para este mercado. Existem dois tipos de classes de ligações adesivas: a ligação estrutural, que transfere cargas entre membros, e os vedantes, que protegem as interfaces contra a corrosão. As ligações adesivas estruturais permitiram a construção de aviões mais leves, resistentes e duráveis, tornando-se uma boa alternativa aos elementos mecânicos como os rebites. As quantidades de rebites que aparafusavam o corpo de um avião eram imensas, mas actualmente quase não são utilizados para esta finalidade (Figura 5).

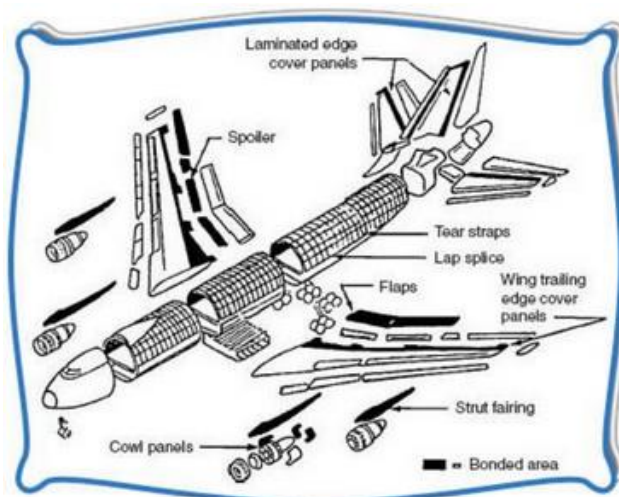


Figura 4 – Exemplos de ligações adesivas num avião [17].

Os adesivos baseados em polímeros sintéticos foram modificados por forma a promover a sua ductilidade e permitir a ligação de reforços em fuselagens e nas chapas finas das asas. Usualmente são modificados por forma a melhorar a sua tenacidade. Dada a boa resistência à fadiga tornaram-se também adequados no uso de hélices dos helicópteros, cujas partes constituintes são ligadas através de adesivos [9]. Actualmente são utilizados em aviões, adesivos sintéticos à base de diversos químicos tais como os fenólicos, epóxicos, bismaleimidas, poliamidas e ésteres de cianato [18].



Figura 5 – Comparação de uma ligação unida com adesivos com uma ligação rebitada [17].

A utilização de adesivos está também presente na medicina dentária, em materiais odontológicos e técnicas de medicina dentária. Os adesivos são utilizados em aplicações clínicas tais como a restauração directa e construção de dentes (Figura 6), onde o desempenho dos sistemas adesivos depende da forma de tratamento da superfície da dentina e da sua correcta aplicação clínica [19].

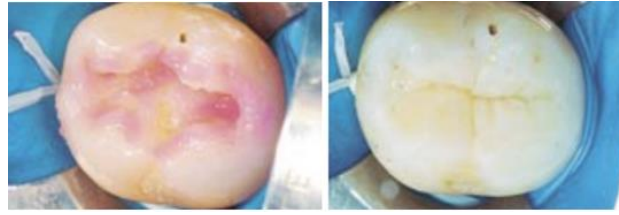


Figura 6 – Aplicação clínica de sistemas adesivos [19].

A indústria do calçado é outra indústria que utiliza adesivos, desde a colagem dos forros, solas ou plataformas, colagem de reforços, fixação das palmilhas nas formas, até aos acabamentos [20]. As juntas adesivas surgem na produção de calçado como alternativa à fixação mecânica, pois permitem desempenhar diferentes tipos de colagens, substituindo componentes tais como os agramos e as tachas, ou a aplicação de pregos ou costuras [14]. A Figura 7 apresenta as principais partes constituintes de um sapato [21], onde são utilizadas juntas adesivas para ligar muitas destas partes. Dependendo do tipo de calçado, são necessários adesivos com desempenhos diferentes [14].

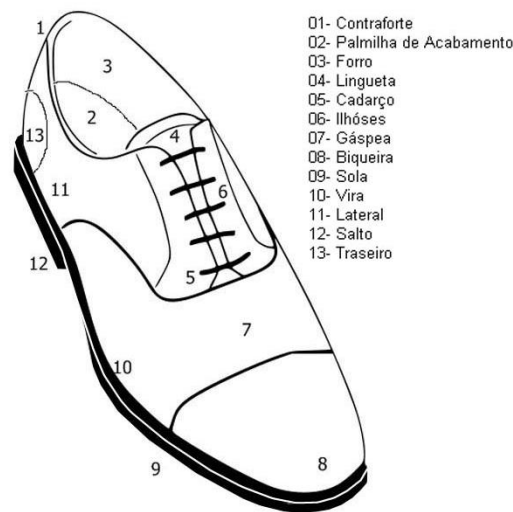


Figura 7 – Principais partes constituintes de um sapato [21].

Na indústria do papel, aplicações simples e usuais como post-its, papel fotográfico, papel de parede e envelopes são outra aplicação dos adesivos [22].



Figura 8 – Aplicação de madeira laminada na construção civil [23].

A indústria madeireira e a construção civil são duas áreas que se interligam em matéria de adesivos e vedantes. As edificações (moradias, fábricas, lojas, entre outras) e a engenharia civil compõem um dos maiores mercados dos adesivos, tanto em quantidade como a nível monetário, pois a utilização de juntas adesivas e de vedantes é em grande escala [24]. Quanto à indústria da madeira, de um modo geral, os adesivos são utilizados na colagem de madeira/lâminas de madeira, nos laminados decorativos, em vários tipos de artefactos e aglomerados, em painéis de madeira, em compósitos de madeira, entre outros [25]. Na construção civil, o uso da madeira laminada colada é um dos muitos exemplos e conta com numerosas aplicações. A madeira laminada está presente em espaços urbanos (Figura 8) como aeroportos, bibliotecas, teatros, arenas desportivas, templos religiosos, residências, terraços, varandas, spas, quiosques, pontes e pavilhões industriais [23].

A indústria electrónica é sem dúvida uma das áreas mais fortes na utilização de ligações adesivas. O aparecimento dos adesivos nesta indústria permitiu que novas tecnologias utilizando as ligações adesivas fossem desenvolvidas, exercendo um papel fundamental nesta área. Os adesivos implementados nos circuitos electrónicos possibilitaram a obtenção de uma diversificada e extensa gama de soluções, permitindo o preenchimento de requisitos fundamentais nos campos electro-termo-mecânicos, que são necessários para garantir comportamentos fiáveis nos sistemas eléctricos [14].

Os campos de aplicação da indústria electrónica são muito vastos, dos quais se realçam a ligação de *chips* a placas (substrato), um processo conhecido por *die-attach* [26]; e de placas de circuitos impressos (PCI), amplamente usadas em todos os tipos de equipamentos electrónicos (Figura 9). As PCI mais comuns são constituídas por camadas, uma camada de fibra reforçada de material dieléctrico, alternada com uma camada de circuitos de cobre

unidas entre elas por adesivos [27]. Na tecnologia de montagem superficial dos PCIs, a técnica de colagem consiste na montagem de circuitos electrónicos directamente na superfície das placas de circuitos impressos, que comportam pontos específicos onde vão ser aplicadas pequenas gotas de adesivo [14, 27, 28].

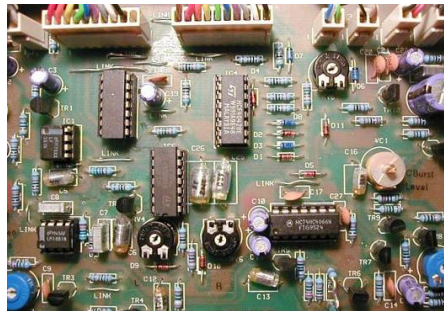


Figura 9 – PCI com componentes tradicionais [28].

Outra aplicação comum dos adesivos na indústria electrónica é na técnica *flip chip*, que faz a conexão directa de diferentes tipos de componentes electrónicos através de condutores de solda, substituindo as tecnologias de ligação de fios. Esta técnica aplica-se em dispositivos tais como os telemóveis, cartões inteligentes e componentes de automóveis [14], entre tantos outros exemplos de aplicações possíveis que esta técnica acarreta e possibilita.

### 2.1.3 Esforços típicos em juntas adesivas

Tração/compressão, corte, arrancamento e clivagem são os modos de carregamento considerados fundamentais em ligações adesivas (Figura 10). Na prática, podem ser encontradas combinações destas sollicitações [2].

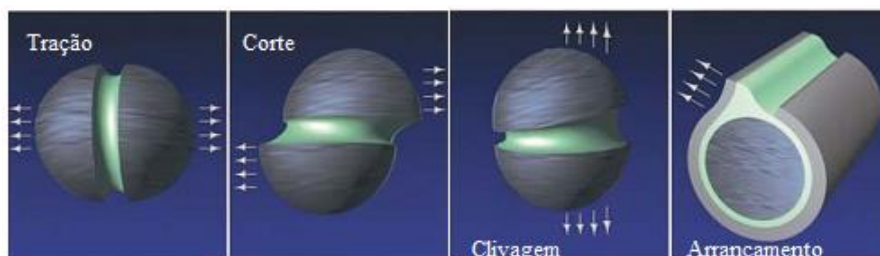


Figura 10 - Tipos de carregamento em juntas adesivas [29].

### 2.1.3.1 Tracção / Compressão

Os esforços de tracção desenvolvem-se quando as forças actuam perpendicularmente ao plano da junta e se distribuem ao longo da superfície colada. No fabrico destas juntas deve-se garantir que as superfícies de colagem dos substratos ficam perfeitamente paralelas e que os esforços são aplicados perpendicularmente às mesmas. À medida que a espessura do adesivo ( $t_A$ ) aumenta torna-se difícil garantir o paralelismo dos substratos, devido a variações de  $t_A$ . Por outro lado, as forças raramente são rigorosamente axiais (Figura 11).

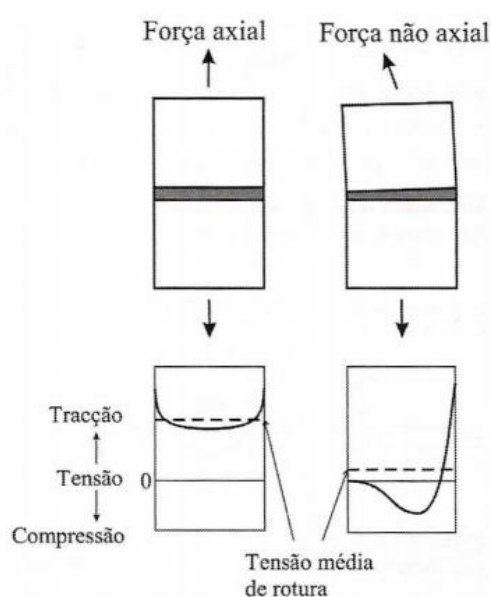


Figura 11 – Distribuição da tensão numa junta topo a topo sob carregamento axial (esquerda) e sob carregamento não axial (direita) [2].

Este problema pode ser minimizado se no projecto de juntas à tracção forem consideradas guias, de modo a garantirem um carregamento perfeitamente axial. Outro aspecto a considerar é que os substratos devem ser suficientemente rígidos, para que a tensão fique uniformemente distribuída.

As forças de compressão também devem estar alinhadas, à semelhança das forças de tracção, para que o adesivo se mantenha em compressão pura. Se uma junta estiver em compressão pura, praticamente não necessita de adesivo [2].

### 2.1.3.2 Corte

Os esforços de corte resultam de forças que actuam paralelamente ao plano da junta e tendem a fazer deslizar os substratos. Como toda a área colada resiste ao mesmo tempo, as juntas adesivas tornam-se mais resistentes e, desta forma, resistem melhor quando solicitadas. Nestas juntas, é relativamente mais fácil manter os substratos alinhados. Juntas que dependem da resistência ao corte do adesivo são, regra geral, fáceis de fabricar e muito usadas na prática. A JSS mostrada na Figura 12 representa o tipo de junta mais usual [2, 6].

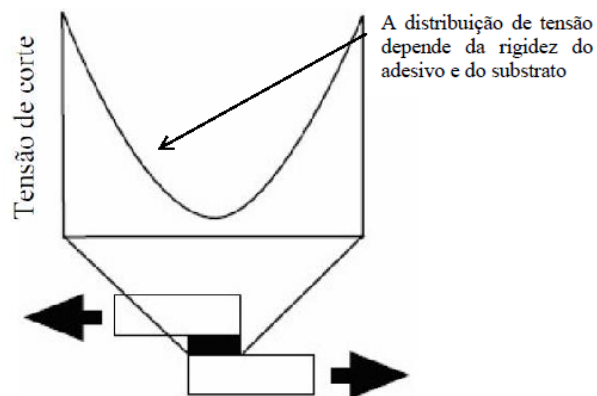


Figura 12 – Distribuição da tensão de corte numa JSS [11].

### 2.1.3.3 Clivagem

Quando existem forças a actuar numa extremidade de uma junta rígida de modo a separar os substratos ocorre um esforço de clivagem. Como a tensão fica reduzida a uma área muito pequena, estas juntas são muito menos resistentes do que as mencionadas anteriormente. Através da Figura 13 verifica-se que, neste tipo de solicitação, a extremidade oposta à aplicação da carga pouco ou nada contribui para a resistência da junta, e toda a tensão fica localizada na outra extremidade da junta. Para contrariar o esforço de clivagem é necessário que a superfície colada seja muito maior, o que torna estas juntas adesivas pouco viáveis economicamente [2, 6].

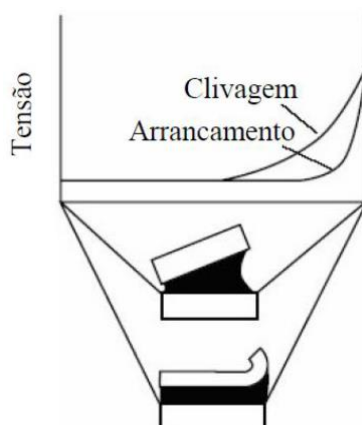


Figura 13 – Distribuição das tensões de clivagem e de arrancamento [11].

#### 2.1.3.4 Arrancamento

À semelhança da clivagem, o arrancamento ocorre quando são aplicadas as mesmas condições, com a diferença de que um ou ambos os substratos serem flexíveis. Ao solicitar a junta com este tipo de esforço, verifica-se uma concentração de tensões na extremidade da junta (Figura 13). Deste modo, o ângulo de separação para esforços de arrancamento pode ser muito maior do que para a clivagem. Devido à tensão estar concentrada numa área muito pequena, a resistência das juntas sob arrancamento (ou clivagem) em comparação com juntas sujeitas ao corte é muito inferior, sendo assim um tipo de junta a evitar. Adesivos frágeis e rígidos (Figura 14) são especificamente sensíveis às forças de arrancamento. No entanto, adesivos mais dúcteis e flexíveis permitem uma distribuição de tensões mais favorável e, conseqüentemente, maior resistência [2, 6].

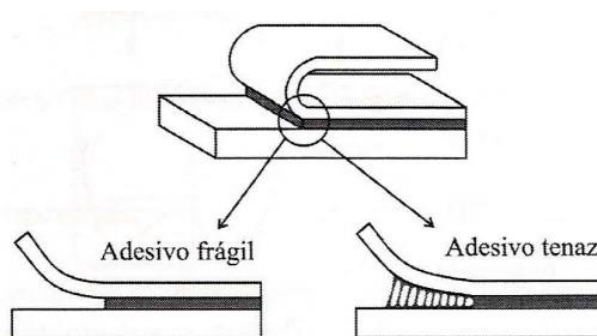


Figura 14 – Adesivos flexíveis e tenazes permitem tensões mais distribuídas [2].

## 2.1.4 Tipos de rotura

No projecto de uma junta adesiva é fundamental que a avaliação da distribuição de tensões e possíveis modos de rotura seja a mais correcta possível. No limite, uma junta adesiva deve ser mais resistente do que os materiais que se encontra a ligar. Uma ligação torna-se eficiente quando a transmissão de carga entre os dois componentes ligados e a integridade estrutural é mantida durante o carregamento, mesmo sob solicitações estáticas e/ou dinâmicas e condições ambientais adversas [1, 2].

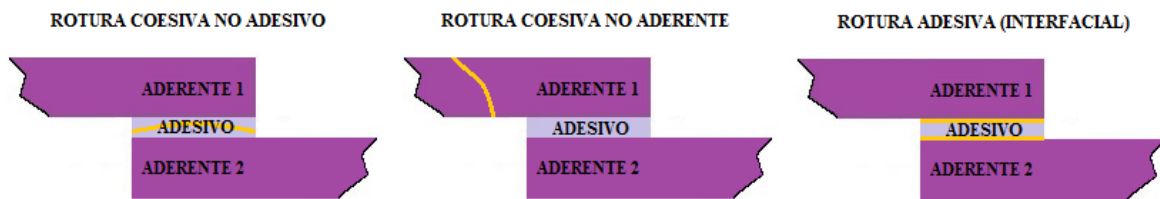


Figura 15 - Modos de rotura em juntas adesivas [2].

Existem três modos de rotura fundamentais em juntas adesivas [30]: rotura coesiva do adesivo (ocorre no interior do adesivo), rotura adesiva (ocorre na interface entre o substrato e o adesivo) e rotura interna de um dos substratos (Figura 15).

A rotura coesiva (caso preferível) ocorre quando se verifica rotura interna na região do adesivo, indicando que a resistência do adesivo é menor do que a resistência dos substratos e da própria ligação entre o adesivo e os substratos. A rotura adesiva é geralmente associada a uma má preparação das superfícies dos substratos. A rotura pelo aderente ocorre no interior do substrato, indicando que a resistência do substrato é inferior à do adesivo [2, 31].

Em determinados casos, é possível verificar-se a combinação de dois modos descritos, nomeadamente a rotura coesiva do adesivo e a rotura adesiva. Neste caso a rotura designa-se como mista [2].

## 2.1.5 Configurações possíveis de junta

A geometria e o tipo de ligação são factores fundamentais no projecto de uma junta adesiva. Existem diversas configurações de juntas, das quais a JSS é a mais usual [2, 32]. As JSS, juntas de sobreposição dupla (JSD), juntas com chanfro (*scarf joint*), juntas em degrau,

juntas com cobre-junta, entre outras (Figura 16), são algumas das configurações escolhidas regularmente em aplicações industriais [5, 32].

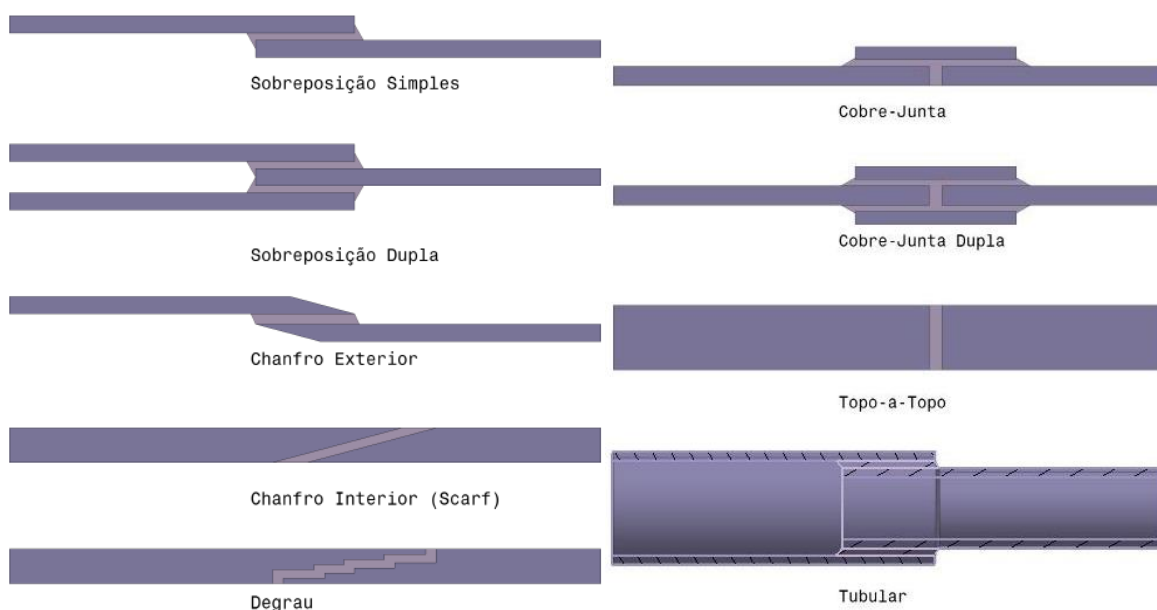


Figura 16 – Configurações mais comuns de juntas adesivas [2].

Nas JSS sujeitas à tracção o carregamento não é colinear e, por conseguinte, a aplicação do carregamento resulta na flexão dos substratos. Como resultado, as extremidades da camada adesiva ficam também sujeitas a esforços de tracção (tensões de arrancamento  $\sigma_y$ ) para além do corte. O cálculo para obtenção da tensão de corte média efectua-se dividindo a força aplicada ( $P$ ) pela área colada. Acontece que a maior parte da tensão se situa nos extremos da sobreposição, enquanto a região central não contribui significativamente para a sustentação da carga (conforme mostrado na Figura 11) [2, 5].

Na JSD as tensões  $\sigma_y$  são inferiores, devido à diminuição dos gradientes de deformação longitudinal relativamente às JSS e à flexão nula do substrato interior. Como resultado, estas juntas excedem o dobro da resistência de uma JSS com igual  $L_o$  (relação de áreas coladas destas duas configurações de junta). A morosidade no fabrico deste género de configuração de junta é o maior entrave à sua utilização [2].

As juntas com cobre-junta e cobre-junta dupla são tipicamente usadas na ligação de aderentes que precisam de se manter colineares ou para a reparação de estruturas danificadas, onde são criadas alternativas para a transferência de esforços. O processo de fabrico destas juntas consiste em colocar um (cobre-junta) ou dois (cobre junta-dupla) remendos colados

na zona da descontinuidade. Estas juntas apresentam semelhanças às JSS e JSD em termos de características. No caso da utilização da cobre-junta dupla para efeitos de reparação, pode ser inviável a sua aplicação por falta de acesso a um dos lados da estrutura para aplicação do remendo [12].

As juntas topo a topo planas são as mais simples de fabricar. No entanto, não apresentam eficácia elevada, devido à solicitação ser de tracção e a área colada reduzida. Além disso, este tipo de juntas não suporta esforços de flexão pois, neste caso, o adesivo estaria sujeito a clivagem. No caso de substratos espessos, a junta pode ser melhorada de várias maneiras conforme mostra a Figura 17. Todas as juntas topo a topo modificadas reduzem a clivagem. As juntas macho-fêmea (*tongue-and-groove*) são particularmente eficientes devido a serem auto-alinhantes e a actuarem como um reservatório para o adesivo. A junta em chanfro mantém o eixo do carregamento alinhado com a junta e não necessita de uma operação de maquinagem significativa [10, 11].

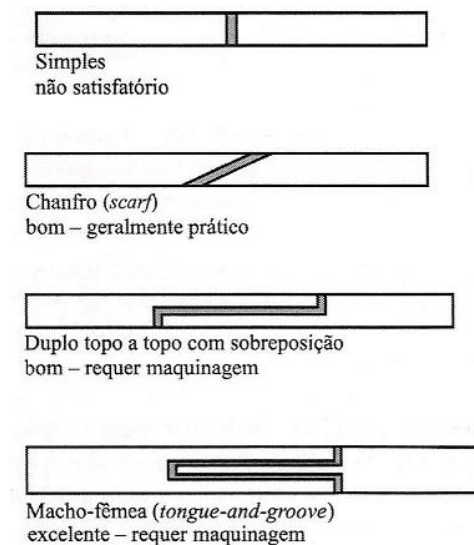


Figura 17 – Juntas topo a topo com geometrias alternativas [2].

Pelo contrário, as juntas em degrau ou rampa apresentam elevada resistência devido a permitirem a diminuição dos gradientes de tensões ao longo do adesivo e a significativa diminuição da excentricidade dos esforços. Relativamente ao fabrico, de uma forma geral, os custos são superiores às restantes configurações devido a todo o processo inerente de maquinagem dos degraus ou rampa. No caso das juntas em degrau com substratos em compósito, é mais económico e também mais comum executar os degraus durante o empilhamento antes da cura, evitando desta forma a danificação das fibras [10, 11].

A técnica de ligação adesiva é muito conveniente na ligação de tubos. As juntas tubulares podem ter a extremidade quadrada ou em chanfro, como representado na Figura 18. Na literatura, encontram-se disponíveis menos estudos deste tipo de junta, comparativamente às JSS, embora os mecanismos que levam às concentrações de tensões sejam os mesmos. No caso de ser efectuado um carregamento axial, observa-se ao longo do adesivo a deformação diferencial e o efeito de flexão devido à não colinearidade dos esforços transmitidos. No caso de um carregamento de torção, apenas existe a deformação diferencial [2].

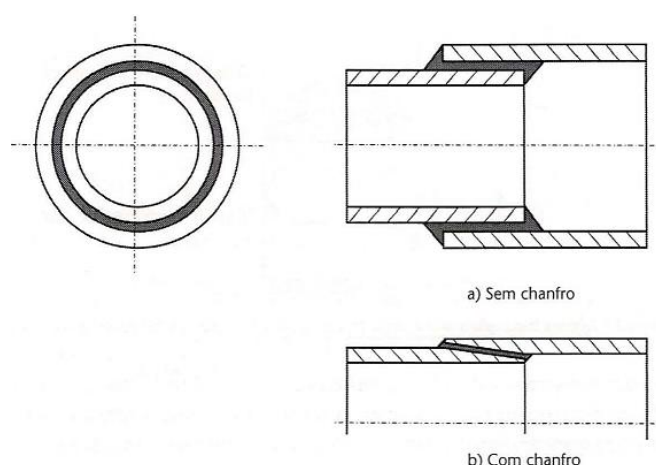


Figura 18 – Geometria da junta tubular: a) sem chanfro, b) com chanfro [2].

A solução mais simples e eficaz para garantir o alinhamento das forças numa JSS é a utilização da junta de ressalto (*joggle lap joint*), mostrada na Figura 19. A junta de ressalto pode ser feita simplesmente dobrando um dos substratos. Contudo, o ressalto apresenta dificuldades de fabricação acrescidas, especialmente para substratos frágeis ou de elevada resistência [10, 11].



Figura 19 – Junta de ressalto (*joggle lap joint*) [11].

### 2.1.6 Parâmetros que afectam o desempenho das juntas

São diversos os factores que têm influência na resistência de uma junta adesiva (Figura 20), como por exemplo as características mecânicas dos aderentes e dos adesivos, a geometria da junta, o tratamento superficial, as condições ambientais e as solicitações externas. Entre estes, o tratamento superficial é essencial para garantir uma boa colagem [8, 33].

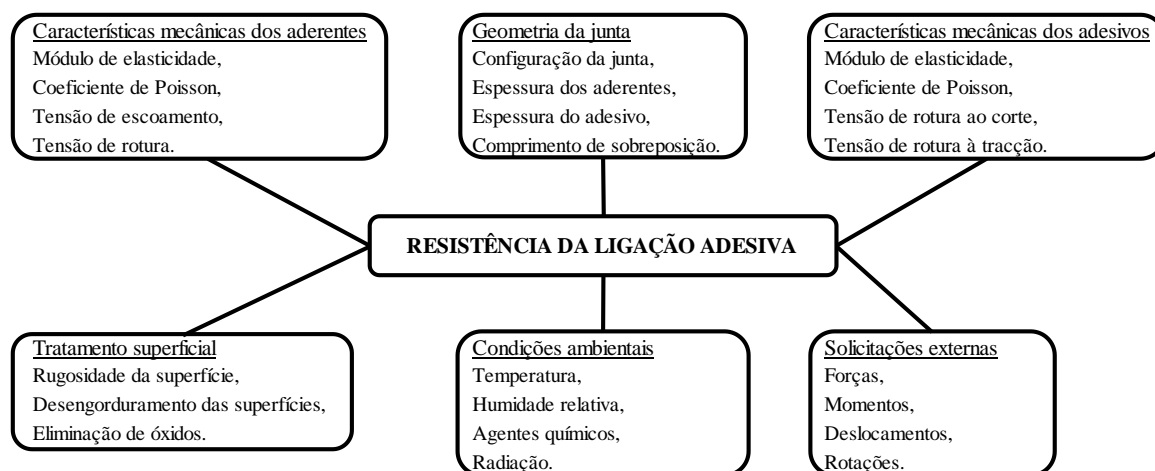


Figura 20 - Principais factores que afectam a resistência de juntas adesivas [33].

A rotura da junta adesiva inicia-se sempre nos locais de tensão máxima, sendo por isso essencial diminuir os picos de tensão. A consequência de uma distribuição de tensão não uniforme é a tensão média na rotura ser, por vezes, muito menor do que a tensão máxima localizada. Isto apenas não se observa caso o adesivo tenha uma grande capacidade de plastificação, o que permite a redistribuição das tensões no adesivo quando as suas tensões limite são atingidas [2].

### 2.1.6.1 Características mecânicas dos aderentes e dos adesivos

As propriedades mecânicas dos adesivos e dos substratos influenciam significativamente a resistência de uma junta adesiva. Convém referir que a resistência de um adesivo e a resistência de uma junta são conceitos distintos, já que um adesivo mais resistente não proporciona necessariamente uma junta mais resistente. A resistência da junta aumenta com a resistência mecânica, ductilidade e flexibilidade do adesivo [2].

#### 2.1.6.1.1 Propriedades do adesivo

Com distribuições de tensões não uniformes, a tensão média na rotura da junta adesiva é sempre inferior à tensão máxima localizada. Apenas nas distribuições de tensões praticamente uniformes ou na presença de plastificação significativa é possível aproximar a tensão média da tensão máxima. O módulo de elasticidade também tem influência na distribuição de tensão. Quanto mais rígido o adesivo for, menos uniforme é a distribuição de tensão mas, geralmente, a sua resistência é maior, apesar das duas propriedades não serem dependentes uma da outra. Assim, adesivos flexíveis promovem distribuições de tensões

mais uniformes, ao invés dos adesivos frágeis, que provocam grandes concentrações de tensão.

A resistência ao arrancamento para adesivos rígidos também é menor do que para adesivos mais flexíveis. Os adesivos dúcteis podem originar juntas mais resistentes do que juntas fabricadas com adesivos mais resistentes mas menos dúcteis, devido à boa capacidade de deformação plástica. Adesivos tenazes e flexíveis têm geralmente menor resistência ao corte, embora a tensão média seja usualmente superior [10, 2].

#### 2.1.6.1.2 Propriedades do substrato

As propriedades dos substratos têm uma grande influência nas distribuições de tensões, o que posteriormente se reflecte na resistência das juntas. Em juntas com substratos distintos, a sua rigidez axial deve ser idêntica, como indicado na expressão (1), em que  $E$  é o módulo de elasticidade longitudinal dos aderentes,  $t$  é a espessura e os índices ( $i,s$ ) dizem respeito aos substratos inferior e superior, respectivamente.

$$E_i t_i = E_s t_s. \quad (1)$$

Em substratos metálicos, caso haja deformação plástica dos substratos próxima das extremidades da sobreposição, a concentração de tensões no adesivo pode provocar roturas prematuras (Figura 21). Quanto maior for a tensão de cedência do substrato menor será a possibilidade de ocorrer rotura da junta induzida pela plastificação dos substratos [2].

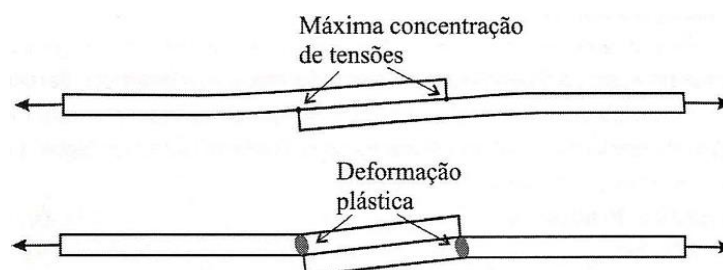


Figura 21 – Zonas de máxima concentração de tensões e de deformação plástica dos aderentes [2].

### 2.1.6.2 Geometria da junta

Para além de  $t_A$  e de  $L_0$ , que são dimensões intrinsecamente associadas à execução da junta adesiva, é relevante considerar na geometria da junta as alterações locais da geometria dos substratos e os filetes (*spew filet*) na extremidade da ligação.

#### 2.1.6.2.1 Espessura do adesivo

$t_A$  é um dos parâmetros geométricos que afecta a resistência da junta. Com o aumento de  $t_A$ , o risco de introduzir defeitos, nomeadamente bolhas de ar e vazios, aumenta. As espessuras que os fabricantes mais recomendam para a obtenção da resistência máxima estão compreendidas entre os valores 0,1 e 0,2 mm. Existe uma queda abrupta da resistência da junta para espessuras inferiores a 0,1 mm, devido a falhas na colagem. A explicação para a diminuição da resistência da junta com o aumento da espessura prende-se com vários factores [34, 35]:

- Elevados valores de  $t_A$  aumentam o risco de defeitos na junta (bolhas de ar ou microfendas, por exemplo);
- Aumento do momento flector (dependendo de  $t_A$  e do substrato), traduzindo-se numa diminuição da resistência da junta, devido ao aumento das tensões de arrancamento;
- As propriedades coesivas da camada de adesivo, nomeadamente a resistência, atingem o valor máximo para  $t_A$  de 0,1 ou 0,2 mm e diminuem gradualmente com o aumento de  $t_A$  e;
- A plastificação das camadas de adesivos dúcteis ocorre com maior facilidade em juntas com valores de espessuras e adesivo elevadas, o que leva à mais rápida propagação de fenda e conseqüente redução da resistência da junta.

Os modelos analíticos ou numéricos, baseados apenas numa análise elástica, prevêm a diminuição das tensões normais e de corte com o aumento de  $t_A$ . Como consequência, os modelos prevêm o aumento da resistência da junta, contradizendo a realidade. Crocombe [36] mostrou que em JSS a cedência completa do adesivo ocorre prematuramente numa junta mais espessa do que numa de menor espessura (Figura 22), concluindo que uma análise não linear material é fundamental para compreender a influência de  $t_A$  [2].

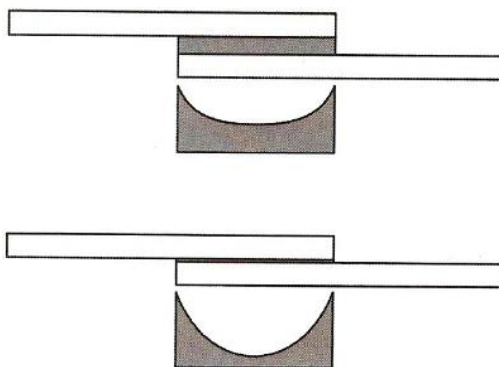


Figura 22 – Distribuição das tensões de corte no adesivo para diferentes valores de  $t_A$  [2].

### 2.1.6.2.2 Filete de adesivo

O filete de adesivo é o excesso de adesivo na extremidade da sobreposição e permite, através da sua inclusão, transferências de tensão mais suaves e redução das tensões máximas nas extremidades da zona ligada. Estudos científicos mostraram que os filetes de adesivo permitem reduzir picos de tensão nas extremidades da camada de adesivo e também no substrato em cerca de 50% ou mais [2, 34].

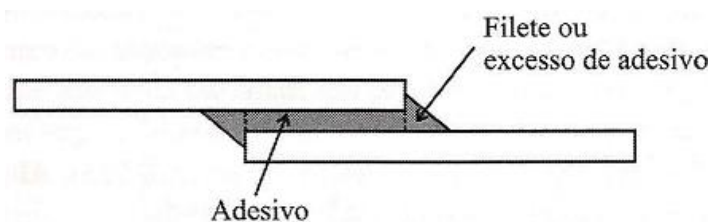


Figura 23 – Filete de adesivo numa JSS [2].

### 2.1.6.2.3 Espessura do substrato

Outro aspecto relevante para a resistência de juntas adesivas é a variação da espessura dos substratos ( $t_s$ ). No caso das JSS, devido à sua geometria, regista-se a deflexão transversa dos aderentes (Figura 24) provocada pela existência de um momento flector devido ao desalinhamento da carga. Este, por sua vez, deve-se à ausência de simetria horizontal da junta, cujo valor depende de  $t_A$  e de  $t_s$ . O aumento de  $t_s$  diminui a deflexão transversa das juntas, o que diminui  $\sigma_y$  e a deformação longitudinal dos aderentes na zona do adesivo, o que reduz os picos de tensões de corte  $\tau_{xy}$ . Assim, o aumento de  $t_s$  aumenta a resistência das juntas [33, 37].

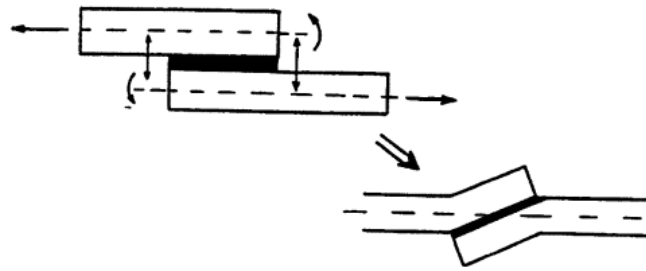


Figura 24 – Distorção dos aderentes devido à carga aplicada [33].

#### 2.1.6.2.4 Comprimento de sobreposição

Outro aspecto importante na geometria das juntas é o valor de  $L_0$ . Através da Figura 25 verifica-se que, quanto maior for  $L_0$ , maior é a resistência da junta. Para a mesma área colada, é mais benéfico uma junta com maior valor de  $b$  do que  $L_0$ , porque a resistência da junta não aumenta proporcionalmente ao valor de  $L_0$ , ao contrário do que acontece com  $b$  [8, 33].

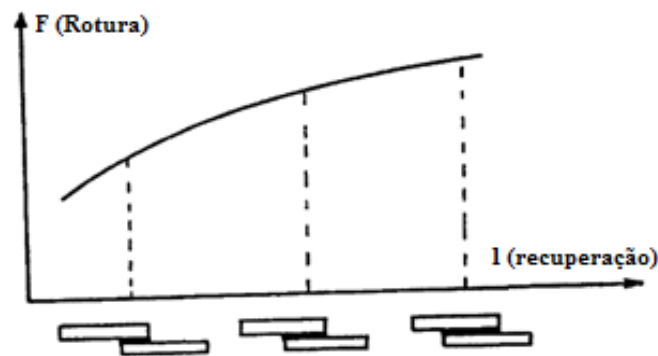


Figura 25 – Variação da resistência de uma JSS com  $L_0$  [33].

A resistência da junta aumenta significativamente para valores pequenos de  $L_0$  mas, a partir de determinado  $L_0$ , o ganho de resistência é marginal e o peso do conjunto aumenta desnecessariamente. Para adesivos frágeis e substratos de aço de alta resistência verifica-se que o aumento de  $L_0$  não se reflecte na resistência da junta a partir de um determinado valor (Figura 26), onde a resistência da junta passa a ser determinada pelas características do adesivo. No caso de substratos que se deformem plasticamente, a resistência da junta é determinada pelas características do substrato no domínio plástico e o aumento de  $L_0$  não se reflecte na resistência da junta a partir do momento em que se começa a observar a plastificação dos substratos [2].

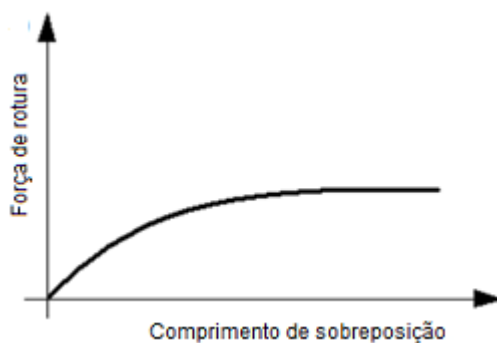


Figura 26 – Resistência de uma JSS em função de  $L_0$  [2].

A Figura 27 mostra a diferença da força de rotura para os adesivos dúcteis e frágeis em função de  $L_0$ . Inicialmente, o valor da força de rotura é superior para adesivos frágeis. No entanto, para valores de  $L_0$  mais elevados, verifica-se que os adesivos dúcteis apresentam uma força de rotura muito mais elevada do que os adesivos frágeis [10].

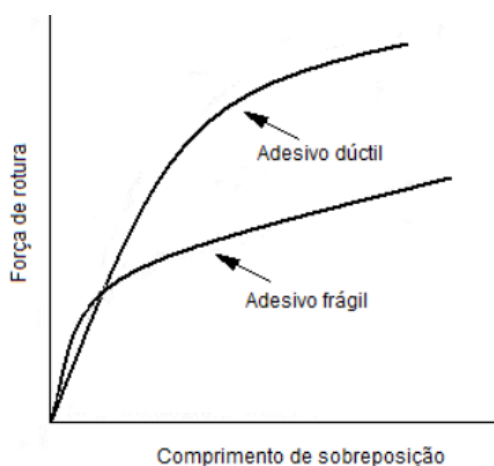


Figura 27 – Variação da força de rotura com  $L_0$  em adesivos dúcteis e frágeis [10].

#### 2.1.6.2.5 Geometria dos substratos

A geometria dos substratos é um factor a considerar para a redução das concentrações de tensão e deformação nas extremidades da zona de sobreposição. As juntas com chanfro permitem atenuar as concentrações de tensão (Figura 28). De facto, a utilização de chanfros permite diminuir a rigidez dos substratos nas extremidades da sobreposição, aliviando as concentrações de tensão e deformação [2].

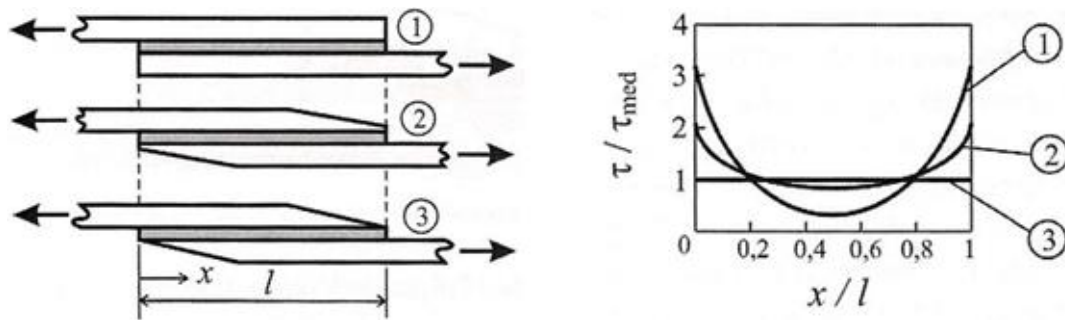


Figura 28 – Distribuição das tensões  $\tau_{xy}$  em juntas com e sem chanfro exterior [2].

Não é viável o estudo do efeito da geometria dos substratos por métodos analíticos. No entanto, foram desenvolvidas equações simples e métodos numéricos de optimização. A geometria apresentada na Figura 29 foi proposta por Hart-Smith, com o objectivo de melhorar a baixa eficiência das JSS. A teoria de Hart-Smith consiste em diminuir ao máximo o arrancamento de tal forma que não seja necessário incluir esta componente para efeitos de cálculo da resistência da junta [2].

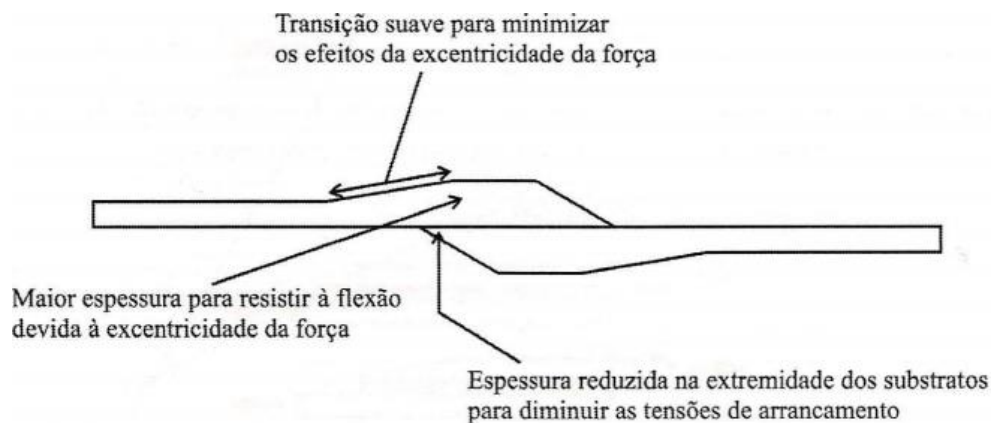


Figura 29 – Proposta de melhoria da eficiência de uma JSS segundo Hart-Smith [2].

### 2.1.6.3 Tratamento superficial

No processo de colagem uma das etapas mais importantes é a preparação superficial. Os tratamentos superficiais controlam e protegem os substratos antes da colagem, impedindo também a alteração da superfície após a colocação da junta em serviço. A preparação superficial destina-se a formar superfícies resistentes e de fácil molhagem. O tratamento dos substratos antes da colagem tem por objectivo obter uma rotura coesiva e não adesiva (falta de adesão entre o adesivo e o substrato) [2].

### 2.1.6.3.1 Rugosidade da superfície

Sabe-se que a área de contacto entre os substratos a ligar, bem como as ligações de interface, são favorecidas através do aumento da rugosidade entre as superfícies, sabendo-se que a sua união pode ficar comprometida quando se lida com superfícies muito lisas ou muito rugosas. Se o adesivo não tiver pontos de contacto suficientes, a sua aderência torna-se difícil. Isto verifica-se em superfícies muito lisas. Se a superfície for muito rugosa, o adesivo não consegue ser absorvido totalmente pelas cavidades do substrato, conduzindo ao aparecimento de bolhas de ar e vazios. Assim, para que a resistência da junta seja máxima é necessário que exista uma rugosidade óptima dos substratos (Figura 30) [33].

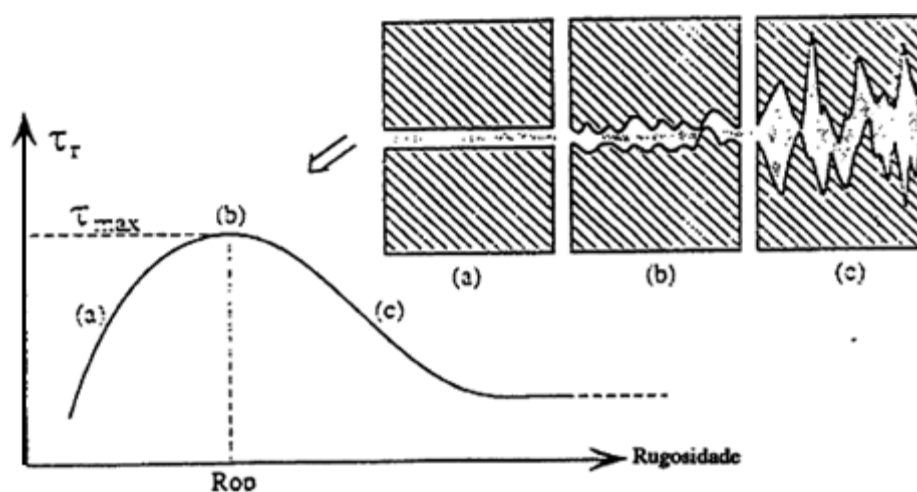


Figura 30 – Variação da tensão de ruptura ao corte da junta com a rugosidade superficial [33].

### 2.1.6.3.2 Desengorduramento das superfícies

Na preparação das superfícies metálicas podem ser utilizados fundamentalmente métodos mecânicos ou métodos químicos. Os diferentes tratamentos podem também ser classificados em processos passivos e activos. Os processos passivos só limpam os substratos e removem as camadas fracas, não alterando a natureza química da superfície. Os processos activos destinam-se a melhorar a molhagem ou a modificar a camada superficial para melhorar a adesão. São processos químicos ou físicos que, para além de limparem a superfície e removerem as camadas fracas, também alteram a natureza química.

O desengorduramento é um processo passivo químico cujo objectivo primordial é o de tirar manchas de gordura ou de óleo, fontes de fraca molhagem e aderência. No caso de um adesivo estrutural o desengorduramento deve constituir a primeira etapa de um tratamento,

embora esta limpeza possa ser suficiente no caso de colagens com adesivos não estruturais. Para activar as superfícies são sempre necessárias decapagens básicas ou ácidas. O tratamento químico confere aos substratos diversas vantagens, tais como boa uniformidade e aumento da durabilidade, particularmente em ambientes adversos [2, 10, 38].

#### **2.1.6.3.3 Remoção de óxidos**

Os tratamentos mecânicos mais usados são a granalhagem e a lixagem. Estes processos passivos mecânicos são muito efectivos na remoção de camadas grossas de óxidos e outras camadas fracas. A granalhagem é um método que consiste em projectar partículas abrasivas sobre a superfície que se pretende tratar. A pressão deve ser adaptada à dureza do substrato, porque é necessário considerar as deformações geradas pelas tensões de compressão, em especial em chapas finas. Em muitas aplicações, a resistência da junta é influenciada pelo tipo de granalha e aumenta conforme a rugosidade. Contudo, o excesso de rugosidade pode provocar o decréscimo da resistência por causa da formação de poros na superfície que podem favorecer o início de fendas [2, 38].

#### **2.1.6.4 Condições ambientais**

Grande parte das roturas em juntas adesivas em serviço estão ligadas a problemas de durabilidade resultantes da exposição a condições adversas. De um modo global, a durabilidade considera os efeitos da tensão, da humidade e da temperatura sobre o adesivo, o substrato e a interface [2].

No que concerne à temperatura, os adesivos estruturais em contacto com temperaturas elevadas apresentam comportamento viscoelástico, de tal forma que a ductilidade de um adesivo aumenta com o aumento da temperatura. Assim, o envelhecimento de juntas poderá melhorar algumas características das ligações adesivas caso estas estejam em ambientes com temperaturas e humidades relativas controladas, superiores ao meio ambiente. O adesivo deve apresentar uma temperatura de transição vítrea acima da temperatura de serviço. Em geral, os adesivos mais rígidos apresentam valores mais elevados deste parâmetro. No que diz respeito ao tempo de exposição a altas temperaturas, se se tratar de tempos curtos não é necessário um adesivo muito resistente a altas temperaturas. No entanto é recomendado a escolha de um adesivo resistente a altas temperaturas assim como à oxidação se a junta estiver exposta a maior parte do tempo a altas temperaturas [2, 33].

O processo de degradação da junta adesiva é acelerado se estiver num ambiente húmido e a temperaturas moderadamente elevadas. Em climas moderados os adesivos resistem relativamente bem. A humidade elevada pode ser desastrosa para alguns adesivos, nomeadamente se for combinada humidade elevada com altas temperaturas e cargas. A difusão da humidade causa alterações dimensionais, para além de cria tensões que provocam fissuração e baixa a temperatura de transição vítrea [2].

Quanto à resistência química (resistência aos ácidos, bases, solventes e outros químicos), deve ser considerado o tipo de químico e também a temperatura a que se dá o contacto. Os adesivos mais resistentes a agentes químicos são, em geral, os mais densamente reticulados, resultando em adesivos relativamente rígidos e que devem ser curados a altas temperaturas. Alguns adesivos têm uma boa resistência a alguns químicos e fraca a outros. Uma forma de melhorar a resistência a agentes químicos é protecção da junta do meio ambiente [2].

## **2.2 Adesivos**

Uma substância capaz de manter dois substratos unidos através do contacto entre as suas superfícies é designada de adesivo. As colas, os cimentos, as pastas e os vedantes são produtos que se enquadram nesta categoria. Os adesivos reúnem características que permitem a união de materiais onde não seria possível o uso de outros métodos [39].

### **2.2.1 Caracterização dos adesivos**

Existem várias maneiras de classificar os adesivos. Usualmente, a primeira abordagem surge na classificação dos adesivos segundo a origem. Através deste critério, os adesivos podem ser classificados em naturais, sintéticos e semi-sintéticos. Os adesivos sintéticos provêm de materiais feitos pelo homem, enquanto os adesivos naturais provêm de origem animal ou de subprodutos de agricultura [12, 40]. Ambos são classificados de materiais poliméricos, aos quais também pertencem os adesivos semi-sintéticos, ou artificiais. Os polímeros semi-sintéticos provêm de reacções químicas obtidas dos polímeros naturais [41]. A celulose, que é extraída da madeira ou algodão, o amido e as proteínas derivadas do colagénio, são exemplos de adesivos naturais. Exemplos de adesivos semi-sintéticos são a caseína e o nitrato de celulose. Exemplos de adesivos sintéticos fabricados a partir de materiais feitos pelo homem são os polímeros [2, 39, 41]. Outras formas de classificar os adesivos

compreendem a composição química, forma física, função e modo de aplicação. O custo também pode ser um dos critérios a considerar [40].

Um adesivo pode também ser classificado segundo a função como estrutural ou não estrutural. Esta classificação, que se baseia no desempenho apresentado pelo adesivo, divide os dois grupos conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos adesivos segundo a função [11].

ESTRUTURAIS			NÃO ESTRUTURAIS	
Fenólicos	Fenólicos-vinílicos	A D E S I V O S	Borrachas sintéticas	Silicone
	Fenólicos-nitrilo			Policloropreno e nitrilo
	Fenólicos-policloropreno			Polisulfureto
Acrílicos	Anaeróbicos		Poliésteres	
	Cianoacrilatos			
Poliuretano				
Poliimida				
Epóxido	Epóxido-poliamida		Termofusíveis	
	Epóxido-polisulfureto			
	Epóxido-fenólicos			
	Epóxido-poliuretano			
	Epóxido-nitrilo		Inorgânicos	

Os adesivos não estruturais não são adaptados ao suporte de cargas substanciais e limitam-se a manter em posição materiais mais leves. São usados na sua maioria para ajustes que sejam temporários e, comparativamente aos adesivos estruturais, são adesivos com resistência e tempo de utilização bastante mais baixos. São exemplos de adesivos não estruturais os adesivos termofusíveis, alguns adesivos sensíveis à pressão e as emulsões de água, porque têm fraca resistência ao corte e baixa resistência à temperatura e agentes químicos [2, 10, 11]. O adesivo é considerado estrutural quando tem resistência ao corte superior a 7 MPa [10]. Estes adesivos são utilizados na realização de ligações em que há a necessidade de assegurar a transmissão de esforços significativos de uma peça para outra. Nestas ligações, o adesivo pode apresentar uma resistência equivalente aos materiais constituintes da estrutura que vai ser colada, onde o adesivo é uma das partes integrantes da estrutura. Como tal, estes adesivos podem unir materiais de elevada resistência tais como a madeira, os compósitos e os metais. Caracterizam-se como sendo resistentes à maioria dos ambientes comuns e assume-se que os adesivos estruturais tenham duração de vida igual ou superior à sua aplicação. Normalmente, os adesivos estruturais são fabricados com base em

resinas termoendurecíveis modificadas por resinas termoplásticas ou elastómeros. As grandes famílias de adesivos estruturais são: os anaeróbicos, os acrílicos, os epóxidos, os cianoacrilatos e os poliuretanos [33, 42]. Distinguem-se dois tipos de adesivos estruturais, os frágeis e os dúcteis. É possível observar o comportamento característico destes dois tipos de adesivos na Figura 31, onde se visualiza que o adesivo frágil sofre pouca deformação plástica [42]. Descrevem-se de seguida as formas principais de classificação dos adesivos.

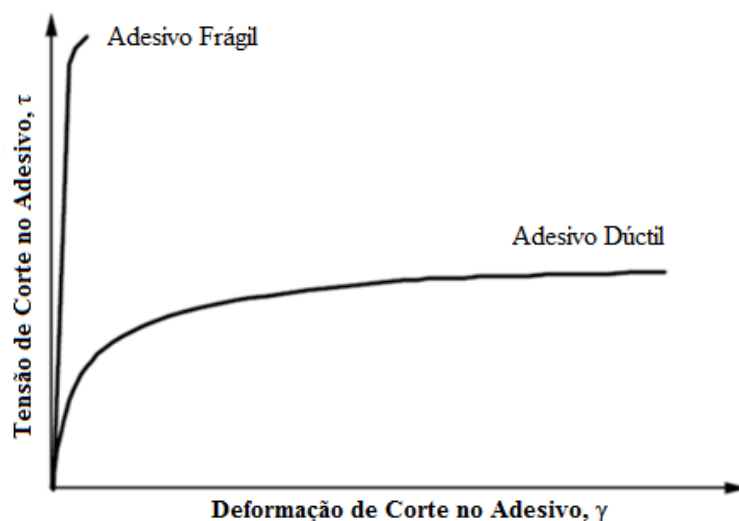


Figura 31 – Comparação das curvas tensão – deformação típicas entre um adesivo frágil e um dúctil [42].

### 2.2.1.1 Composição química

Segundo a composição química os adesivos são classificados como orgânicos e inorgânicos. É na classificação de orgânicos que estão situados os adesivos sintéticos e os de origem natural [39]. Os adesivos sintéticos podem ainda ser divididos na categoria de adesivos poliméricos termoendurecíveis, termoplásticos, elastómeros e híbridos [2, 12].

Os adesivos termoendurecíveis são materiais que são processados por polimerização, reticulação e enformação [43]. A reticulação costuma resultar de uma reacção química. Após a sua cura inicial, estes adesivos não podem ser aquecidos e amolecidos repetidamente pois são materiais insolúveis e não fundíveis [2]. Quando processados, assumem a sua forma definitiva e, se voltarem a ser submetidos ao aquecimento, as suas propriedades deterioram-se [41], tornando-se fracos devido à oxidação ou quebras nas cadeias moleculares [2].

Os adesivos termoplásticos são materiais cujo processamento se efectua através dos processos de amolecimento, reenformação e arrefecimento [43]. São originalmente polímeros que amolecem ou fundem quando aquecidos. Como as moléculas não curam numa estrutura reticulada, quando sujeitos a carga tendem a fluir a baixas temperaturas. Alguns termoplásticos originam excelente resistência ao corte quando sujeitos a temperaturas moderadas. Quando sujeitos a carga, dependendo do adesivo, a deformação a longo prazo pode ocorrer à temperatura ambiente ou ainda a temperaturas mais baixas [2]. Assim, o que distingue os materiais termoplásticos dos termoendurecíveis, não é mais do que a sua capacidade de serem fundidos e solidificados repetidamente, com ou sem perda significativa das suas propriedades fundamentais. De facto, os materiais termoplásticos suportam vários ciclos térmicos, enquanto os termoendurecíveis apenas um [41].

Os elastómeros são baseados em polímeros elastoméricos sintéticos ou naturais que têm uma grande tenacidade [2] e possuem elevado grau de elasticidade. Quando submetidos a tensão, mesmo que significativa, esta deformação é reversível dado que, após removida a tensão, o material volta às suas dimensões originais [41]. São materiais que absorvem muita energia e, por exemplo, em juntas submetidas a carregamento não uniforme, permitem obter boa resistência. São usados em amortecimento de vibrações, isolamento sonoro e como vedantes. A Tabela 2 mostra uma comparação qualitativa de algumas propriedades destas três categorias de adesivos.

Tabela 2 – Materiais poliméricos e suas propriedades [11].

<b>PROPRIEDADES</b>	<b>Termoendurecíveis</b>	<b>Termoplásticos</b>	<b>Elastómeros</b>
Flexibilidade (resiliência)	Má	Média	Muito Boa
Resistência mecânica	Boa	Medíocre	Má
Resistência térmica	Boa	Medíocre	Variável
Resistência a agentes químicos	Boa	Boa	Medíocre

Adesivos híbridos são feitos a partir da combinação de duas ou três das categorias descritas. Para este efeito, podem ser por exemplo combinadas resinas rígidas e frágeis com um adesivo elastomérico ou termoplástico flexível e tenaz, para melhorar a resistência ao arrancamento e a capacidade de absorção de energia [2].

### 2.2.1.2 Forma física

Segundo o critério de forma física os adesivos podem apresentar-se sob a forma de pastas, líquidos, com solvente, com água e em formas sólidas. Dentro destas categorias existem algumas variantes. Relativamente às pastas e líquidos, cuja distinção se faz pela viscosidade de ambos, os adesivos podem conter as duas partes sem solvente ou apenas uma parte sem solvente. Se o adesivo for líquido, como escoa com facilidade e se espalha facilmente durante a cura, em especial a temperaturas elevadas, este pode ser aplicado sob a forma de filmes finos. Se o adesivo for em pasta, a sua espessura é maior e deve ser espalhado com espátulas ou pistolas. No caso de serem utilizadas duas partes sem solvente, ambas devem ser medidas e misturadas imediatamente antes da sua utilização. A maior parte pode curar à temperatura ambiente ou a altas temperaturas.

Com maior cuidado devem ser tratados os adesivos com solvente. Neste tipo de adesivo é usado um solvente orgânico de modo a reduzir a viscosidade e facilitar a aplicação. Devem ser considerados com cuidado antes de serem escolhidos para produção pois são necessários cuidados com a saúde, segurança e ambiente. Estes adesivos são aplicados através de *sprays*, por imersão ou com uma escova. É de salientar que o solvente, orgânico, deve ser eliminado antes da junção dos substratos [2].

Os adesivos à base de água geralmente são resinas termoplásticas. A formação da ligação depende da reactivação da película adesiva secada sob calor e pressão. O co polímero acetato de polivinilo, conhecido como cola “branca” ou cola de madeira, é um dos adesivos à base de água mais conhecidos. Adesivos à base de água são considerados substitutos dos adesivos à base de solventes, cuja finalidade é reduzir as emissões orgânicas no processo de fabrico [2, 40].

Nos adesivos de formas sólidas, a principal vantagem prende-se com o facto de serem adesivos de um só componente, não necessitando de dosagem nem de mistura. Podem ser aplicados uniformemente no substrato com pouco ou nenhum desperdício sendo, por este motivo, adesivos muito apelativos em produções industriais. Deles fazem parte as fitas e filmes, os adesivos em pó e outras formas sólidas [2].

### 2.2.1.3 Modo de aplicação ou reacção

O modo de aplicação dos adesivos depende em grande parte da sua viscosidade. Se os adesivos são líquidos a sua aplicação pode ser em *spray*, com escova ou com espátula. No caso das pastas os adesivos aplicam-se através de seringas, pistolas de mástique ou equipamento pneumático [2].

Os adesivos podem ainda ser classificados relativamente ao modo como reagem ou solidificam. Os adesivos podem curar por vários métodos, tais como: por reacção química, por evaporação de um solvente e por arrefecimento desde o estado sólido (após fusão). O método de cura pode limitar significativamente as características de um adesivo para uma aplicação particular, pelo que o modo como o adesivo cura pode ser um factor muito importante no processo de selecção.

## 2.2.2 Tipos de adesivos estruturais

Os adesivos estruturais geralmente são adesivos termoendurecíveis que precisam de reticulação química com adição de um endurecedor e/ou fornecimento de calor. Também podem ser classificados como adesivos estruturais alguns elastómeros termoendurecíveis resistentes, tais como os poliuretanos. De seguida são descritos alguns dos principais adesivos estruturais [2, 5, 44].

### 2.2.2.1 Epóxidos

Os adesivos epóxidos são adesivos extremamente versáteis. Aderem bem a vários tipos de substratos e são facilmente modificados para obter uma grande variedade de propriedades. Possuem resistência elevada à fluência, à tracção e corte mas fraca resistência ao arrancamento, a não ser que sejam modificados com um polímero mais tenaz. Estão disponíveis numa grande variedade de formas, desde adesivos líquidos de baixa viscosidade até pastas sólidas ou filmes. Apresentam uma enorme diversidade de aplicações e permitem ligar quase todos os materiais utilizados na construção mecânica.

Os epóxidos são termoendurecíveis, têm baixa contracção e não apresentam evaporação de voláteis. São comercializados sob a forma de resina epóxida e endurecedor. O endurecedor pode ser incorporado na resina, o que origina um adesivo de um só componente, ou pode ser

fornecido em separado num recipiente que depois deve ser misturado com a resina, antes da aplicação.

Os adesivos de uma parte curam com calor enquanto os de duas partes podem curar à temperatura ambiente ou a altas temperaturas. Nos epóxicos de uma parte o processo de cura efectua-se normalmente a quente, com temperaturas a partir dos 120°C. Nos epóxicos de duas partes a cura pode ser accionada a partir dos 5°C. O processo de cura pode ser acelerado por acção da temperatura, correspondendo geralmente um aumento de temperatura na ordem dos 10°C a uma duplicação na velocidade de reacção [2, 11].

### **2.2.2.2 Fenólicos**

As resinas com maior aptidão para colar madeira são denominadas fenólicas e resultam da condensação de fenol e formaldeído. Os adesivos fenólicos caracterizam-se pela boa resistência mecânica, boa resistência a altas temperaturas e boa estabilidade dimensional. São adesivos frágeis, de custo reduzido e com pouca resistência à corrosão por solventes. A aplicação destes adesivos faz-se com uma solução em álcool, acetona ou água, ou alternativamente, sob a forma de pó dissolvido em água e filmes. Estes adesivos são depositados no substrato (seco) e posteriormente curados sob pressão e temperatura. A cura é efectuada durante vários minutos a aproximadamente 140°C. Durante o processo de cura, ocorre libertação de água e por este motivo os substratos devem ser porosos ou deve ser imposta uma pressão elevada para evitar o aparecimento de vazios na zona da colagem. Devido às limitações que estes adesivos apresentam, são muitas vezes modificados com adição de elastómeros de modo a melhorar a tenacidade e a resistência ao arrancamento [2, 11].

### **2.2.2.3 Poliuretanos**

Apresentam-se geralmente sob a forma de dois componentes, resultantes da reacção de um polioliol com um isocianato. As características dos poliuretanos são bastante semelhantes às dos epóxicos no que diz respeito à sua forma e temperaturas de cura. As vantagens reflectem-se na boa tenacidade, melhor resistência a baixas temperaturas, boa resistência química, molhabilidade e flexibilidade. Têm alta resistência ao corte e ao arrancamento. Podem atingir resistências de rotura ao corte na ordem dos 20 ou até 30 MPa, aproximadamente, possibilitando o uso em aplicações estruturais. Os poliuretanos aderem bem a uma gama

considerável de substratos, inclusivamente alguns de difícil colagem. Alguns poliuretanos degradam-se consideravelmente quando expostos a elevados níveis de humidade, em ambos os estados curado e não curado. Não possuem boa resistência a altas temperaturas, sendo que a temperatura máxima é de aproximadamente 150°C e grande parte das formulações é efectuada abaixo dos 120°C [2, 11].

#### **2.2.2.4 Acrílicos**

Os adesivos acrílicos podem ser divididos em anaeróbicos, cianoacrilatos e acrílicos modificados. Os acrílicos anaeróbicos são adesivos que têm por base o monómero acrilato, cuja designação se deve à exclusão do ar da resina durante o processo de cura. Estes adesivos têm grande aplicação na indústria mecânica, e podem ser utilizados na fixação de peças estriadas e roscadas, na fixação de rolamentos e, de um modo geral, podem ser utilizados na ligação de peças com geometria cilíndrica. São usualmente líquidos monocomponentes que podem ser curados à temperatura ambiente e são fáceis de usar. Apresentam boa resistência a solventes e à humidade. A sua temperatura máxima de utilização situa-se próximo dos 150°C. Os adesivos anaeróbicos aplicam-se na colagem de materiais como o acetal, as polilefinas, o *nylon*, o policloreto de vinilo (PVC), entre outros [2, 11].

Os acrílicos cianoacrilatos são conhecidos por colas instantâneas, super colas ou também por cola tudo, devido a permitirem colagens muito rápidas. São líquidos de um só componente com excelente resistência ao corte e cura rápida. O processo de cura é influenciado pela humidade, pelo teor em pH do meio e pela espessura da junta colada. Quando comparados com os anaeróbicos são adesivos mais rígidos e menos resistentes à humidade. Apresentam excelente resistência à tracção mas a resistência ao arrancamento é baixa, são frágeis e de custo elevado. Os cianoacrilatos são adequados para colagem de borrachas ou superfícies plásticas. Quando se apresentam sob a forma de gel, permitem ligar substratos como madeira, couro e tecidos, que eram difíceis de colar com os primeiros cianoacrilatos.

Os acrílicos modificados são acrílicos termoendurecíveis em que a modificação consiste na introdução de metacrilato de polimetilo reticulado e uma borracha de nitrilo. Possuem baixa contracção durante a cura e podem ser aplicados para unir uma grande variedade de materiais tais como os plásticos e os metais. Apresentam elevada resistência à humidade e têm boa resistência ao arrancamento e ao impacto. Permitem ligações resistentes e toleram uma

preparação mínima das superfícies. Por outro lado, são relativamente rígidos, não são adequados para uso a baixas temperaturas e possuem elevada inflamabilidade [2, 11].

## **2.3 Previsão da resistência das juntas**

No início do estudo das juntas adesivas não existiam modelos materiais precisos nem critérios adequados de rotura, o que levava ao sobredimensionamento da ligação adesiva, reflectindo-se em estruturas mais pesadas e caras. Surgiu assim a necessidade de obter técnicas de análise fiáveis para as juntas adesivas. Ao longo dos tempos foram desenvolvidas diversas metodologias de previsão (analíticas e numéricas), possibilitando uma melhoria na eficiência das ligações adesivas. Essencialmente, existem duas alternativas para efectuar a análise das juntas adesivas: os métodos analíticos, com as análises de forma-fechada, e os métodos numéricos, tipicamente baseados em análises de MEF. A abordagem mais simples, quer por modelos analíticos quer por elementos finitos, é a mecânica dos meios contínuos.

As análises por elementos finitos também podem ser usadas juntamente com os critérios da mecânica da fractura na previsão da resistência, quer pelo factor de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como o Método de Fecho Virtual de Fenda (MFVF). Por outro lado, estas técnicas carecem da necessidade de reconstruir a malha durante a propagação do dano, aumentando de forma considerável o esforço computacional [45].

Importantes desenvolvimentos ocorreram nas últimas décadas, como por exemplo a modelação por dano pela combinação do MEF com elementos coesivos. É uma técnica que reúne a modelação convencional pelo MEF, para as regiões onde não é esperado ocorrer dano, com a técnica MDC, para simular o crescimento do dano. Recentemente apareceu o MEFE. Este método usa funções de forma enriquecidas para representar as descontinuidades nos campos dos deslocamentos.

### **2.3.1 Mecânica dos meios contínuos**

As primeiras análises a juntas adesivas usavam uma aproximação da mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência. Para tal era requerida a distribuição de tensões ou deformações e um critério de rotura adequado. A previsão da resistência é efectuada pela comparação dos valores máximos na junta com os valores limite para os materiais em causa.

A distribuição de tensões ou deformações pode ser obtida analiticamente ou por métodos numéricos como o MEF.

Os modelos analíticos de forma-fechada (*closed-form models*) datam dos anos 30 com o modelo analítico de Volkersen [3], que considera que os materiais são totalmente elásticos e a deformação do adesivo ocorre apenas ao corte. No entanto, se os adesivos se deformarem plasticamente, se forem usados aderentes compósitos, ou ainda se forem considerados aderentes distintos, a formulação analítica das juntas adesivas torna-se mais complicada. Adams e os seus colegas foram pioneiros na utilização de elementos finitos para a previsão da resistência de juntas adesivas [46]. Efeitos como a rotação da junta e dos aderentes, a plasticidade dos adesivos e a influência dos filetes de adesivo foram estudados inicialmente por Harry e Adams [47]. Descrevem-se de seguida alguns dos modelos analíticos mais relevantes para JSS.

O uso de técnicas analíticas na análise de juntas adesivas envolve sempre a utilização de pressupostos para a simplificação dos modelos na obtenção da solução do problema, nomeadamente a geometria da junta, o carregamento e as condições fronteira. Uma destas simplificações consiste em assumir adesivos com comportamento linear elástico, o que geralmente não reflecte o comportamento real dos adesivos. A utilização destes métodos analíticos tem como vantagem a rapidez da análise, embora incorporando muitas hipóteses simplificativas [48]. Por outro lado, estes modelos prevêm um aumento das tensões no adesivo com a diminuição da  $t_A$  [49]. A utilização de modelos analíticos para previsão do comportamento de juntas adesivas tem algumas limitações. Por exemplo, não é considerado o estado de tensão tridimensional criado devido ao efeito de Poisson, também denominado efeito anti-clástico (Figura 32). Também não é considerada a variação das tensões no adesivo ao longo de  $t_A$ , especialmente as tensões da interface, que são importantes quando a rotura ocorre perto dessa zona [49].

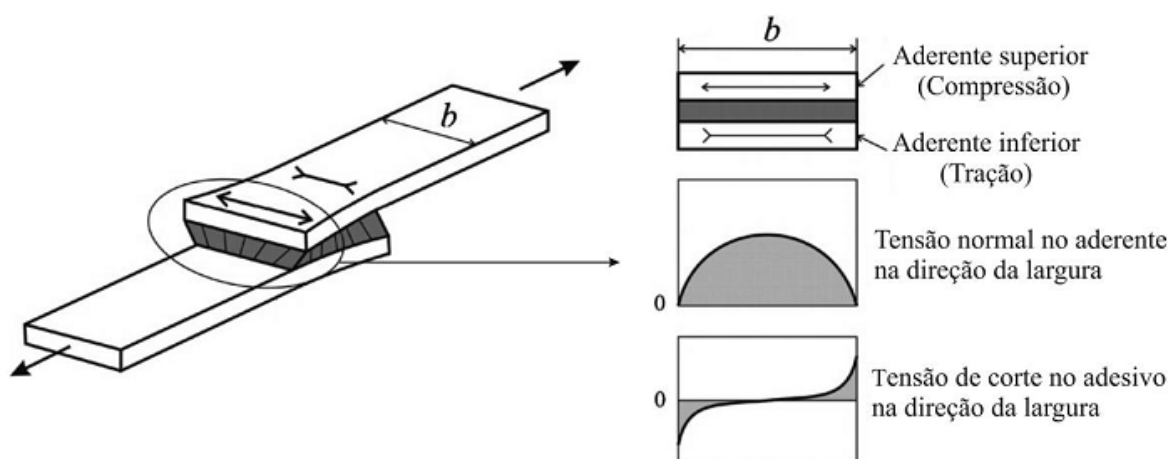


Figura 32 - Efeito de Poisson tridimensional (efeito anti-clástico) numa JSS [50].

Para facilitar a aplicação dos métodos analíticos existem *softwares* comerciais como o BISEPS-LOCO; BISEPS-TUG [51] e mais recente o *Joint Designer* [50]. O uso de modelos analíticos na análise de resistência das juntas adesivas pressupõe a utilização de critérios de ruptura baseados em tensões, deformações ou energia de deformação [52].

### 2.3.1.1 Análise Elástica Linear Simples

Na análise linear elástica a duas dimensões considera-se que os aderentes são rígidos e que se deformam apenas ao corte, o que resulta na expressão (2) para a tensão  $\tau_{xy}$ , onde  $l$  é o comprimento da junta. Esta é a análise mais simples que pode ser efectuada numa JSS [32].

$$\tau_{xy} = \frac{P}{bl} \quad (2)$$

Considerando o caso teórico em que os substratos têm uma rigidez infinita, as forças aplicadas no substrato geram no adesivo uma tensão  $\tau$  uniformemente distribuída [1], como pode ser observado na Figura 33.

O valor de  $\tau_{xy}$  pode ser interpretado como a média da tensão de corte  $\tau_{xy}$  que actua na camada do adesivo [50]. Esta análise é pouco realista devido às muitas simplificações introduzidas.

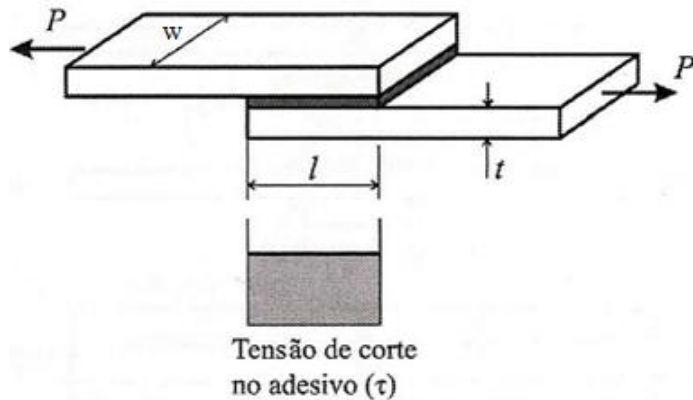


Figura 33 – Análise linear elástica da tensão  $\tau_{xy}$  numa JSS [2].

### 2.3.1.2 Modelo de Volkersen

O modelo de Volkersen acrescenta a deformação longitudinal dos aderentes à análise anterior [50]. Nesta análise é introduzido o conceito de corte diferencial (Figura 34), assumindo que o adesivo se deforma apenas ao corte, mas em que os aderentes podem deformar-se pela tensão gerada pela carga  $P$  por serem considerados elásticos e não rígidos.

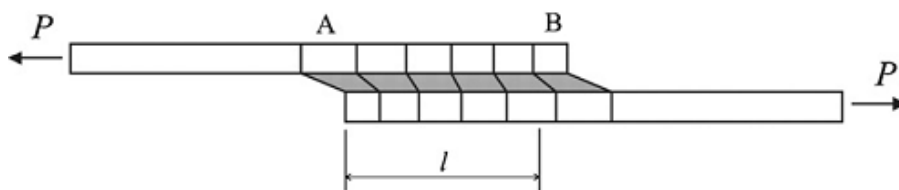


Figura 34 – Deformações longitudinal numa JSS com aderentes elásticos [53].

A diferença de tensão normal no substrato entre os pontos A e B (a tensão é máxima no ponto A e nula no ponto B) e a continuidade entre o substrato e o adesivo resultam numa tensão  $\tau_{xy}$  não uniforme ao longo da sobreposição. Deste modo,  $\tau_{xy}$  deixa de ser considerada uniforme ao longo do adesivo para passar a ser máxima nos extremos do adesivo e mínima ao centro, conforme mostra a Figura 35 [53].

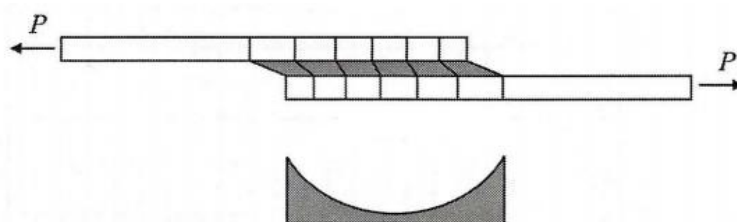


Figura 35 – Análise de uma JSS pelo método de Volkersen [53].

Esta análise não tem em consideração o efeito de flexão causado pela aplicação excêntrica da força nas JSS, devido à geometria não simétrica deste tipo de junta (Figura 36). Como tal, a formulação de Volkersen é mais representativa de uma JSD do que de uma JSS, dado que na JSD a flexão dos aderentes não é tão significativa como na JSS [50].

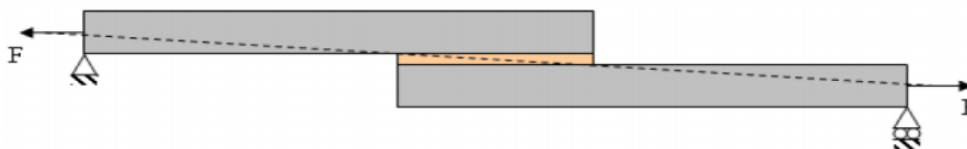


Figura 36 – Excentricidade do carregamento numa JSS [42].



Figura 37 – Tensão  $\sigma_y$  devido à excentricidade do carregamento numa JSS [42].

A excentricidade, por sua vez, introduz momentos flectores nos aderentes que conduzem ao aparecimento de deformações de flexão nos aderentes (Figura 37).

### 2.3.1.3 Modelo de Goland & Reissner

Os primeiros a considerar os efeitos da rotação da junta foram Goland e Reissner [54]. Na Figura 38, as forças  $P$  não são colineares, o que provoca um momento fletor ( $M$ ). Os substratos flectem e a direcção da linha de carregamento é alterada devido à rotação da junta. Nestas condições, os deslocamentos deixam de ser proporcionais a  $P$ , o que significa que não há linearidade geométrica [32, 50].

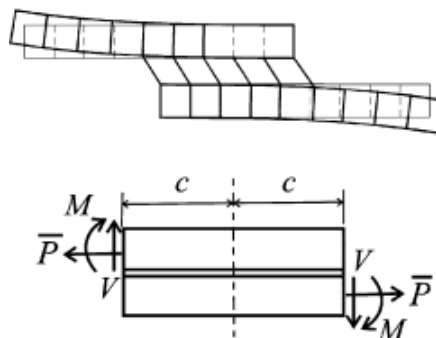


Figura 38 – Deformação da junta proposta por Goland e Reissner e diagrama de forças na zona de ligação [50].

Goland e Reissner [54] introduziram na análise um factor de momento flector ( $k$ ). Este factor relaciona o momento gerado no substrato no fim da sobreposição com  $P$ , de acordo com a expressão (3), onde  $\bar{P}$  é a força aplicada por unidade de largura [2, 50].

$$M = k \frac{\bar{P}t_s}{2} \quad (3)$$

A Figura 39 mostra graficamente o significado de  $k$  proposto por Goland e Reissner. Se  $P$  for muito pequena a linha de carregamento passa próximo do limite dos substratos, de tal modo que não há rotação da junta e  $k$  é aproximadamente igual a 1. À medida que  $P$  aumenta, observa-se a rotação progressiva da zona da sobreposição, ficando a linha de acção da carga mais próxima do centro dos substratos, reduzindo assim  $M$  [2].

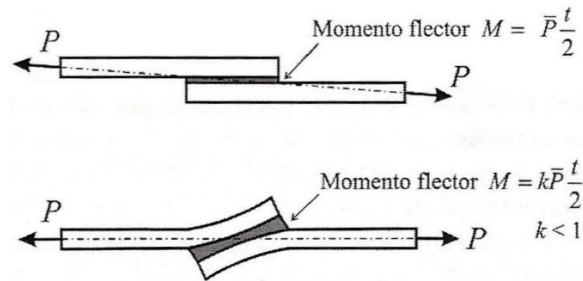


Figura 39 – Representação geométrica de  $k$  proposto por Goland e Reissner [2].

A distribuição da tensão  $\tau_{xy}$  pela análise de Goland e Reissner é muito semelhante à de Volkersen. No entanto, esta análise também permite a obtenção da tensão  $\sigma_y$  no adesivo [2, 32], conforme mostrado na Figura 40.



Figura 40 – Tensões  $\sigma_y$  numa JSS [2].

### 2.3.1.4 Modelo de Hart-Smith

Nas análises descritas apenas foram considerados materiais com comportamento elástico. Contudo, o adesivo e os substratos podem deformar-se plasticamente. Hart-Smith [55] teve em conta este aspecto e desenvolveu os modelos de Volkersen, e Goland e Reissner, tendo em conta o comportamento plástico do adesivo [32].

Hart-Smith considerou o efeito de grandes deslocamentos e a deformação individual dos dois substratos no valor de  $L_0$ , e também não negligenciando  $t_A$ . As variações das tensões no adesivo ao longo da espessura, especialmente na interface aderente/adesivo, são importantes quando a rotura ocorre perto destas interfaces. O adesivo é então modelado como sendo elasto-plástico (Figura 41), com uma área circunscrita à curva tensão-deformação idealizada igual à área da curva real, com a mesma tensão e deformação de rotura [50].

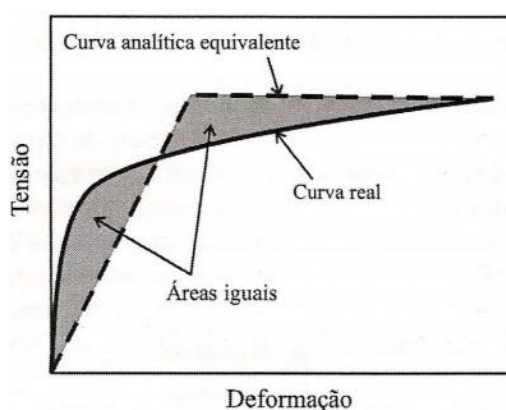


Figura 41 – Representação elasto-plástica do adesivo [2].

Hart-Smith demonstrou que a plasticidade do adesivo aumenta a resistência de uma junta em relação a uma análise elástica. Um adesivo dúctil cede plasticamente e pode suportar uma força adicional até atingir a sua deformação de rotura, redistribuindo e reduzindo os picos de deformação de corte (Figura 42). Esta abordagem permite que seja efectuada uma melhor previsão do comportamento mecânico de juntas com adesivos dúcteis [32, 50].

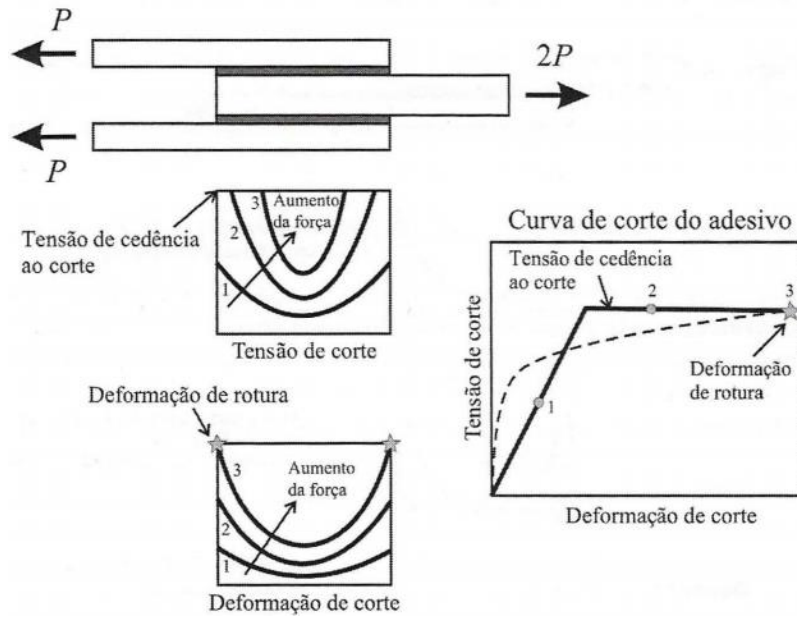


Figura 42 – Explicação esquemática de  $\tau_{xy}$ , segundo Hart-Smith [2].

Outro aspecto fundamental do trabalho de Hart-Smith é o mecanismo de transferência de carga [56]. A intensidade da carga não é transferida uniformemente ao longo do adesivo já que a grande maioria da carga é transmitida pelas extremidades da ligação, enquanto a zona elástica intermédia corresponde a uma menor intensidade de carga (Figura 43).

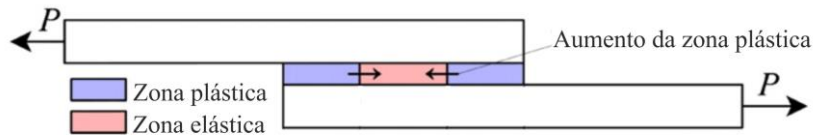


Figura 43 – Modelo elasto-plástico de Hart-Smith [57].

Assim, tendo em conta estes factores, Hart-Smith apresentou a expressão (4) como alternativa para o factor de correcção do momento flector de Goland e Reissner [50], em que  $D$  é a rigidez de flexão do aderente e  $\xi^2$  é obtido pela expressão (5).

$$k = \left(1 + \frac{t_A}{t}\right) \frac{1}{1 + \xi c + \frac{1}{6}(\xi c)^2}, \quad (4)$$

$$\xi^2 = \frac{\bar{P}}{D}. \quad (5)$$

### 2.3.1.5 Tensão de Cedência Generalizada

Adams [58] propôs um modelo simples que prevê a cedência global do adesivo e dos substratos. Considerando a cedência dos substratos, por este modelo é atingido um patamar constante para um determinado valor de  $L_0$ , correspondendo à cedência do substrato (Figura 44), permitindo prever facilmente a resistência da junta. Por outro lado, a força máxima ( $P_{\text{máx}}$ ) suportada pela junta adesiva, com aderentes elásticos, corresponde à plastificação total do adesivo, e é dada por

$$P_{\text{máx}} = \tau_y b l, \quad (6)$$

onde  $\tau_y$  é a tensão de cedência do adesivo. A maioria dos adesivos epóxicos estruturais não apresenta uma ductilidade suficiente para que a cedência completa da camada de adesivo ocorra antes da rotura. Nestes casos, o critério apresentado não é o mais adequado e é sugerido o uso do MEF ou de soluções analíticas mais complexas.

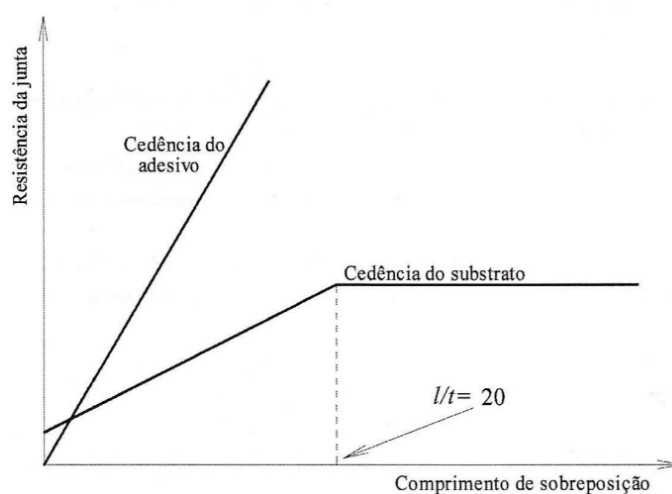


Figura 44 – Método de previsão da resistência de juntas sugerido por Adams, baseado na cedência do adesivo e do substrato [2].

### 2.3.1.6 Outras análises considerando o comportamento linear elástico

Oplinger [59] procurou solucionar as deficiências do modelo de Goland e Reissner usado para descrever as deformações de flexão da parte central da junta. Para tal, usou uma teoria clássica de vigas homogêneas sem deformações de corte ou deformações normais à espessura. Concluiu-se que muitos dos resultados obtidos eram similares às previsões de Goland e Reissner para uma grande diferença entre espessura de aderente e espessura da

camada adesiva. Por outro lado, foram encontradas diferenças significativas para aderentes relativamente finos.

Tsai et al. [60] mostraram que a solução fornecida por Oplinger apenas é válida se forem consideradas camadas finas de adesivos flexíveis.

Zhao [61] desenvolveu uma forma similar mas mais simples de determinar o  $k$ , dado pela expressão (7), que é preciso para aderentes rígidos e espessos. Contudo, o modelo proposto apresenta limitações para valores de  $L_0$  reduzidos

$$k = \frac{1}{1 + \xi c}. \quad (7)$$

Gilibert e Rigolot [62] desenvolveram uma teoria elástica, considerando variações lineares das tensões ao longo da espessura do adesivo da camada adesiva. Considerou-se uma formulação analítica do campo de tensão ao longo de  $L_0$ , e para o efeito utilizou-se um método de expansão assintótica na vizinhança das extremidades do conjunto. A formulação constitui uma melhoria na modelação do campo de tensões perto das juntas.

Ojalvo e Eidinoff [63] foram os primeiros a considerar a existência de um gradiente de tensões ao longo da espessura da camada do adesivo, admitindo distribuições lineares de tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  através da espessura da camada do adesivo.

Tong [64] desenvolveu formulações lineares e não lineares para as tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  de juntas adesivas, onde se demonstrou que as cargas de rotura previstas pelo modelo não linear estavam de acordo com as cargas de rotura experimentais, enquanto as fornecidas pelo modelo linear foram apenas cerca de metade destas.

Luo e Tong [65] apresentaram soluções com exactidão para a previsão dos momentos nas extremidades e das tensões no adesivo para uma JSS isotrópica. Este estudo foi baseado no uso da teoria de vigas de Euler-Bernoulli.

### **2.3.2 Mecânica da fractura**

A mecânica dos meios contínuos não dá solução a casos específicos como a existência de defeitos ou materiais com cantos e reentrâncias, que resultam em singularidades de tensão

ou deformação, pois assume que a estrutura e o seu material são contínuos. Na mecânica da fractura assume-se que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo conter defeitos causados pelo próprio processo de fabrico ou de outras origens. O objectivo é saber se os defeitos existentes serão susceptíveis de causar a rotura catastrófica ou se, durante o período de vida da estrutura, as suas dimensões se mantêm inferiores às críticas, embora se possam propagar de uma forma estável. Os materiais podem conter defeitos de vários tipos como fendas, falhas, descolagens e delaminagens. Estes defeitos locais podem fazer com que as tensões e as deformações locais existentes possam ser susceptíveis de dar início à propagação de tais defeitos, causando a rotura do componente [44]. Assim, em vez de uma análise local das tensões, teoricamente infinitas na extremidade de uma fenda, a mecânica da fractura avalia se as fendas existentes na estrutura são susceptíveis de induzir a rotura [2].

Uma fenda pode propagar-se em três modos distintos (Figura 45). O Modo I representa o modo de abertura, e os Modos II e III são os modos de corte. No Modo II as superfícies da fenda têm movimento relativo perpendicular à frente de fenda, enquanto no Modo III o movimento é paralelo à frente de fenda. Geralmente a rotura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tracção e corte, e também pelo efeito induzido pelos substratos no adesivo [66].

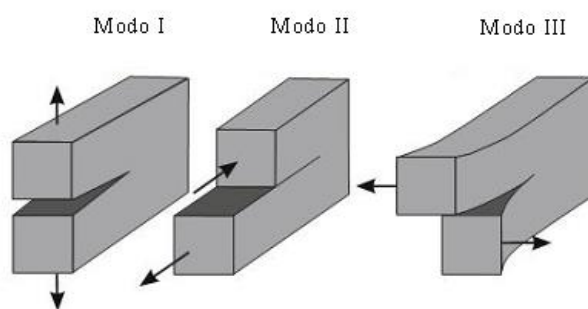


Figura 45 – Modos de propagação de uma fenda [67].

Os princípios básicos da Mecânica da Fractura devem-se ao trabalho pioneiro de Griffith [68], que estudou a fractura em diversos materiais, concluindo que todos os corpos apresentam defeitos e que a fractura ocorre a partir do defeito mais crítico. Griffith estabeleceu que a propagação de um defeito interno, devido à solitação aplicada, ocorrerá quando a energia disponível na extremidade desse defeito igualar a energia necessária à propagação da fenda, que é uma propriedade do material [2]. Nos últimos anos, a mecânica da fractura tem sido aplicada com sucesso a muitos problemas de engenharia. Muitos dos

estudos realizados com juntas adesivas usam a taxa de libertação de energia,  $G_t$ , e a respectiva taxa crítica ou resistência à fractura,  $G_c$  [69], em vez de usarem factores de intensidade de tensão, por estes não serem facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na proximidade.

O conceito de superfície de fractura (ou envelope de fractura) permite estimar a rotura em modo misto em função das componentes da tenacidade, em tracção e corte. Tendo por objectivo ajustar os resultados experimentais, várias funções matemáticas têm sido propostas, como é o caso do critério tridimensional (3D) [70] descrito pela expressão (8)

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^\alpha + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^\beta + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIC}}\right)^\gamma = 1. \quad (8)$$

Da expressão,  $G_I$ ,  $G_{II}$  e  $G_{III}$  correspondem aos valores actuais de  $G_t$  sob tracção pura, deslizamento e rasgamento, respectivamente e  $G_{IC}$ ,  $G_{IIC}$  e  $G_{IIIC}$  correspondem aos valores críticos correspondentes. Os valores de  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  variam de acordo com o critério usado. O critério linear energético assume que  $\alpha = \beta = \gamma = 1$  e o critério quadrático admite que  $\alpha = \beta = \gamma = 2$ . A escolha do critério será feita de forma a ajustar os resultados experimentais da melhor forma. Independentemente do tipo de caso, o envelope da fractura pode ser ajustado para corresponder aos resultados experimentais de forma precisa, através de constantes adicionais. O uso de um factor generalizado de intensidade de tensão, semelhante ao factor de intensidade de tensão usado na mecânica da fractura, inicialmente desenvolvido por Irwin [14], é um factor de escala que representa a alteração do estado de tensão na vizinhança da extremidade da fenda, permitindo desta forma que as tensões se mantenham finitas. Este factor tem sido investigado em juntas de sobreposição para prever o início da ocorrência de fractura nas extremidades da interface entre adesivo e aderentes [71].

Perante materiais que se deformam plasticamente, os conceitos da Mecânica da Fractura Linear Elástica (MFLE) têm de ser estendidos para a mecânica da fractura elasto-plástica. Neste âmbito, têm sido usadas abordagens para resolver estes problemas baseadas na mecânica da fractura elasto-plástica, como o integral  $J$  desenvolvido por Rice e Rosengren [72], na previsão de resistência de juntas adesivas com propagação de dano. Embora o integral  $J$  seja usado por diversos pesquisadores para prever a resistências de juntas adesivas, para adesivos dúcteis os valores críticos não são independentes da geometria da junta. Para

uma junta adesiva, foi comprovado que o integral  $J$  depende do comprimento da interface [73].

### 2.3.3 Modelos de dano coesivo

A implementação computacional de métodos com base em MFLE foi conseguida com grande sucesso há algumas décadas. Contudo, estes eram limitados a comportamentos elásticos na proximidade da fenda. Estes métodos também são dependentes da existência de um defeito inicial e do comprimento característico. É também de referir que o local da iniciação do dano em muitas aplicações não é evidente, nem o comprimento do dano é fácil de determinar [44]. Além disso, os adesivos modificados mais recentes, quando estão sob carga desenvolvem zonas plásticas que podem chegar a ser maiores do que a espessura dos aderentes [74].

Nos finais dos anos 50 e inícios dos anos 60 [75] foram desenvolvidos os MDC que descrevem o dano existente sob o efeito de cargas estáticas, onde ocorre o processo coesivo, promovendo a iniciação e propagação de fendas. Os MDC foram desde então amplamente testados para simular a iniciação e propagação de danos em problemas de rotura coesiva, interfacial ou delaminagens em compósitos.

A previsão da rotura por MDC consiste essencialmente na combinação de elementos sólidos com elementos coesivos [76]. Estes elementos possuem a particularidade de poderem ser facilmente incorporados em *softwares* de análise de MEF convencionais, possibilitando a modelação do comportamento da fractura em vários materiais [74].

O principal conceito do modelo é introduzir artificialmente uma ou várias interfaces / regiões de fractura em estruturas, onde é permitido o crescimento do dano recorrendo à introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. Isto é possível pela definição de leis de tracção-separação (leis coesivas) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são estabelecidas entre nós homólogos de elementos coesivos, podendo ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos (abordagem local) [77], ou podem ser aplicadas directamente entre dois materiais que não estejam em contacto para simular uma camada fina, como por exemplo para simular uma ligação adesiva (abordagem contínua) [78], representado na Figura 46.

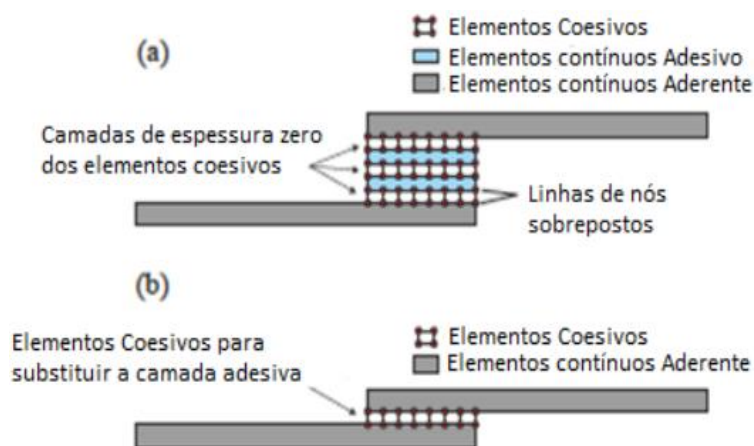


Figura 46 - Elementos coesivos para a) simular caminhos de rotura com espessura nula: aproximação local e b) a modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua [79].

Os MDC fornecem uma reprodução macroscópica do dano pela resposta do deslocamento relativo à tracção entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda [80] e baseiam-se em parâmetros que regem o processo de crescimento da fenda como as energias da fractura. A evolução da tensão e respectivo amaciamento é modelada até à rotura, descrevendo a degradação gradual das propriedades dos materiais. As leis de tracção-separação em cada uma das fases de carregamento são tipicamente construídas por relações lineares, embora uma ou mais fases possa ser definida de maneira diferente para representar de uma forma mais precisa o comportamento de materiais [81].

### 2.3.3.1 Modelo de dano triangular

O uso de MDC na análise de juntas adesivas requer uma lei constitutiva para descrever o comportamento elasto-plástico da camada de adesivo. Podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de modo a obter resultados mais precisos, em função do comportamento do tipo de material ou da interface em simulação [82]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o modelo triangular [83], o linear-parabólico [84], o exponencial [85], o polinomial [86] e o trapezoidal [87]. Devido a vários factores, tais como a simplicidade, reduzido número de parâmetros a determinar e resultados precisos para a maioria das condições reais, a lei triangular é a mais usada [88].

O modelo de dano triangular pode ser do tipo bidimensional (2D) ou 3D. No modelo triangular 2D são distinguidos dois modos, o puro e o misto (Figura 47), onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro e a lei de menores dimensões representa

a lei em modo misto. O modo puro divide-se em modo I, onde a fenda abre por esforços de tracção, e em modo II, onde a fenda desliza por esforços de corte [89]. O modo puro é caracterizado por a propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões são anuladas na lei coesiva respectiva. Em modo misto, os modos I e II actuam simultaneamente, e são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar os esforços de tracção e corte [66].

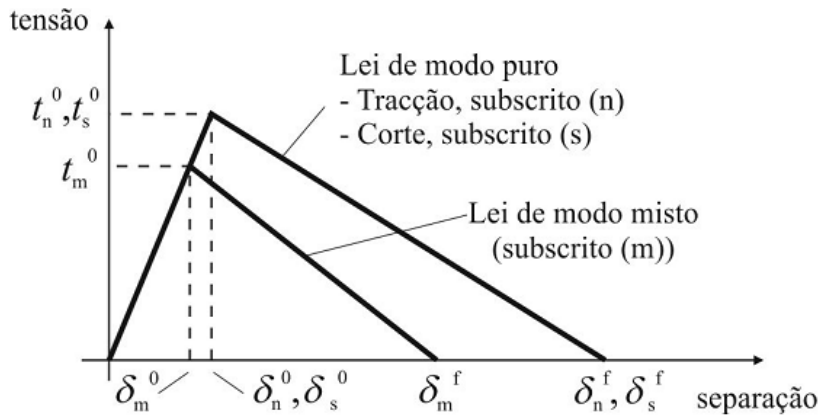


Figura 47 – MDC triangular [44].

Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz  $\mathbf{K}_{\text{COH}}$  (9), que relaciona as tensões e deformações em tracção e corte nos elementos coesivos. A matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição está dependente da formulação utilizada

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{\text{COH}} \varepsilon. \quad (9)$$

No caso de a formulação ser local, os elementos coesivos são usados para simular fracturas de espessura nula. Nestas condições, os parâmetros de  $\mathbf{K}_{\text{COH}}$  possuem valores extremamente elevados, tendo por finalidade não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [90]. Na formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para as ligações adesivas, obtém-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo a equação (10), onde  $G$  é o módulo de elasticidade transversal

$$K_{nn} = E, K_{ss} = G, K_{ns} = 0. \quad (10)$$

Considerando esses parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [66]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério da tensão nominal quadrática, expresso pela expressão (11)

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1. \quad (11)$$

$\langle \rangle$  são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. A evolução do dano descreve a taxa de degradação da rigidez do material após a iniciação do dano.

Depois de atingida a resistência máxima em modo misto ( $t_m^0$  na Figura 47), a rigidez do material é degradada. A separação completa de um par de nós homólogos,  $\delta_m^f$ , é prevista por um critério linear energético, definido pela equação (12), em função dos valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  [91]

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (12)$$

### 2.3.4 Mecânica do dano

As técnicas de modelação avançadas, que são as técnicas mais utilizadas actualmente, garantem previsões de rotura precisas e permitem superar as limitações dos métodos descritos anteriormente. A simulação pelo MEF, baseada na utilização de elementos de sólidos contínuos, prevê de forma errada que os elementos sofrem plasticidade generalizada sem evolução do dano, enquanto os modelos da mecânica do dano podem induzir dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Como resultado, passa a ser possível a simulação gradual do dano e da fractura de uma fenda, com trajectória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [92]. Na mecânica do dano é estabelecido um parâmetro de dano com o intuito de modificar a resposta constitutiva dos materiais através da depreciação da resistência ou rigidez, por exemplo para camadas de adesivo [93], ou delaminagens ou rotura na matriz em materiais compósitos [94], para modelar o dano durante o carregamento.

A variável de dano pode ser utilizada numa lei de evolução de dano com o objectivo de modelar o dano antes da iniciação da fenda e durante o seu crescimento. As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos: (1) variáveis que modelam o dano através da redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, embora estas não estejam directamente relacionadas com o mecanismo de dano, e (2) variáveis relacionadas com a definição física de um tipo específico de dano, tais como a dimensão das porosidades ou área relativa de micro cavidades [95].

O crescimento do dano define-se em função da carga para análises estáticas [96] ou número de ciclos para análises de fadiga [97, 98]. Neste campo, as publicações existentes para juntas adesivas são muito reduzidas. Embora possam fornecer as bases para a análise preditiva [93], as técnicas da mecânica do dano para a fadiga, quando comparadas com os MDC, não apresentam uma distinção clara entre as fases de início e propagação o dano. No entanto, é possível simular a evolução do dano antes do crescimento da macro fractura. Por outro lado, através do MDC a modelação do dano à fadiga restringe-se a caminhos pré-definidos da fenda e, em aplicações específicas, pode ser recomendada a mecânica do dano se o dano for mais generalizado ou o se caminho de rotura não for conhecido [99].

### 2.3.5 Método dos Elementos Finitos Extendido

De um modo geral, o MEF-E consiste numa modificação da formulação do MEF tendo por objectivo a análise do crescimento do dano em meios contínuos. Este método também utiliza leis de dano para a previsão da fractura, baseadas na resistência dos materiais para a iniciação do dano e na deformação para a previsão da rotura (definido por  $G_{IC}$ ), em vez de usar os valores de  $t_n^0 / t_s^0$  ou  $\delta_n^0 / \delta_s^0$  utilizados nos MDC.

Com o MEF-E não é obrigatório que a fenda siga um caminho pré-definido, o que é uma vantagem em comparação com os MDC. A fenda propaga-se de forma livre no interior do material, sem ser necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades, nem haver a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda durante a análise [100]. As características fundamentais do MEF-E foram inicialmente apresentados no final dos anos 90 por Belytschko e Black [101].

O conceito deste método é baseado no conceito da partição da unidade e pode ser implementado no MEF tradicional, através da introdução de funções de enriquecimento

locais aplicadas aos deslocamentos nodais perto da extremidade da fenda, o que possibilita o seu crescimento e a separação progressiva entre as faces da fenda [102]. Durante o crescimento da fenda, a sua extremidade muda continuamente de posição e orientação em função das condições de carga e da geometria da estrutura, simultaneamente com a criação das funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na proximidade da fenda.

O MEFE considera inicialmente o comportamento linear elástico dos materiais, representado por uma matriz constitutiva elástica, que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados através de critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasma e reais de elementos fracturados. Quanto aos critérios de iniciação de dano, podem depender por exemplo das tensões principais máximas (MAXPS) ou das deformações principais máximas (MAXPE), enquanto as leis tracção-separação que simulam a degradação dos materiais até à fractura podem ser lineares ou exponenciais. A iniciação do dano pode ser avaliada por diferentes critérios. Os critérios MAXPS e MAXPE são baseados nas funções de dano da expressão (13), respectivamente [103], onde  $\sigma_{\max}$  é a tensão principal máxima actual num dado ponto de integração e  $\sigma_{\max}^0$  é a resistência à tracção do material.

$$f = \left\{ \frac{\langle \sigma_{\max} \rangle}{\sigma_{\max}^0} \right\} \quad \text{e} \quad f = \left\{ \frac{\langle \varepsilon_{\max} \rangle}{\varepsilon_{\max}^0} \right\}. \quad (13)$$

A interpretação dos parêntesis de Macaulay é idêntica à da expressão (11) e é usada para especificar que uma tensão compressiva não induz dano. O critério de tensão nominal máxima (MAXS) e o critério de deformação nominal máxima (MAXE) são dados pela expressão (14), respectivamente [103], onde  $t_n$  e  $t_s$  são as componentes de tensão normal e ao corte da superfície facturada,  $t_s^0$  e  $t_n^0$  são os respectivos valores limites

$$f = \max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0} \right\} \quad \text{e} \quad f = \max \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0}, \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\}. \quad (14)$$

Os parâmetros referentes ao critério MAXE têm um significado idêntico, onde  $\varepsilon_n$  e  $\varepsilon_s$  são as componentes de deformação normal e ao corte,  $\varepsilon_n^0$  e  $\varepsilon_s^0$  são os devidos valores limites. De elevada importância são os dois critérios de seguida mencionados, o critério quadrático de

tensão (QUADS) e o critério quadrático de deformação (QUADE), dados pelas funções da expressão (15), respectivamente [103]

$$f = \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 \quad \text{e} \quad f = \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\}^2. \quad (15)$$

Todos os critérios mencionados prevêm o início do dano quando o valor de  $f$  atingir a unidade. O crescimento do dano é baseado na incorporação de funções de enriquecimento na formulação convencional de MEF, permitindo modelar o salto dos deslocamentos que existe entre as faces da fenda durante a propagação do dano.

A expressão fundamental do vector de deslocamentos  $\mathbf{u}$ , incluindo o enriquecimento dos deslocamentos [91], é dada por (16)

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^N N_i(x) [\mathbf{u}_i + H(x)\mathbf{a}_i]. \quad (16)$$

$N_i(x)$  e  $\mathbf{u}_i$  estão relacionados com a componente convencional de MEF e correspondem pela respectiva ordem às funções de interpolação e ao vector de deslocamentos nodais. O termo  $H(x)\mathbf{a}_i$  apenas está activo para os nós nos quais alguma função de forma é cortada pela fenda, podendo ser expresso pelo produto do vector dos graus de liberdade nodais enriquecidos, incluindo os nós mencionados,  $\mathbf{a}_i$ , com as funções de forma descontínuas associadas,  $H(x)$ , nas superfícies da fenda.

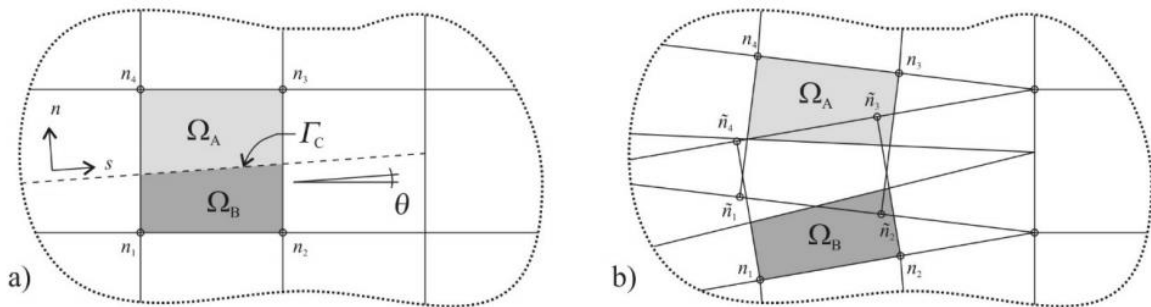


Figura 48 – Propagação do dano no MEF usando o conceito de nós fantasmas antes (a) e depois (b) da repartição de elementos fracturados em subelementos [104].

O método é baseado no estabelecimento de nós fantasmas, que subdividem os elementos interceptados por uma fenda e simulam a separação entre os subelementos criados. A

propagação da fenda é possível pelo uso de nós fantasmas, que inicialmente têm as mesmas coordenadas que os nós reais e que estão sobrepostos aos nós reais até à iniciação do dano. Após o elemento ter sido interceptado por uma fenda, este é dividido em dois subdomínios. A descontinuidade nos elementos é tornada possível pela adição de nós fantasmas sobrepostos aos nós originais (Figura 48). Quando um elemento fractura, cada um dos dois subelementos vai ser formado pelos nós reais (aqueles correspondentes à parte fracturada) e nós fantasmas (aqueles que já não pertencem à parte respectiva do elemento original). Estes dois subelementos têm campos de deslocamentos completamente independentes e substituem o elemento original. A partir deste ponto, cada par de nó real/fantasma do elemento fracturado separa até à rotura, de acordo com uma lei. Neste ponto os nós reais e fantasmas ficam livres de se mover sem restrições, simulando assim o crescimento do dano.

# 3 Trabalho experimental

No presente capítulo é feita uma exposição detalhada dos materiais utilizados para a realização do trabalho experimental bem como todo o processo inerente à sua concretização. É descrito o processo de fabrico das juntas adesivas desde a preparação das superfícies até à preparação final dos provetes, passando pela colagem dos substratos. De seguida procede-se à descrição dos ensaios realizados, analisando os resultados obtidos para os modos de rotura, curvas força-deslocamento ( $P-\delta$ ) e resistência das juntas.

## 3.1 Materiais utilizados

Todos os materiais usados no trabalho experimental, nomeadamente os substratos e os adesivos, são apresentados e descritos neste subcapítulo. É efectuada uma análise pormenorizada das propriedades mecânicas mais relevantes para o desenvolvimento deste trabalho, permitindo o posterior tratamento de dados na obtenção de resultados.

### 3.1.1 Substratos

O material escolhido como substrato de todas as juntas é a liga de alumínio AW6082 T651. Esta liga é conseguida através de envelhecimento artificial a uma temperatura de 180°C.

Tabela 3 – Propriedades da liga de alumínio AW6082 T651 [105].

Resistência à tração	Módulo de Young	Tensão de cedência	Deformação de rotura
324,00 ± 0,16 (MPa)	70,07 ± 0,83 (GPa)	261,67 ± 7,65 (MPa)	21,70 ± 4,24 (%)

A escolha deste material recai nas suas boas propriedades mecânicas e no variado leque de aplicações estruturais, quer em formas extrudidas quer em formas laminadas. A caracterização desta liga foi efectuada em trabalhos prévios [105] onde foram definidas as propriedades apresentadas na Tabela 3. As curvas de tensão-deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) deste material estão apresentadas na Figura 49.

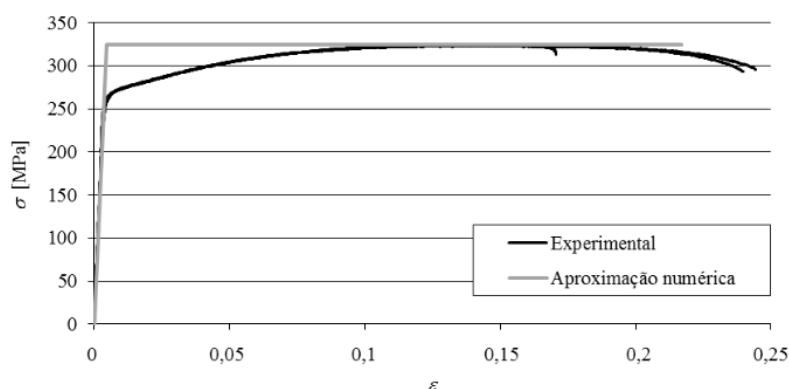


Figura 49 – Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  da liga de alumínio AW6082 T651 e respectiva aproximação numérica [106].

### 3.1.2 Adesivos

Por forma a promover a união entre os substratos foram seleccionados três tipos de adesivos para as JSS: Araldite<sup>®</sup> AV138 (adesivo epóxico frágil), Araldite<sup>®</sup> 2015 (adesivo epóxico dúctil), e SikaForce<sup>®</sup> 7888 (adesivo poliuretano estrutural, combina alta ductilidade e resistência mecânica).

#### 3.1.2.1 Araldite<sup>®</sup> AV138

O adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 (Figura 50) descreve-se como um adesivo epóxico frágil mas de elevada resistência, adequado para ligar materiais de famílias diferentes como por exemplo metais, compósitos e os polímeros [107].

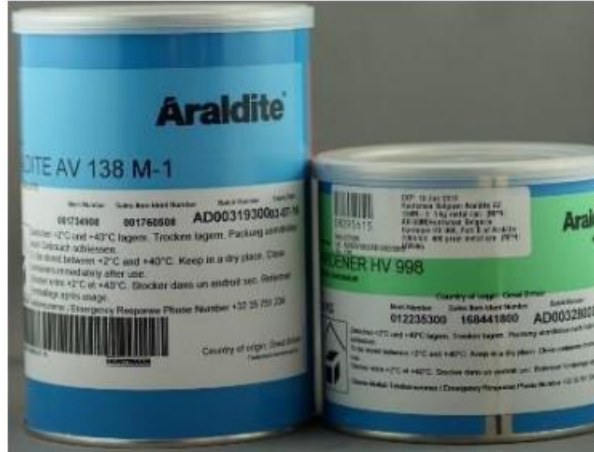


Figura 50 - Adesivo Araldite® AV138.

As curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  experimentais de provetes maciços ensaiados à tracção para este adesivo são dadas na Figura 51 [107].

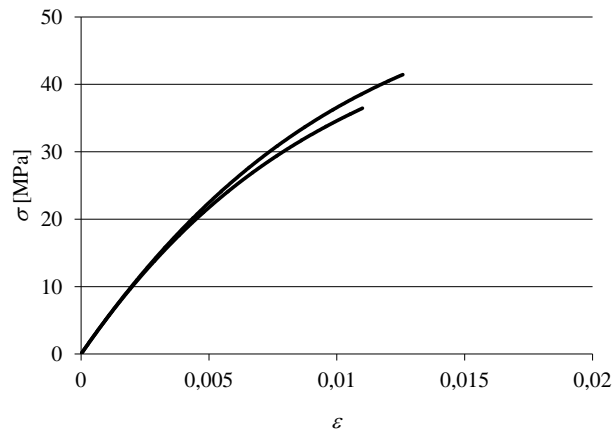


Figura 51 – Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  do adesivo Araldite® AV138 [108].

Na Tabela 4 estão apresentadas as principais propriedades mecânicas e de fractura do Araldite® AV138, onde <sup>a</sup> são valores estimados em [44] e <sup>b</sup> são valores obtidos do fabricante.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do Araldite® AV138 [109].

<b>Módulo de Young, <math>E</math></b>	$4,89 \pm 0,81$	<b>(GPa)</b>
<b>Coefficiente de Poisson, <math>\nu^b</math></b>	0,35	-
<b>Tensão de cedência à tracção, <math>\sigma_y</math></b>	$36,49 \pm 2,47$	<b>(MPa)</b>
<b>Tensão de rotura à tracção, <math>\sigma_f</math></b>	$39,45 \pm 3,18$	<b>(MPa)</b>
<b>Deformação de rotura à tracção, <math>\varepsilon_f</math></b>	$1,21 \pm 0,10$	<b>(%)</b>
<b>Módulo de elasticidade transversal, <math>G</math></b>	$1,56 \pm 0,01$	<b>(GPa)</b>
<b>Tensão de cedência ao corte, <math>\tau_y</math></b>	$25,10 \pm 0,33$	<b>(MPa)</b>
<b>Tensão de rotura ao corte, <math>\tau_f</math></b>	$30,20 \pm 0,40$	<b>(MPa)</b>
<b>Deformação de rotura ao corte, <math>\gamma_f</math></b>	$7,80 \pm 0,70$	<b>(%)</b>
<b>Tenacidade à tracção, <math>G_{IC}</math></b>	0,20 <sup>a</sup>	<b>(N/mm)</b>
<b>Tenacidade ao corte, <math>G_{IIC}</math></b>	0,38 <sup>a</sup>	<b>(N/mm)</b>

### 3.1.2.2 Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 define-se como um adesivo epóxico estrutural de duas partes (Figura 52), de ductilidade moderada mas que, comparando com o adesivo Araldite® AV138, oferece uma resistência à tracção e corte inferiores. No entanto, por ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentração tipicamente nas extremidades das juntas, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes [107].



Figura 52 – Adesivo Araldite® 2015.

Na Figura 53 estão apresentadas curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  experimentais de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [107].

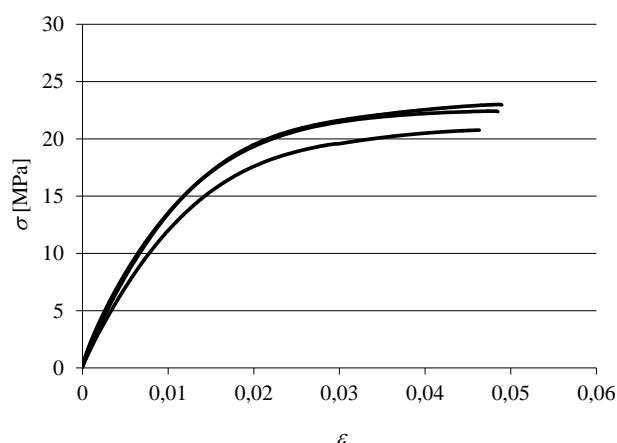


Figura 53 - Curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  do adesivo Araldite® 2015 [107].

Na Tabela 5 estão apresentadas as propriedades mecânicas e de fractura do Araldite® 2015 mais relevantes, em que <sup>a</sup> são valores obtidos do fabricante.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas do Araldite® 2015 [107].

<b>Módulo de Young, <math>E</math></b>	1,85 ± 0,21	<b>(GPa)</b>
<b>Coefficiente de Poisson, <math>\nu^a</math></b>	0,33	-
<b>Tensão de cedência à tracção, <math>\sigma_y</math></b>	12,63 ± 0,61	<b>(MPa)</b>
<b>Tensão de rotura à tracção, <math>\sigma_f</math></b>	21,63 ± 1,61	<b>(MPa)</b>
<b>Deformação de rotura à tracção, <math>\varepsilon_f</math></b>	4,77 ± 0,15	<b>(%)</b>
<b>Módulo de elasticidade transversal, <math>G</math></b>	0,56 ± 0,21	<b>(GPa)</b>
<b>Tensão de cedência ao corte, <math>\tau_y</math></b>	14,60 ± 1,30	<b>(MPa)</b>
<b>Tensão de rotura ao corte, <math>\tau_f</math></b>	17,90 ± 1,80	<b>(MPa)</b>
<b>Deformação de rotura ao corte, <math>\gamma_f</math></b>	43,90 ± 3,40	<b>(%)</b>
<b>Tenacidade à tracção, <math>G_{IC}</math></b>	0,43 ± 0,02	<b>(N/mm)</b>
<b>Tenacidade ao corte, <math>G_{IIC}</math></b>	4,70 ± 0,34	<b>(N/mm)</b>

Comparando os valores da Tabela 5 com os valores da Tabela 4, verifica-se que a deformação de rotura ao corte do adesivo Araldite® 2015 é quase seis vezes superior ao valor apresentado para o adesivo Araldite® 2015. No entanto, a tensão de rotura ao corte do adesivo Araldite® AV138 é praticamente o dobro da registada para o adesivo Araldite® 2015.

### 3.1.2.3 SikaForce® 7888

O SikaForce® 7888 é um adesivo estrutural de base poliuretano de alta resistência e ductilidade. O adesivo é composto por dois componentes (Figura 54) e o seu processo de cura ocorre à temperatura ambiente durante cerca de 24 horas [34]. Este adesivo faz parte de

uma nova geração de adesivos que combinam a elevada resistência dos epóxicos com a capacidade de deformação dos elastómeros. Estas características beneficiam bastante a sua resistência à fadiga [110].



Figura 54 – Adesivo SikaForce® 7888.

Na Figura 55 está apresentada uma curva  $\sigma$ - $\epsilon$  representativa de ensaios efectuados de provetes maciços para o adesivo SikaForce® 7888 [44].

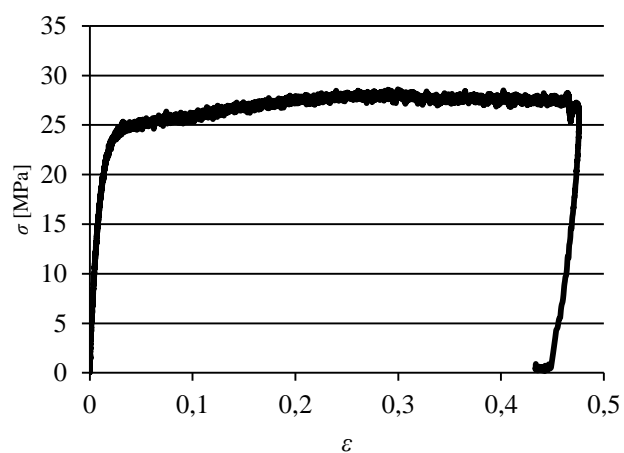


Figura 55 – Curva  $\sigma$ - $\epsilon$  do adesivo SikaForce® 7888 [44].

Na Tabela 6 estão apresentadas as principais propriedades mecânicas e de fractura do SikaForce® 7888, onde \* são valores do fabricante e <sup>a</sup> são valores estimados pela lei de Hooke.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7888 [44]

Módulo de <i>Young</i> , $E$	$1,89 \pm 0,81$	(GPa)
Coefficiente de <i>Poisson</i> , $\nu^a$	0,33*	-
Tensão de cedência à tracção, $\sigma_y$	$13,20 \pm 4,83$	(MPa)
Tensão de rotura à tracção, $\sigma_f$	$28,60 \pm 2,00$	(MPa)
Deformação de rotura à tracção, $\varepsilon_f$	$43,00 \pm 0,60$	(%)
Módulo de elasticidade transversal, $G$	0,727 <sup>a</sup>	(GPa)
Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$	-	(MPa)
Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$	20*	(MPa)
Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$	100*	(%)
Tenacidade à tracção, $G_{IC}$	1,18	(N/mm)
Tenacidade ao corte, $G_{IIC}$	8,72	(N/mm)

### 3.2 Geometria dos provetes

Definidos os materiais a utilizar e configuração de ensaio (JSS), apresentam-se na Figura 56 a geometria das juntas e as respectivas dimensões principais. Para a concretização dos ensaios experimentais foram propostos quatro valores de  $L_O$  entre 12,5 mm e 50 mm, com intervalos de 12,5 mm. Dado que estão a ser utilizados três adesivos, quatro valores de  $L_O$  e cinco provetes para cada configuração, será necessário fabricar sessenta provetes.

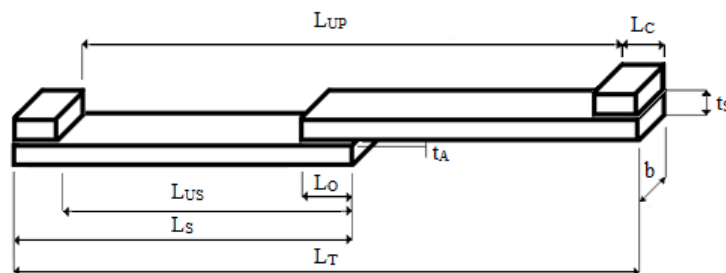


Figura 56 – Configuração e dimensões das JSS.

O valor de  $t_A$  considerado foi de 0,2 mm. O comprimento útil dos provetes ( $L_{UP}$ ) entre amarras é de 180 mm, o comprimento dos substratos ( $L_S$ ) é de 140 mm,  $b$  é de 25 mm e a  $t_S$  é igual a 3 mm. O comprimento útil dos substratos ( $L_{US}$ ) varia em função de  $L_O$  e  $L_{UP}$ . As dimensões dos provetes produzidos estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Dimensões dos provetes.

Comprimento de sobreposição	$L_O$	12,5	25	37,5	50	(mm)
Comprimento útil dos substratos	$L_{US}$	96,25	102,5	108,75	115	
Largura	$b$	25				
Espessura dos substratos	$t_S$	3				
Comprimento útil do provete	$L_{UP}$	180				
Comprimento dos substratos	$L_S$	140				
Espessura do adesivo	$t_A$	0,2				
Comprimento dos calços	$L_C$	25				

É importante referir que é necessária a utilização de calços para auxiliar o alinhamento dos provetes no equipamento de ensaio. Os calços têm um comprimento ( $L_C$ ) de 25 mm e  $b$  igual à dos provetes, para serem colados às extremidades dos corpos de prova, com o intuito de eliminar as excentricidades das condições de apoio [111].

### 3.3 Fabrico das juntas adesivas

A matéria-prima utilizada para os aderentes apresentou-se como barras de 3 m de comprimento e  $b$  igual a 25 mm, ou seja, com o valor de  $b$  final pretendido. As barras foram cortadas em provetes com 140 mm de comprimento numa guilhotina (Figura 57), obtendo-se assim o comprimento total de cada barra rectangular conforme indicado no subcapítulo anterior.



Figura 57 – Guilhotina utilizada para o corte das tiras de alumínio para o comprimento desejado dos substratos.

Após a obtenção dos cento e vinte aderentes rectangulares necessários à produção dos sessenta provetes, foram ainda cortados os calços de alinhamento. Todos os provetes foram sujeitos a uma primeira limpeza, prévia ao procedimento seguinte.

### 3.3.1 Preparação das superfícies

O início do processo de preparação das superfícies passou pela granalhagem das zonas de contacto do provete com o adesivo numa granalhadora “Cidblast” modelo RT6S (Figura 58). Esta etapa decorreu no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

A granalhagem, processo passivo mecânico, consiste na passagem de um jacto de partículas de areia ( $\text{SiO}_2$ ) através de uma pistola directamente sobre o provete (Figura 59), garantindo uma melhor preparação de toda a superfície em termos de uniformidade comparativamente ao processo de lixagem manual.



Figura 58 – Granalhadora Cidblast RT6S do LEM (ISEP).



Figura 59 – Processo de granalhagem dos substratos.

Este processo proporciona a fácil remoção da contaminação superficial dos provetes devido à dureza das partículas, promovendo uma adesão muito melhor pois a energia superficial é aumentada. O processo foi efectuado ao longo de um comprimento de um a dois terços do provete, consoante a área sujeita ao processo de colagem.

As superfícies granalhadas foram depois submetidas a um processo de limpeza (Figura 60). O processo de limpeza consiste em limpar os substratos com papel absorvente e acetona, (processo passivo químico), cujo objectivo é remover os pós resultantes da granalhagem. Como o principal benefício proporcionado pelo solvente é a forte volatilidade, os substratos são limpos e secam rapidamente, possibilitando a adesão quase imediatamente. Os substratos foram considerados limpos quando o papel embebido em acetona se apresentava limpo após fricção efectuada com pressão manual na superfície a limpar. Este é um processo simples de limpeza e não requer equipamentos especiais.

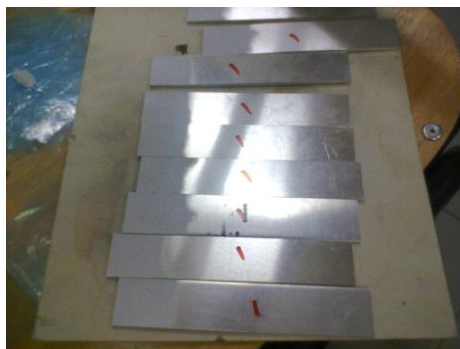


Figura 60 – Substratos após limpeza da superfície com acetona.

Durante o processo de limpeza o manuseamento foi efectuado com o devido cuidado para que as superfícies de colagem não fossem contaminadas, o que é indesejável neste procedimento por dificultar a aderência do adesivo [112, 113].

De modo a garantir o valor de  $t_A$  desejado, conforme mencionado no subcapítulo 3.2, foram utilizados fios de pesca cujo diâmetro é igual a  $t_A$ , e com um comprimento de aproximadamente quarenta milímetros. Colocaram-se os fios dois a dois em pedaços de fita-cola, cortada em tiras com aproximadamente cinquenta milímetros, com um espaçamento entre fios de aproximadamente dez milímetros. A fita-cola foi colada de seguida aos provetes com os fios de pesca inseridos entre dois e três milímetros na zona de sobreposição (Figura 61) para garantir a espessura necessária através da criação de uma barreira de 0,2 mm após posicionamento dos dois aderentes.



Figura 61 – Fita-cola com fios de pesca colada nos substratos de um provete.

O processo de colagem tem de ocorrer sem obstruções e de forma precisa. Para o efeito, todos os aderentes foram colocados sobre barras de apoio em madeira, mais largas do que os aderentes e alinhados a um dos lados da barra para garantir o seu alinhamento longitudinal. Foram usados grampos para imobilizar os aderentes, facilitando a posterior montagem da junta.

Foram colocadas tiras de Teflon<sup>®</sup> entre os aderentes e as barras de apoio (Figura 62), com o intuito de evitar que o excesso de adesivo aplicado promova a união dos provetes à barra de madeira. Desta forma, a remoção dos provetes após o procedimento de colagem torna-se uma tarefa mais fácil.



Figura 62 – Tiras de Teflon<sup>®</sup> entre substratos e barra de apoio.

### 3.3.2 Colagem dos substratos

Com os substratos alinhados, procedeu-se à aplicação manual dos respectivos adesivos à temperatura ambiente de  $20\pm 5$  °C. O adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 foi aplicado através de uma pistola de accionamento manual (Figura 63).



Figura 63 – Pistola de accionamento manual para aplicação do Araldite<sup>®</sup> 2015.

Os adesivos Araldite<sup>®</sup> AV138 e SikaForce<sup>®</sup> 7888 foram aplicados por intermédio de uma espátula e uma pistola de accionamento pneumático (Figura 64), respectivamente.



Figura 64 – Pistola de ar comprimido para aplicação do SikaForce<sup>®</sup> 7888.

Após aplicação do adesivo, os aderentes superiores foram posicionados e pressionados manualmente. De seguida, foram verificados individualmente para cada provete o valor de  $L_0$  e o alinhamento dos aderentes. Recorrendo a um paquímetro digital foi possível garantir o correcto posicionamento dos aderentes manualmente, devido à geometria rectangular, possibilitando o cumprimento dos diferentes valores de  $L_0$  pretendidos.

De modo a garantir as dimensões pretendidas durante o processo de cura, todos os provetes foram fixos e mantidos pressionados com grampos de fixação (Figura 65).



Figura 65 – Aspecto de um provete após posicionamento dos aderentes e fixação com grampos.

A cura completa dos adesivos seguiu as especificações do fabricante, ou seja, durante pelo menos 48 horas para os três adesivos, à temperatura ambiente.

Por segurança, considerou-se um tempo de cura de uma semana, após a qual se retiraram os grampos que serviram para garantir o correcto posicionamento dos aderentes no devido lugar. Retiraram-se os provetes das barras de apoio, que ficaram com o aspecto indicado na Figura 66 (um exemplo de cada tipo de adesivo, de baixo para cima: Araldite® 2015, Araldite® AV138 e SikaForce® 7888).



Figura 66 – Aspecto dos provetes após a cura.

### 3.3.3 Preparação dos provetes para ensaio

O procedimento da preparação dos provetes continuou com a remoção dos fios de pesca e da fita-cola, com a ajuda de um alicate. A remoção do excesso de adesivo foi o passo seguinte e decorreu nas Oficinas Mecânicas do ISEP com a ajuda de uma mó de desgaste aplicada numa furadora vertical. Foram tomadas as devidas precauções para que não houvesse aquecimento significativo dos provetes e consequente danificação, e foi tomado todo o cuidado para não danificar os aderentes. O aspecto dos provetes é apresentado na Figura 67.



Figura 67 – Aspecto de um provete após remoção do excesso de adesivo.

Conforme indicado no subcapítulo 3.2, é necessário colar calços aos aderentes para alinhar os provetes no equipamento de ensaio. O posicionamento dos calços nos provetes varia em função de  $L_0$  de modo a garantir um valor de  $L_{UP}$  igual a 180 mm. É possível ter uma noção do posicionamento dos calços nos provetes através da visualização da Figura 68 (valores de  $L_0$  desde 12,5 mm até 50 mm, da esquerda para a direita). Observa-se que, para manter constante o valor de  $L_{UP}$ , o posicionamento dos calços relativamente à extremidade livre dos substratos variou em função de  $L_0$ .

Cada provete foi numerado de um a cinco para os três tipos de adesivos de forma a identificá-los facilmente. Após o processo de colagem dos calços, os provetes foram deixados a curar à temperatura ambiente, durante um período de uma semana, até à realização dos ensaios.



Figura 68 – Localização dos calços nos provetes.

### 3.4 Ensaios realizados

Com a realização destes ensaios, pretende-se verificar qual a resistência das JSS. Para este efeito considerou-se o ensaio de tracção, uma vez que é um dos métodos mais utilizados quando se pretende caracterizar juntas adesivas. Trata-se de um ensaio simples e barato, para além de poder ser realizado em máquinas de ensaios convencionais.

#### 3.4.1 Caracterização do equipamento

A realização dos ensaios de tracção ocorreram no LEM do ISEP. Para tal, foi utilizada uma máquina servo-hidráulica universal da marca SHIMADZU Autograph modelo AG-X (Figura 69), equipada com uma célula de carga de 100 kN. Esta máquina está conectada a um computador externo provido de uma aplicação informática denominada TRAPEZIUM X que permite a aquisição e gravação dos dados do ensaio, resultando na obtenção de um ficheiro MS Excel<sup>®</sup> com os valores de  $P$  e  $(\delta)$ .



Figura 69 – Máquina universal Shimadzu AG-X.

#### 3.4.2 Metodologia do ensaio de tracção

Os ensaios foram realizados seguindo a Norma NP EN 10002 – 1:2006, à temperatura ambiente e a uma velocidade de 1,0 mm/min. Conforme referido anteriormente, foram

ensaiados cinco provetes para cada valor de  $L_0$ , correspondendo ao valor total de vinte juntas para cada adesivo testado.



Figura 70 – Posicionamento de um provete na máquina de tracção.

Para a realização dos ensaios de tracção, os provetes são fixos na máquina de ensaio e é aplicado um deslocamento a velocidade constante. O valor de  $P$  é medido durante o ensaio pela célula de carga. O alinhamento dos provetes no dispositivo de fixação foi controlado pelos calços de 25 mm de comprimento, resultando na disposição dos provetes na máquina de ensaio que se apresenta na Figura 70.

Como resultado final, obtiveram-se as curvas  $P-\delta$ , através das quais foi possível caracterizar resistência das juntas para as diferentes configurações e adesivos.

## 3.5 Resultados

Finalizados os ensaios, vários aspectos podem ser analisados. Neste subcapítulo serão descritos os modos de rotura, as curvas  $P-\delta$  e a resistência das JSS em função da geometria e tipo de adesivo.

### 3.5.1 Modos de rotura

É efectuada em primeiro lugar a análise dos modos de rotura obtidos após os ensaios de tracção. As superfícies de rotura dos provetes com o adesivo Araldite® AV138 estão

apresentadas na Figura 71, considerando-se uma rotura representativa para cada valor de  $L_0$  (12,5 mm, 25 mm, 37,5 mm e 50 mm da esquerda para a direita).

Nos provetes com o adesivo Araldite® AV138 observou-se a ocorrência de rotura coesiva em todos os vinte aderentes (Figura 71). É de referir que a rotura ocorreu muito próximo de uma das interfaces entre adesivo e substrato. Devido a este facto, na Figura 71 nota-se uma falta aparente de adesivo na zona da ligação.



Figura 71 – Superfícies de rotura do adesivo Araldite® AV138 para os diferentes valores de  $L_0$ .

É ainda possível observar, para todos os valores de  $L_0$ , ausência de deformação plástica dos aderentes. A ausência de deformação plástica pode ser observada na Figura 72 através da vista lateral de um provete com  $L_0=50$  mm.



Figura 72 – Vista lateral dos aderentes de uma junta colada com Araldite® AV138 para  $L_0=50$  mm.

As superfícies de rotura dos provetes relativos ao adesivo Araldite® 2015 estão apresentadas na Figura 73, onde foi considerada uma rotura representativa para cada valor de  $L_0$  (12,5 mm, 25 mm, 37,5 mm e 50 mm da esquerda para a direita). Tal como sucedeu nas juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, nas juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 ocorreu também uma rotura coesiva nos vinte provetes.



Figura 73 – Superfícies de rotura do adesivo Araldite® 2015 para os diferentes valores de  $L_0$ .

Dado que o adesivo Araldite® 2015 é mais dúctil do que o adesivo Araldite® AV138 e foram obtidos valores de  $P_{\text{máx}}$  superiores, observaram-se deformações plásticas para alguns valores de  $L_0$ . Analisando os provetes com  $L_0=12,5$  mm e 25 mm verificou-se que estes não sofreram deformação plástica, ao contrário do sucedido para  $L_0=37,5$  e 50 mm.

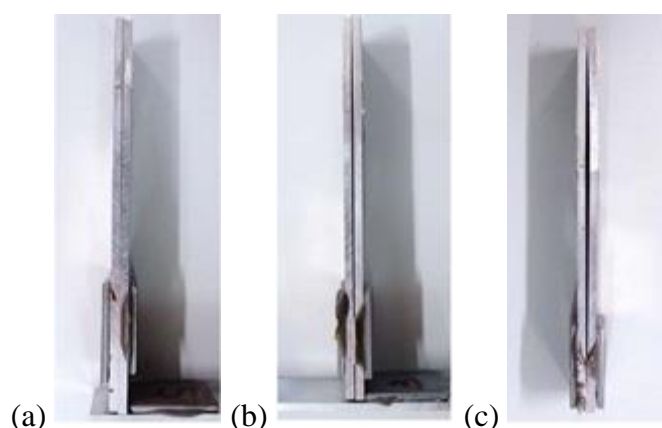


Figura 74 – Vista lateral dos aderentes de uma junta colada com o adesivo Araldite® 2015:  $L_0=25$  mm (a), 37,5 mm (b) e 50 mm (c).

É possível constatar tal facto pela visualização da Figura 74, onde para  $L_0=25$  mm não se observa deformação plástica (a), enquanto para  $L_0=37,5$  mm (b) e 50 mm (c) é possível

observar a ocorrência de deformação plástica. Concluiu-se que a deformação plástica das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 aumentou com  $L_0$ .

Por último, relativamente ao terceiro adesivo testado experimentalmente (SikaForce® 7888), o resultado obtido foi de rotura mista na totalidade dos provetes. É de referir que a rotura ocorreu parcialmente no interior do próprio adesivo e na ligação entre o adesivo e o aderente. A Figura 75 mostra superfícies de rotura representativas para cada valor de  $L_0$  (12,5 mm, 25 mm, 37,5 mm e 50 mm da esquerda para a direita).

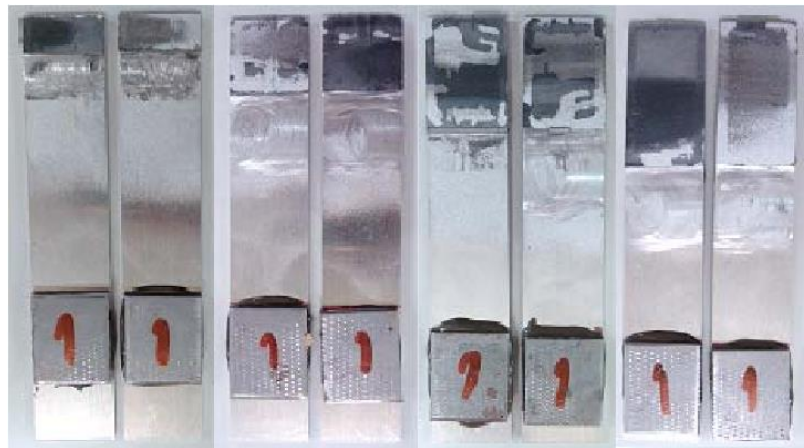


Figura 75 – Superfícies de rotura do adesivo SikaForce® 7888 para os diferentes valores de  $L_0$ .

Constata-se que os aderentes sofrem deformação plástica a partir do menor valor de  $L_0$  considerado neste trabalho (12,5 mm), devido à resistência das juntas coladas com o adesivo SikaForce® 7888 ser bastante superior à registada para os outros adesivos propostos.

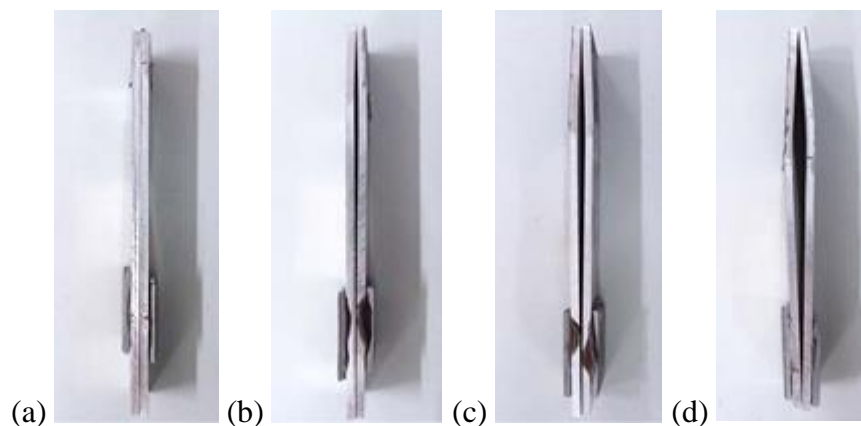


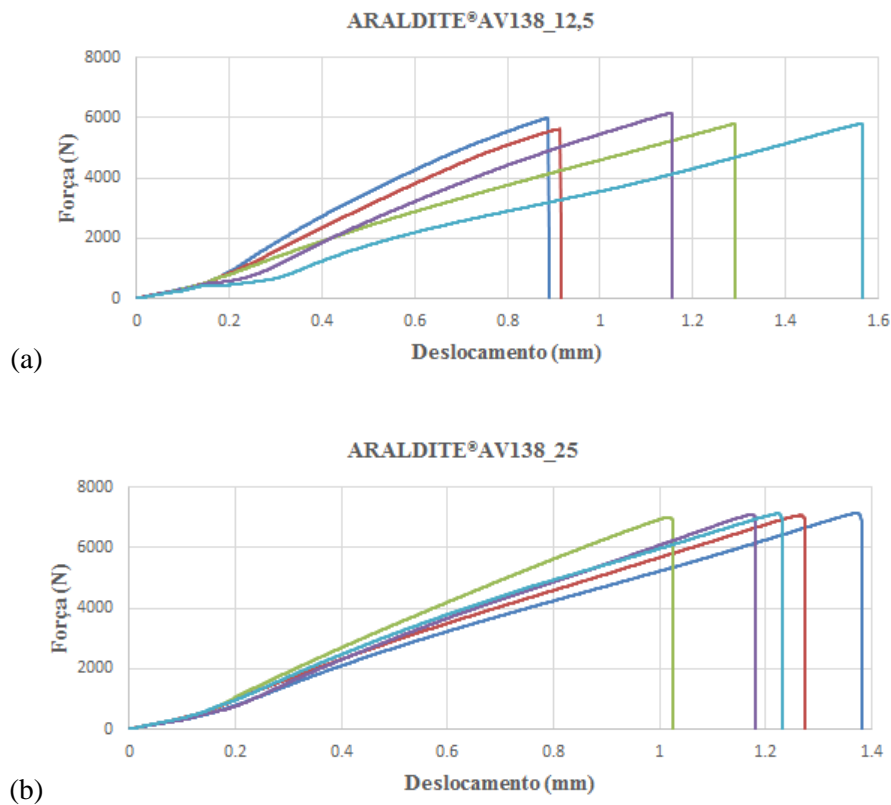
Figura 76 - Vista lateral dos aderentes de juntas coladas com o SikaForce® 7888:  $L_0=12,5$  mm (a),  $L_0=25$  mm (b),  $L_0=37,5$  mm (c) e  $L_0=50$  mm (d).

A constatação do exposto é visível através da Figura 76, embora para  $L_0 = 12,5$  mm a visualização da deformação plástica seja pouco perceptível.

### 3.5.2 Curvas $P-\delta$

À semelhança do procedimento efectuado para os modos de rotura, também na observação das curvas  $P-\delta$  e no tratamento de dados a primeira abordagem a analisar é relativa ao adesivo Araldite® AV138, por ser o adesivo mais frágil.

A Figura 77 apresenta as curvas  $P-\delta$  relativas aos ensaios do adesivo Araldite® AV138, para os quatro valores de  $L_0$  considerados, nomeadamente 12,5 mm (a), 25 mm (b), 37,5 mm (c) e 50 mm (d).



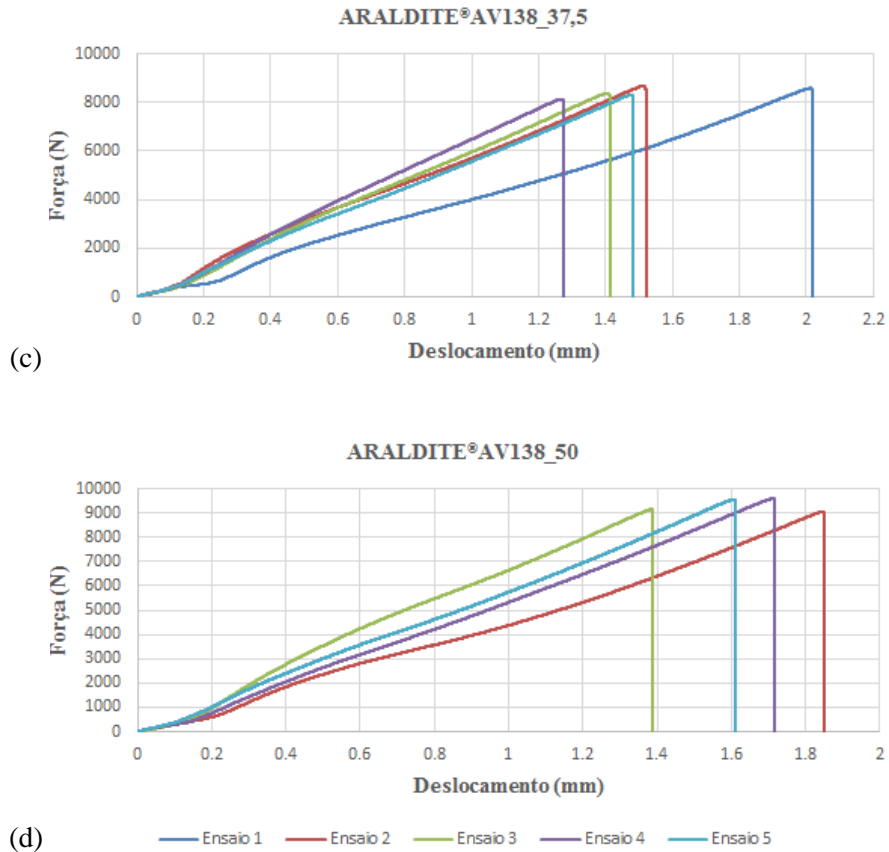


Figura 77 - Curvas  $P-\delta$  do adesivo Araldite® AV138: 12,5 mm (a), 25 mm (b), 37,5 mm (c) e 50 mm (d).

Da visualização das curvas  $P-\delta$ , é possível constatada que todas as curvas apresentam um comportamento tipicamente linear desde o início do ensaio até à rotura, embora seja notória a ocorrência de pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas, provocada pela flexibilidade do equipamento de ensaio e problemas da amarração dos provetes. Pode ainda ser referido que, no geral, verifica-se uma boa repetibilidade das curvas no que diz respeito à rigidez,  $P_{máx}$  e ao correspondente deslocamento.

Os valores de  $P_{máx}$  estão apresentados em tabelas, sendo que a cada tabela corresponde a um material diferente. Em cada tabela estão apresentados os valores de  $P_{máx}$  obtidos nos ensaios para cada valor de  $L_0$ , a força máxima média ( $P_{máx}$  Méd), que corresponde à média das forças máximas recolhidas, o aumento percentual entre forças máximas ( $\Delta P_{máx}$ ), que corresponde à diferença percentual entre o valor de  $L_0$  em questão e o valor mínimo de  $L_0$  (15 mm), e o desvio padrão, que fornece a dispersão, em termos numéricos e percentuais, dos valores obtidos dos ensaios.

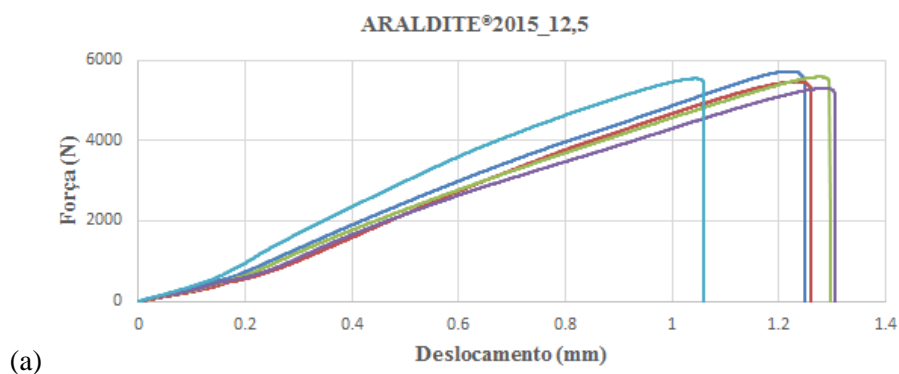
Os resultados recolhidos dos ensaios experimentais realizados ao adesivo Araldite® AV138, bem como o tratamento de dados necessário à sua compreensão, estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores obtidos dos ensaios relativos ao Araldite® AV138.

Araldite® AV138	$L_0$ (mm)	$P_{\text{máx 1}}$ (N)	$P_{\text{máx 2}}$ (N)	$P_{\text{máx 3}}$ (N)	$P_{\text{máx 4}}$ (N)	$P_{\text{máx 5}}$ (N)	$P_{\text{máx Méd}}$ (N)	$\Delta P_{\text{máx}}$ (%)	Desv. Padrão	
	12,5	5982,8	5616,7	5784,0	6150,2	5789,1	5864,6	100,0%	205,7	3,5%
	25	7131,4	7059,0	7002,6	7086,3	7116,2	7079,1	120,7%	51,0	0,7%
	37,5	8581,6	8670,9	8382,0	8132,2	8318,8	8417,1	143,5%	214,2	2,5%
	50	8874,4	8670,9	9150,7	9601,5	9559,7	9171,5	<b>156,4%</b>	410,8	<b>4,5%</b>

Dos ensaios realizados para o adesivo Araldite® AV138 e pelos valores apresentados, é visível que os valores de  $P_{\text{máx}}$  aumentam com  $L_0$ . Na coluna relativa ao aumento percentual entre forças máximas verifica-se que o aumento percentual provocado por  $L_0$  não é constante. Por exemplo, no caso de  $L_0=50$  mm relativamente a  $L_0=12,5$  mm observa-se um aumento de  $P_{\text{máx}}$  de aproximadamente 156%. Todos os ensaios foram considerados válidos, já que não houve desvios significativos dos valores individuais dos ensaios relativamente ao respectivo valor médio. É possível verificar que para  $L_0=25$  mm a dispersão dos valores obtidos foi muito reduzida, já que os valores individuais de cada provete estão muito próximos dos valores médios. Pode-se confirmar este comportamento nas curvas  $P-\delta$  da Figura 77 (b).

A Figura 78 mostra as curvas  $P-\delta$  relativas aos vários ensaios efectuados para o adesivo Araldite® 2015 com valores de  $L_0$  de 12,5 mm (a), 25 mm (b), 37,5 mm (c) e 50 mm (d).



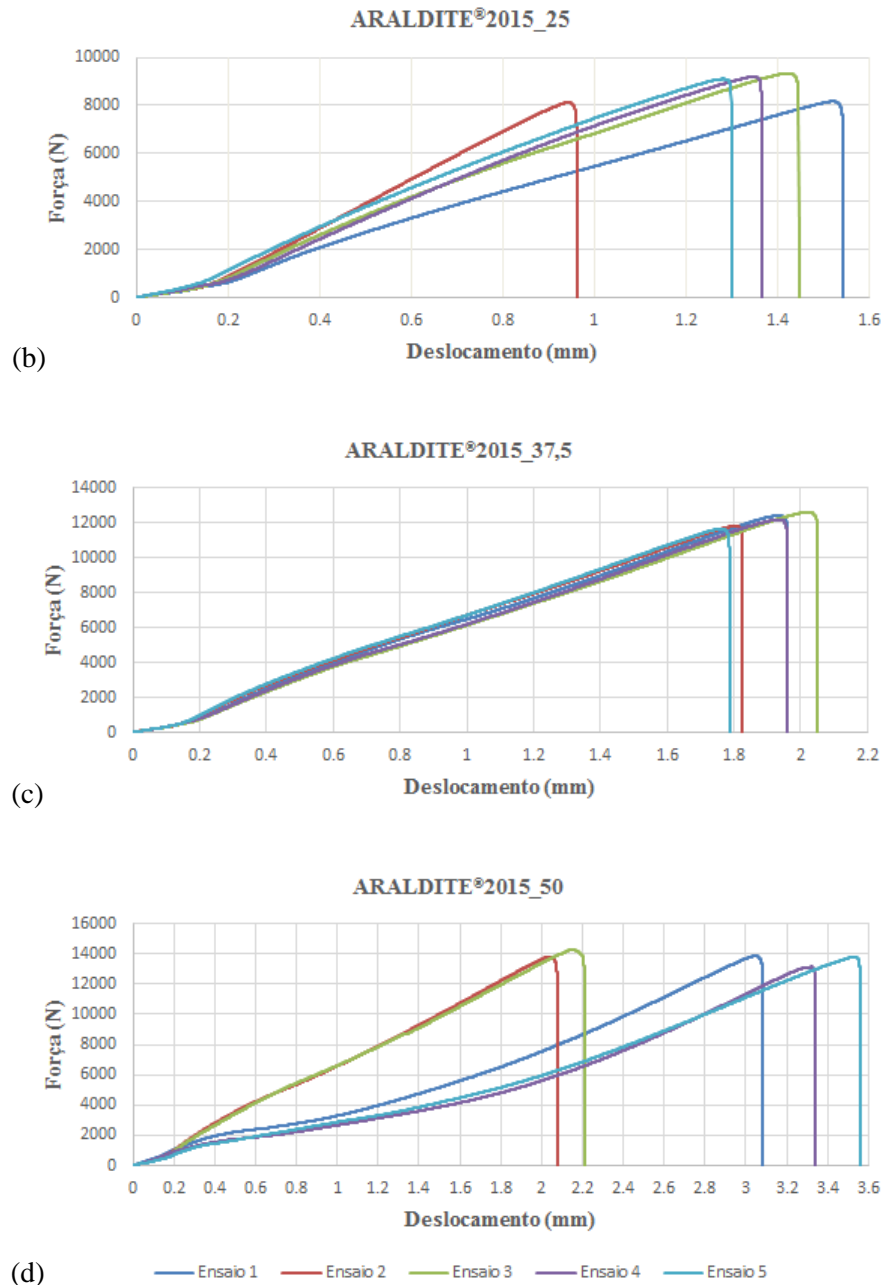


Figura 78 – Curvas  $P-\delta$  do adesivo Araldite® 2015:  $L_0=12,5$  mm (a),  $L_0=25$  mm (b),  $L_0=37,5$  mm (c) e  $L_0=50$  mm.

De uma forma geral é possível averiguar que, à semelhança do que acontece com o Araldite® AV138, também para o Araldite® 2015 se verifica o comportamento linear das curvas desde o início até à rotura. As oscilações apontadas anteriormente continuam a observar-se, embora a uma escala superior. Assiste-se igualmente a uma boa repetibilidade das curvas no que concerne à rigidez, valor de  $P_{\text{máx}}$  e ao respectivo deslocamento.

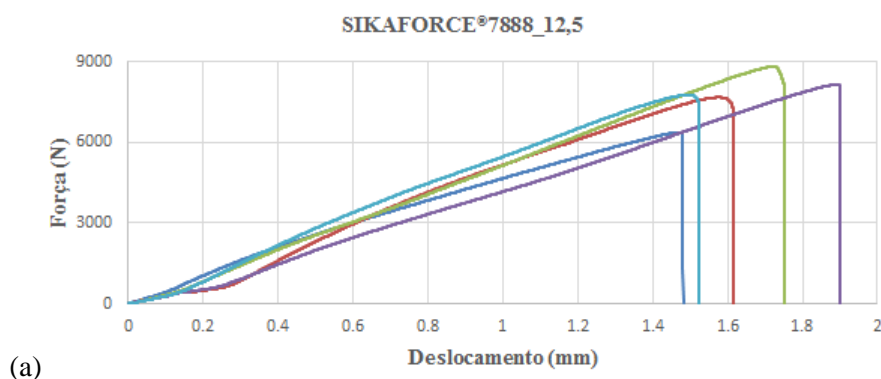
Os valores recolhidos dos ensaios realizados para o adesivo Araldite® 2015, bem como o tratamento de dados necessário à sua análise, estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores obtidos dos ensaios relativos ao Araldite® 2015.

Araldite® 2015	$L_0$ (mm)	$P_{\text{máx}} 1$ (N)	$P_{\text{máx}} 2$ (N)	$P_{\text{máx}} 3$ (N)	$P_{\text{máx}} 4$ (N)	$P_{\text{máx}} 5$ (N)	$P_{\text{máx}} \text{ Méd}$ (N)	$\Delta P_{\text{máx}}$ (%)	Desv. Padrão	
	12,5	5721,0	5463,3	5579,3	5300,0	5538,9	5520,5	100,0%	154,8	2,8%
	25	8165,3	8122,7	9337,9	9185,8	9099,4	8782,2	159,1%	589,0	6,7%
	37,5	12399,9	11785,1	12583,2	12172,8	11643,0	12116,8	219,5%	398,5	3,3%
	50	13856,1	13785,6	14269,7	13128,7	13800,1	13768,0	249,4%	409,1	3,0%

Numa primeira abordagem aos valores obtidos para este adesivo constata-se que  $P_{\text{máx}}$  aumenta consideravelmente com  $L_0$ . O aumento percentual provocado por  $L_0$  não é constante. No entanto, é de salientar que, comparativamente aos valores fornecidos pelo adesivo Araldite® AV138, a diferença percentual apresentada é significativamente maior. Para o mesmo exemplo apresentado anteriormente, considerando a junta com  $L_0=50$  mm relativamente à junta com  $L_0=12,5$  mm, regista-se um aumento de  $P_{\text{máx}}$  de aproximadamente 250%. Refere-se ainda que a maior dispersão apresentada entre valores de  $P_{\text{máx}} \text{ Méd}$  corresponde às juntas com  $L_0=25$  mm. Todos os ensaios foram considerados válidos dado que não houve provetes com diferenças significativas, constatado pelos valores do desvio padrão.

A Figura 79 diz respeito ao último adesivo em estudo, SikaForce® 7888, onde estão apresentadas as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas para valores de  $L_0$  de 12,5 mm (a), 25 mm (b), 37,5 mm (c) e 50 mm (d).



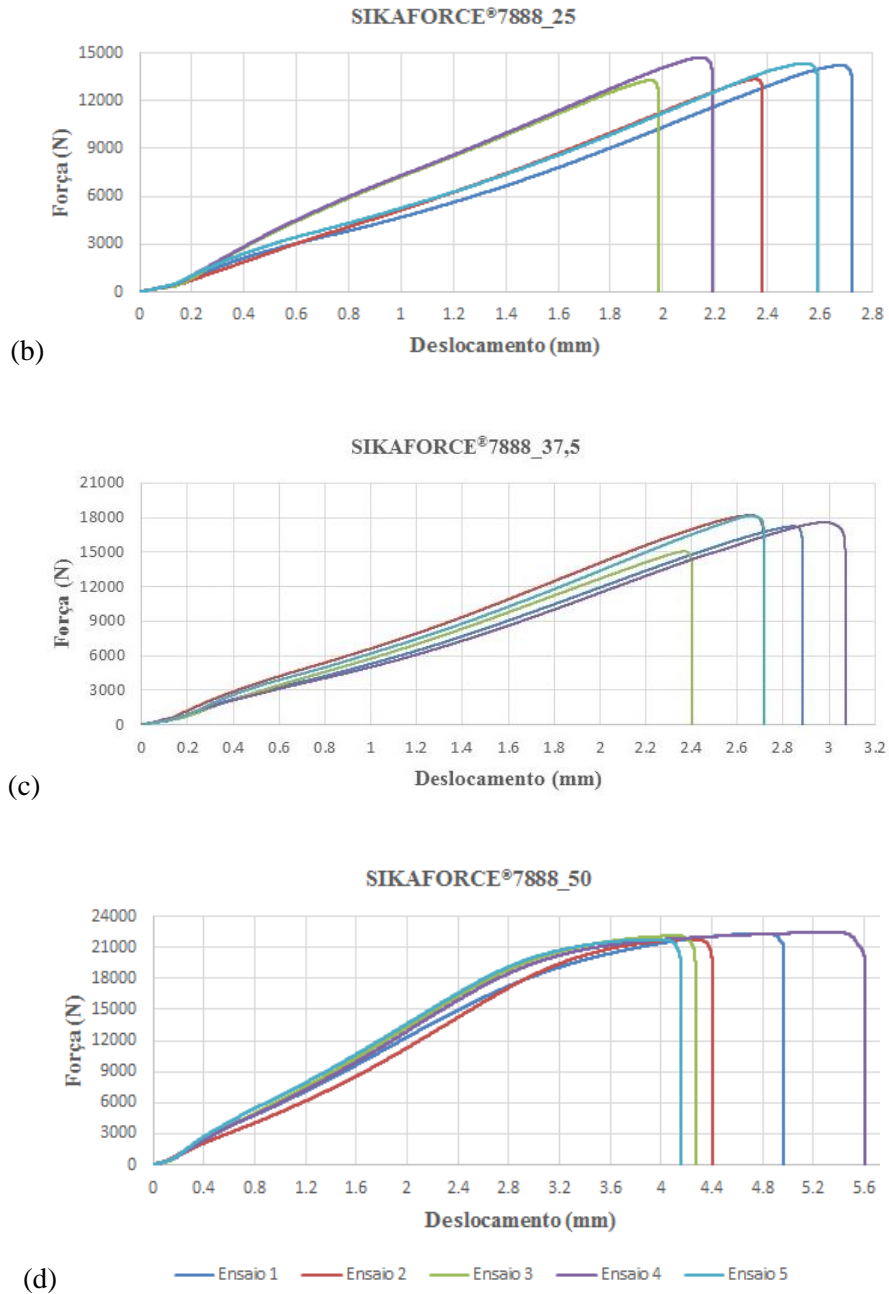


Figura 79 - Curvas  $P-\delta$  do adesivo SikaForce® 7888:  $L_0=12,5$  mm (a),  $L_0=25$  mm (b),  $L_0=37,5$  mm (c) e  $L_0=50$  mm.

Da análise efectuada aos gráficos expostos constata-se que o adesivo SikaForce® 7888 tem um comportamento não linear na proximidade de  $P_{m\acute{a}x}$  para  $L_0=50$  mm. Este comportamento está relacionado com a plastificação acentuada dos aderentes, que ocorre devido às elevadas cargas envolvidas.

Tal como para os restantes adesivos, ocorrem pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas devido à flexibilidade da máquina e questões da amarração dos provetes. Apesar deste facto, observa-se uma boa repetibilidade das curvas  $P$ - $\delta$  para cada configuração de junta.

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados obtidos pelos ensaios realizados com o adesivo SikaForce® 7888.

Tabela 10 – Valores obtidos dos ensaios relativos ao SikaForce® 7888.

Sikaforce® 7888	$L_0$ (mm)	$P_{\text{máx}} 1$ (N)	$P_{\text{máx}} 2$ (N)	$P_{\text{máx}} 3$ (N)	$P_{\text{máx}} 4$ (N)	$P_{\text{máx}} 5$ (N)	$P_{\text{máx}} \text{ Méd}$ (N)	$\Delta P_{\text{máx}}$ (%)	Desv. Padrão	
	12,5			7665,6	8823,3	8140,4	7768,4	8099,4	100,0%	523,9
25		13498,4	13349,5	13273,3	14715,1	14350,1	13837,2	170,8%	652,8	4,7%
37,5		17249,6	18202,2		17606,1	18180,5	17809,6	219,9%	464,3	2,6%
50		22355,8	21794,8	22132,4	22444,6	21757,2	22097,0	<b>272,8%</b>	314,6	1,4%

Conforme se observa na Tabela 10 foram excluídos dois ensaios, devido à discrepância de valores que surgiram. São vários os factores que podem ter originado tal facto, tais como introdução de defeitos durante o processo de fabrico ou problemas de amarração dos provetes na máquina de ensaio. Analisando os valores fornecidos pode ser referido que, para este adesivo, o aumento de  $P_{\text{máx}}$  em função de  $L_0$  é ligeiramente superior aos valores apresentados pelo adesivo Araldite® 2015 e bastante superior aos valores apresentados pelo adesivo Araldite® AV138. De facto, o aumento percentual máximo obtido é de cerca de 273% face aos 250% do adesivo Araldite® 2015 e aos 156% do adesivo Araldite® AV138. Os valores calculados de desvio padrão percentual resultam num valor máximo de 6,5%, pelo que se constata a elevada repetibilidade dos ensaios.

Para a totalidade dos ensaios, as configurações de junta com maior desvio padrão percentual foram as juntas com o adesivo Araldite® 2015 com  $L_0=25$  mm (6,7%), seguido do adesivo SikaForce® 7888 com  $L_0=12,5$  mm (6,5%) e por fim, o adesivo Araldite® AV138 com  $L_0=50$  mm (4,5%). Verifica-se que o aumento de  $P_{\text{máx}}$  com  $L_0$  varia consoante o adesivo utilizado, o que resultou num comportamento bastante distinto entre os três adesivos. Os resultados de  $P_{\text{máx}}$  dependem muito das propriedades dos adesivos, tais como rigidez, resistência e ductilidade.

### 3.5.3 Resistência das juntas

A comparação geral dos valores de  $P_{\text{máx}}$  para as juntas com os três adesivos pode ser observada na Figura 80. É também apresentado o desvio padrão de cada configuração de junta, onde se observa a dispersão dos valores de  $P_{\text{máx}}$  individuais de cada provete relativamente à média respectiva.

No caso do adesivo Araldite® AV138, o aumento percentual de  $P_{\text{máx}}$  com  $L_0$  não é muito significativo. O aumento percentual entre valores de  $L_0=12,5$  mm e 25 mm é de 20,7%, entre 25 mm e 37,5 mm é de 22,8%, já no caso dos valores de  $L_0=37,5$  mm e 50 mm é de 12,9%. Para  $L=50$  mm,  $P_{\text{máx}}$  Méd é de 9171,5 N. Constata-se que o valor de  $P_{\text{máx}}$  do adesivo Araldite® 2015 é inferior ao adesivo Araldite® AV138 para  $L_0=12,5$  mm. Não obstante, com o aumento de  $L_0$ , rapidamente o valor de  $P_{\text{máx}}$  das juntas coladas com o Araldite® 2015 se torna superior.

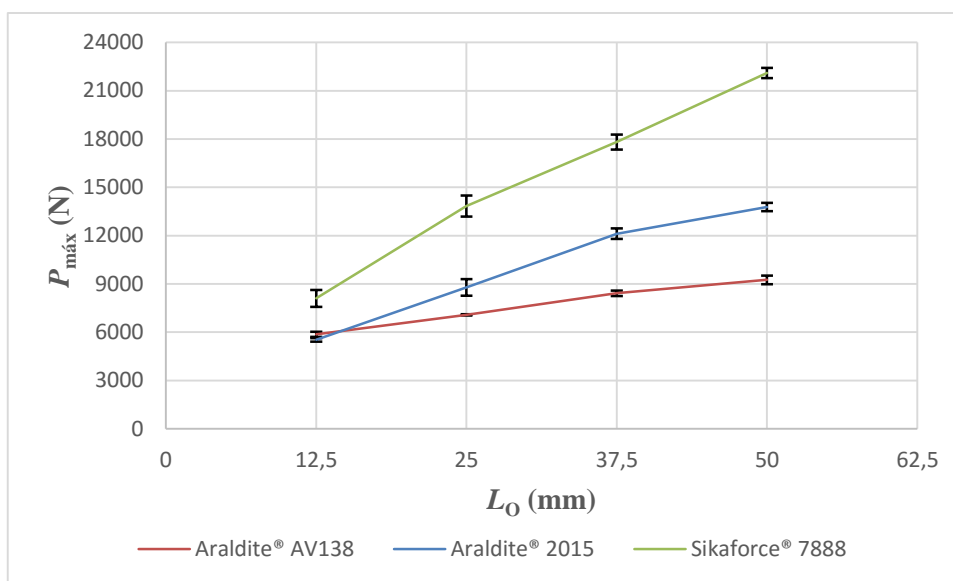


Figura 80 – Variação de  $P_{\text{max}}$  com  $L_0$  para as juntas coladas com os três adesivos.

O aumento percentual do adesivo Araldite® 2015 é bastante superior ao observado para o adesivo Araldite® AV138, chegando a valores aproximados de 60% entre os dois valores de  $L_0$  mais pequenos. Para  $L_0=50$  mm o valor de  $P_{\text{máx}}$  é de aproximadamente 13800 N.

Embora apresente um aumento percentual próximo ao adesivo Araldite® 2015, o adesivo SikaForce® 7888 possui uma resistência mais elevada desde o valor de  $L_0=12,5$  mm, reflectindo-se num conjunto de valores bastante mais elevados para todos os valores de  $L_0$

em análise. O valor de  $P_{\text{máx}}$  que esta junta suporta para  $L_0=50$  mm é de aproximadamente 22100 N. Através da realização dos ensaios experimentais verifica-se que o aumento de  $P_{\text{máx}}$  com  $L_0$  varia consoante o adesivo, apresentando um comportamento bastante distinto entre os três adesivos. A justificação destas diferenças vai ser descrita posteriormente no Capítulo 4 da presente dissertação.

## 4 Previsão da resistência

É muitas vezes expectável que as juntas adesivas suportem carregamentos estáticos ou cíclicos por períodos de tempo consideráveis, sem qualquer efeito prejudicial sobre a capacidade de carga da estrutura. Em alguns casos, devido à falta de conhecimento no que concerne aos métodos de previsão mais adequados, as juntas adesivas ainda são sobredimensionadas. Neste subcapítulo são abordados os vários métodos analíticos e de MEF para previsão da resistência de juntas adesivas. Os métodos baseados no MEF são os MDC e o MEFE.

### 4.1 Mecânica dos meios contínuos

#### 4.1.1 Modelo analítico de Volkersen

O método de Volkersen [3], primeiro método conhecido na literatura para análise de tensões de juntas adesivas, introduziu o conceito de corte diferencial. Neste método não é considerado o efeito de flexão devido à excentricidade na transmissão de esforços. A distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  no adesivo é dada pela equação (17)

$$\tau_{xy} = \frac{P\omega}{2b} \times \frac{\cosh(\omega x)}{\sinh\left(\frac{\omega l}{2}\right)} + \left(\frac{t_t - t_b}{t_t + t_b}\right) \times \left(\frac{\omega l}{2}\right) \times \frac{\sinh(\omega x)}{\cosh\left(\frac{\omega l}{2}\right)}, \quad (17)$$

onde

$$\omega = \sqrt{\frac{G_a}{Et_t t_A} \left(1 + \frac{t_t}{t_b}\right)}, \quad (18)$$

em que  $\omega$  é a distância característica da deformação diferencial, em unidades de comprimento, e mede a rapidez com que a carga é transferida de um aderente para o outro.  $t_t$  é a espessura do substrato superior,  $t_b$  é a espessura do substrato inferior,  $G_a$  é o módulo de elasticidade ao corte do adesivo. A origem de  $x$  é a meio da sobreposição da junta, conforme representado na Figura 81.

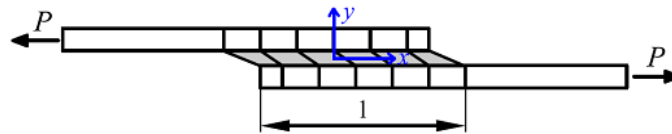


Figura 81 – Sistema de eixos utilizado no modelo de Volkersen.

Na aplicação deste método e dos posteriormente descritos foram utilizados os valores da Tabela 11 na estimativa de  $P_{\text{máx}}$  para as várias configurações de junta.

Tabela 11 – Valores utilizados nos métodos analíticos.

	<b>Tensão de ruptura ao corte</b>	<b>Módulo de elasticidade ao corte</b>
Araldite® AV138	30,2	1,56
Araldite® 2015	$\tau_f = 17,9$ MPa	$G_a = 0,56$ GPa
SikaForce® 7888	20	0,727
	<b>Módulo elasticidade</b>	<b>Comprimento de sobreposição</b>
	$E = 700,7$ GPa	12,5
	<b>Tensão de cedência</b>	$l = 25$ mm
	$\sigma_y = 261,67$ MPa	
	<b>Espessura</b>	50
	$t_t = t_b = 3$ mm	
	<b>Largura</b>	<b>Espessura do adesivo</b>
	$b = 25$ mm	$t_A = 0,2$ mm

Para aplicação do método de Volkersen [3], foi considerada a expressão (19) e posteriormente substituída na equação de Volkersen [114]. Resolvendo em ordem a  $P$  obtém-se a expressão (20)

$$\tau_{xy} = \frac{P}{bl} \quad (19)$$

$$P = \frac{bl\tau \sinh(\lambda l)}{\lambda \left[ (k-1) \cosh(\lambda(l-x)) + \cosh(\lambda x) \right]} \quad (20)$$

Esta expressão permite concluir que a tensão  $\tau_{xy}$  máxima no adesivo ocorre nas extremidades, correspondendo a  $x=0$  ou  $x=l$ . Foi utilizado o critério de rotura da tensão  $\tau_{xy}$  máxima, que estipula que a rotura ocorre quando a tensão  $\tau_{xy}$  máxima no adesivo atingir a tensão  $\tau_{xy}$  máxima suportada pelo material.

Foram efectuados todos os cálculos necessários relativamente a cada um dos adesivos e valores de  $L_0$ , resultando nas previsões de  $P_{\text{máx}}$  apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Valores de  $P_{\text{máx}}$  obtidos pelo método de Volkersen.

	$L_0$ (mm)	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7888
$P_{\text{máx}}$ (N)	12,5	2986,4	2800,7	2802,7
	25	3309,0	3281,1	3150,5
	37,5	3620,0	3492,1	3442,6
	50	3918,0	3778,2	3723,2

Na Figura 82 mostram-se as curvas obtidas para a distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  em função de  $L_0$  para os três adesivos, utilizando o método de Volkersen e dois valores de  $L_0$ .

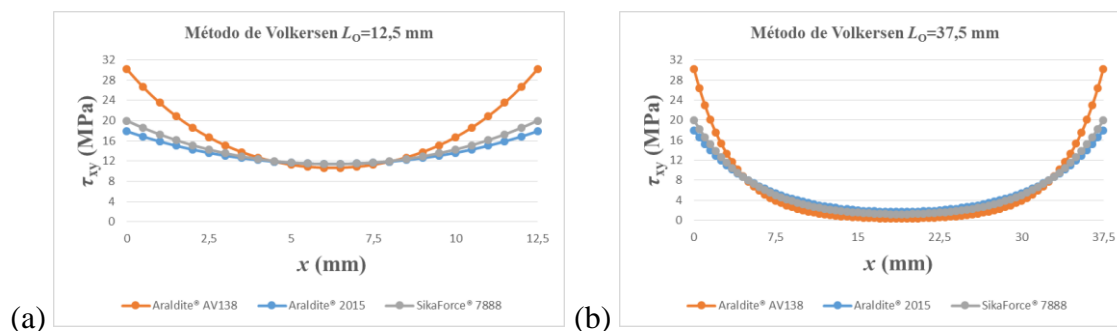


Figura 82 - Distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  pelo método de Volkersen para:  $L_0=12,5$  mm (a) e  $L_0=37,5$  mm (b).

Os valores de  $P_{\text{máx}}$  obtidos pelo método de Volkersen foram comparados com os valores obtidos experimentalmente (Figura 83).

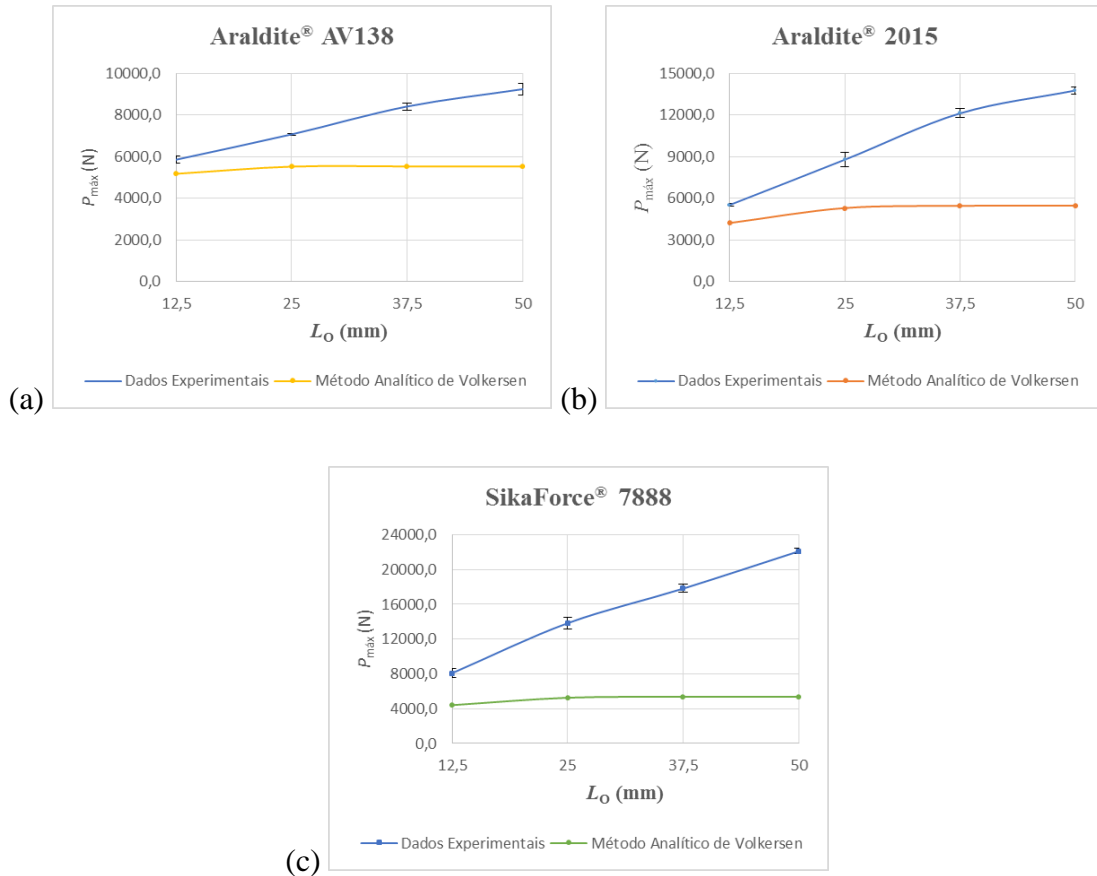


Figura 83 – Comparação entre as previsões de  $P_{\text{máx}}$  pelo método de Volkersen e os valores experimentais, para o adesivo: Araldite® AV138 (a), Araldite® 2015 (b) e SikaForce® 7888 (c).

De um modo geral, é possível verificar que os valores experimentais de  $P_{\text{máx}}$  são mais elevados do que pelo método de Volkersen, nomeadamente ao que concerne às juntas com o adesivo SikaForce® 7888. A amplitude de variância é uma medida de dispersão obtida pela diferença entre dois conjuntos de dados. Assim, para o adesivo Araldite® AV138, é possível observar que a dispersão entre o método de Volkersen e os dados experimentais varia entre 700 N ( $L_0=12,5$  mm) e 3700 N ( $L_0=50$  mm), aproximadamente. Para o Araldite® 2015 a dispersão entre valores varia desde 1300 N ( $L_0=12,5$  mm) até 8300 N ( $L_0=50$  mm), aproximadamente e, para o adesivo SikaForce® 7888, a dispersão calculada está entre 3700 N ( $L_0=12,5$  mm) e 16700 N ( $L_0=50$  mm), aproximadamente.

Verifica-se que, nas previsões pelo método de Volkersen para os três adesivos,  $L_0$  não varia de forma significativa, ao invés do que acontece com os dados obtidos experimentalmente. Observa-se este efeito para os três adesivos. No geral, verifica-se que para valores de  $L_0$  pequenos os valores obtidos pelo método de Volkersen aproximam-se dos valores obtidos experimentalmente. No entanto, para valores de  $L_0$  superiores este modelo deixa de

apresentar uma aproximação precisa do comportamento das juntas. Por exemplo, no caso do adesivo Araldite® AV138, a diferença percentual é de 12% para  $L_0=12,5$  mm e de 40% para  $L_0=50$  mm. No caso do adesivo Araldite® 2015 para  $L_0=12,5$  mm, a diferença de valores é de 24% face os 60% para  $L_0=50$  mm. A diferença mais significativa, como é esperado, surge para o adesivo SikaForce® 7888, com 45% para  $L_0=12,5$  mm e 76% para  $L_0=50$  mm.

Para valores de  $L_0=12,5$  mm pode referir-se que este método analítico é moderadamente preciso para adesivos frágeis. No entanto, para valores de  $L_0$  mais elevados a previsão começa a apresentar discrepâncias cada vez mais elevadas. Para adesivos dúcteis nota-se uma discrepância mesmo para valores de  $L_0$  mais reduzidos. Não obstante, para as juntas coladas com o adesivo SikaForce® 7888, os valores experimentais de  $P_{\text{máx}}$  diferem claramente daqueles obtidos pelo método de Volkersen. Esta diferença está relacionada com a elevada ductilidade do adesivo, o que torna o método desajustado.

#### 4.1.2 Modelo analítico de Goland e Reissner

Goland e Reissner [54] foram os primeiros a considerar a rotação dos aderentes (Figura 38). Estes autores dividiram o problema em duas partes: a) determinação das cargas na extremidade das juntas usando a formulação das placas cilíndricas em flexão e b) determinação da tensão nas juntas devido ao carregamento aplicado. A distribuição encontrada para a tensão  $\tau_{xy}$  no adesivo é dada pela equação (21)

$$\tau_{xy} = -\frac{1}{8} \frac{\bar{P}}{c} \left\{ \frac{\beta c}{t} (1+3k) \frac{\cosh\left(\frac{\beta c x}{t c}\right)}{\sinh(\beta c/t)} + 3(1-k) \right\}, \quad (21)$$

onde  $c$  é metade de  $L_0$  e  $k$  é obtido através da equação (22)

$$k = \frac{\cosh(u_2 c)}{\cosh(u_2 c) + 2\sqrt{2}\sinh(u_2 c)}, \quad (22)$$

com

$$u_2 = \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{2}} \frac{1}{t} \sqrt{\frac{\bar{P}}{tE}} e \quad (23)$$

$$\beta^2 = 8 \frac{G_a}{E} \frac{t}{t_a}, \quad (24)$$

sendo  $\nu$  o coeficiente de *Poisson*. O valor máximo de  $\tau_{xy}$  ocorre na extremidade da junta ( $x = \pm c$ ), equação (25). Para a obtenção dos valores de  $P_{\text{máx}}$  foi utilizado o critério de rotura da tensão  $\tau_{xy}$  máxima

$$\tau_{\text{máx}} = -\frac{1}{8} \frac{\bar{P}}{bc} \left[ \frac{\beta c}{t} (1+3k) \cotg\left(\frac{\beta c}{t}\right) + 3(1-k) \right]. \quad (25)$$

Foram efectuados todos os cálculos necessários para obter  $\tau$  relativamente a cada um dos adesivos e valores de  $L_0$  pelo método de Goland e Reissner. Os valores calculados de  $P_{\text{máx}}$  têm por base os parâmetros definidos na Tabela 11 e o critério da tensão  $\tau_{xy}$  máxima, resultando nos valores apresentados na Tabela 13.

O valor de  $P_{\text{máx}}$  foi encontrado com a função *SOLVER* do *EXCEL*. Para a obtenção dos resultados computacionais pelo *SOLVER* foram adicionas restrições, necessárias ao problema, e executou-se a função desejada de modo a que o valor de  $P$  encontrado fosse máximo.

Tabela 13 - Valores de  $P_{\text{máx}}$  obtidos pelo método de Goland e Reissner.

	$L_0$ (mm)	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7888
$P_{\text{máx}}$ (N)	12,5	3079,7	2926,9	2918,7
	25	3446,0	3402,0	3331,2
	37,5	3820,9	3773,7	3690,0
	50	4207,7	4154,2	4059,1

A Figura 84 mostra as curvas obtidas para a distribuição de  $\tau_{xy}$  em função de  $L_0$  relativamente aos três adesivos utilizando o método de Goland e Reissner, referente a dois valores de  $L_0$ .

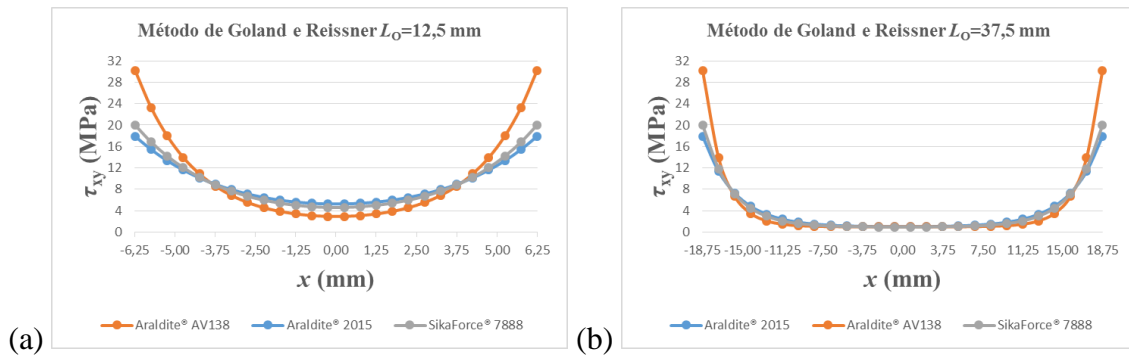


Figura 84 - Distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  pelo método de Goland e Reissner para:  $L_0=12,5$  mm (a) e  $L_0=37,5$  mm (b).

É apresentada na Figura 85 a comparação dos resultados obtidos pelo método de Goland e Reissner com os dados experimentais.

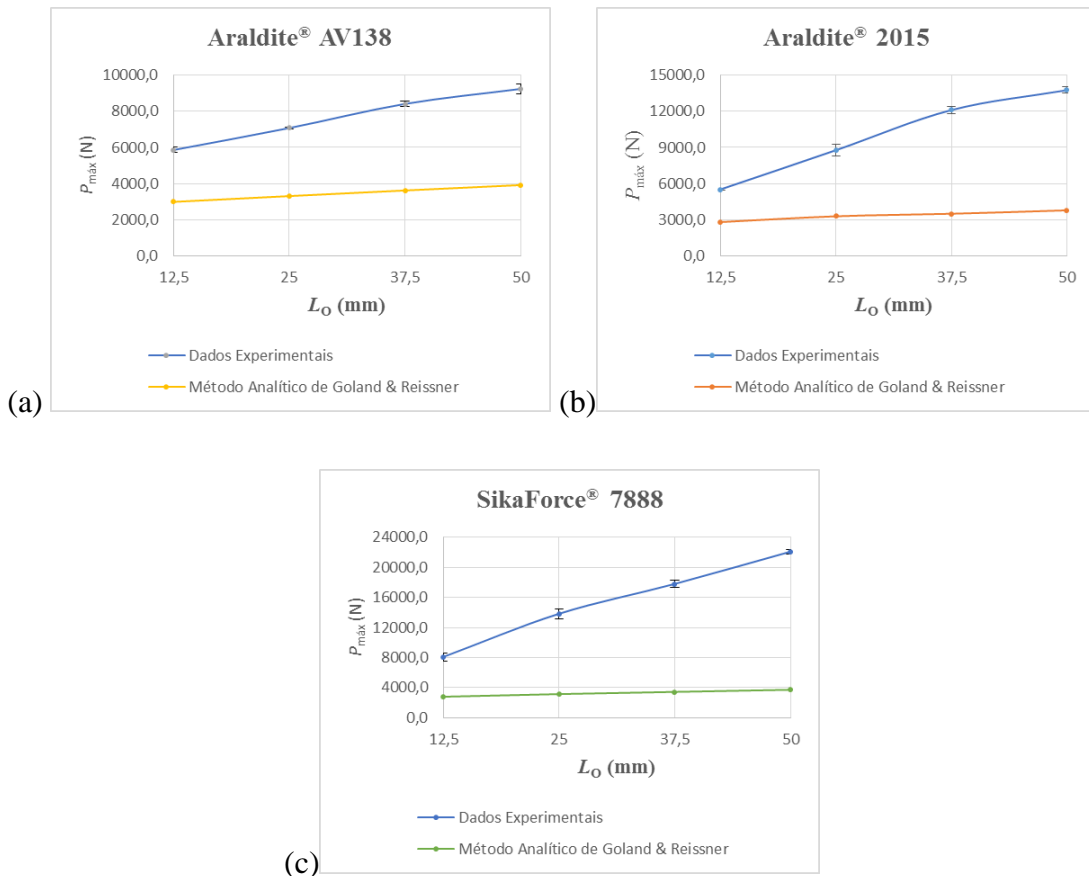


Figura 85 - Comparação entre as previsões de  $P_{m\acute{a}x}$  pelo método de Goland e Reissner e os valores experimentais, para o adesivo: Araldite® AV138 (a), Araldite® 2015 (b) e SikaForce® 7888 (c).

A análise dos valores obtidos mostra que os dados experimentais são mais elevados do que os valores obtidos pelo método de Goland e Reissner. Comparando os resultados de  $P_{m\acute{a}x}-L_0$

obtidos com os do modelo de Volkersen, observa-se que para  $L_0$  reduzidos a variação do modelo de Goland e Reissner é superior, enquanto para valores de  $L_0$  mais elevados esta é inferior.

O estudo realizado pela amplitude da variância apresenta diferenças superiores ao método de Volkersen. Para o Araldite® AV138 estas variam entre 2800 N ( $L_0=12,5$  mm) e 6000 N ( $L_0=50$  mm). No caso do Araldite® 2015 a diferença varia entre 2800 N ( $L_0=12,5$  mm) e 10000 N ( $L_0=50$  mm), aproximadamente. Os valores apresentados para o SikaForce® 7888 variam entre 5300 N ( $L_0=12,5$  mm) e 18300 N ( $L_0=50$  mm). É perceptível que neste último caso a dispersão de valores contínua a verificar-se como mais significativa.

Pelo método de Goland e Reissner verifica-se que  $L_0$  também não varia significativamente para os três adesivos. Não obstante, constata-se que, para valores pequenos de  $L_0$ , os valores obtidos experimentalmente aproximam-se dos valores obtidos pelo método, afastando-se com o aumento de  $L_0$ . No caso do adesivo Araldite® AV138 a diferença percentual é de 49% para  $L_0=12,5$  mm e de 58% para  $L_0=50$  mm. No caso do adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=12,5$  mm a diferença é de 49% face aos 73% para  $L_0=50$  mm. Novamente, a diferença mais significativa surge para o adesivo SikaForce® 7888 com 65% para  $L_0=12,5$  mm e 83% para  $L_0=50$  mm. O método apresenta-se como não sendo fiável para adesivos frágeis e menos ainda para adesivos dúcteis devido às discrepâncias observadas. É de referir que para as juntas com o adesivo SikaForce® 7888 os valores experimentais de  $P_{\text{máx}}$  diferem de uma forma bastante notória, o que é justificado pela elevada ductilidade do adesivo, o que torna o modelo de Goland e Reissner desajustado.

O método de Goland e Reissner já tem em consideração as tensões  $\sigma_y$  na sua formulação, apresentadas através da equação (26) para  $x=\pm c$

$$\sigma = \frac{\bar{P}t}{c^2} \frac{1}{\Delta} \left[ \begin{aligned} &\left( R_2 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \cosh \lambda \cos \lambda \right) \cosh \left( \lambda \frac{x}{c} \right) \cos \left( \lambda \frac{x}{c} \right) \\ &+ \left( R_1 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \sinh \lambda \sin \lambda \right) \sinh \left( \lambda \frac{x}{c} \right) \sin \left( \lambda \frac{x}{c} \right) \end{aligned} \right], \quad (26)$$

onde  $k'$  é o factor de força transversa dado pela equação (27)

$$k' = \frac{kc}{t} \sqrt{3(1-\nu^2) \frac{\bar{P}}{tE}}, \quad (27)$$

com

$$\lambda = \gamma \frac{c}{t}, \quad (28)$$

$$\gamma^4 = 6 \frac{E_a t}{E t_a} e \quad (29)$$

$$\Delta = \frac{1}{2} (\sinh(2\lambda) + \sin(2\lambda)). \quad (30)$$

A distribuição de  $\sigma_y$  em função de  $L_0$  está apresentada na Figura 86 para os três adesivos. De uma forma geral, verifica-se que as tensões  $\sigma_y$  possuem magnitude inferior às tensões  $\tau_{xy}$ , excepto em zonas muito localizadas nas extremidades da ligação da junta. Relativamente à distribuição de tensões  $\sigma_y$ , na região interior da camada do adesivo estas são de compressão, enquanto nas suas extremidades estas são de tracção. Este efeito é devido à curvatura ou deformação transversal da junta, que é governada pela deformação dos aderentes, provocando a separação nas extremidades da camada de adesivo e compressão na zona intermédia.

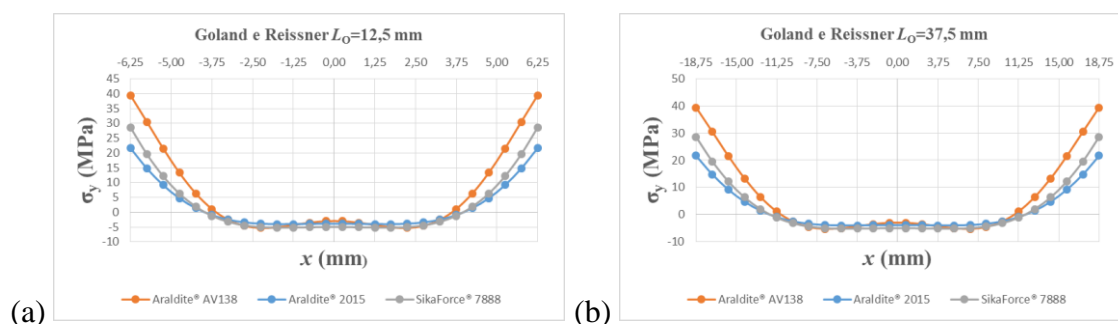


Figura 86 – Distribuição de tensões  $\sigma_y$  pelo método de Goland e Reissner para:  $L_0=12,5$  mm (a) e  $L_0=37,5$  mm (b).

É possível verificar que o adesivo Araldite® AV138, em relação aos restantes adesivos, possui gradientes mais elevados na proximidade de  $x=\pm c$ , que correspondem às extremidades da camada de adesivo. O valor de rigidez que este adesivo apresenta é bastante elevado, o que origina picos mais elevados de concentração de tensões, podendo levar à rotura prematura da junta. Os valores de  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos pelo critério da tensão  $\sigma_y$  máxima podem ser visualizados na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores de  $P_{\text{máx}}$  obtidos através do critério da tensão  $\sigma_y$  máxima pelo método de Goland e Reissner.

	$L_0$ (mm)	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7888
$P_{\text{máx}}$ (N)	12,5	3161,5	2007,5	2602,3
	25	14455,9	9243,9	11916,8
	37,5	36791,4	23517,3	30373,3
	50	73152,2	46877,9	60456,6

É apresentada na Figura 87 a comparação dos resultados obtidos através do critério da tensão  $\sigma_y$  máxima pelo método de Goland e Reissner com os dados experimentais.

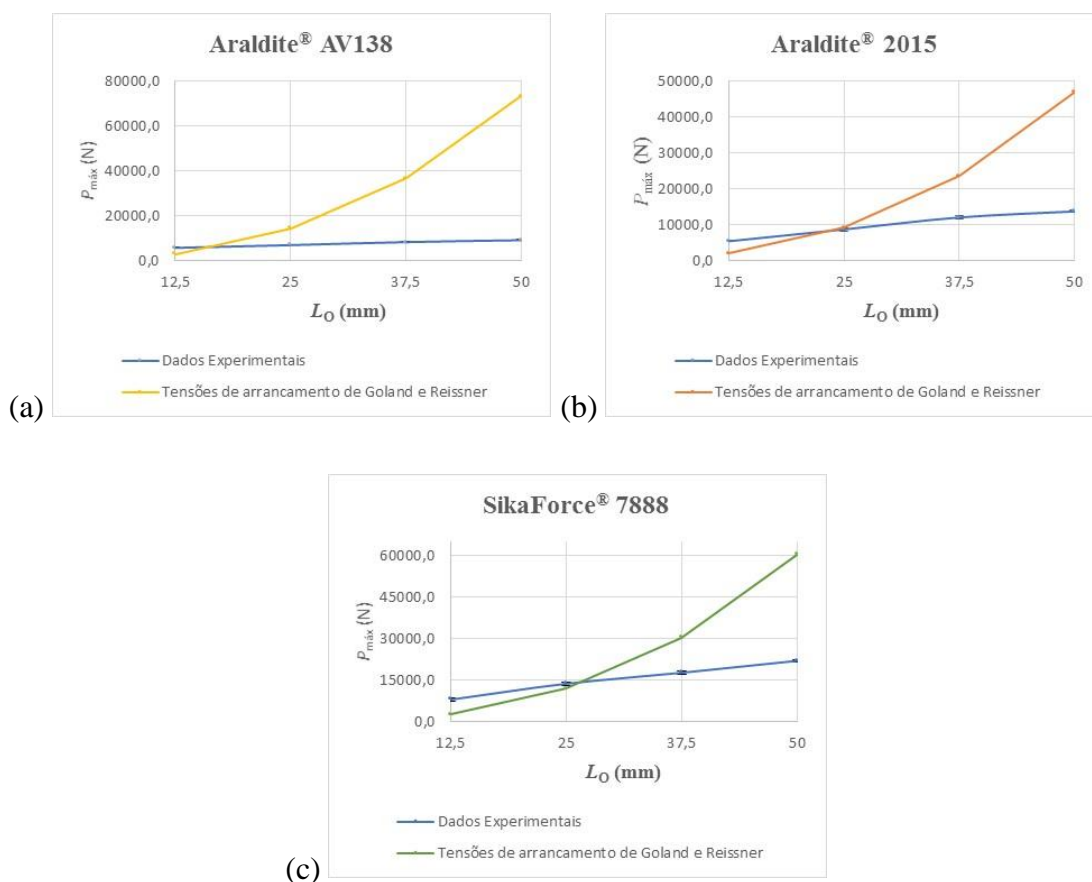


Figura 87 – Comparação entre as previsões de  $P_{\text{máx}}$  através do critério da tensão  $\sigma_y$  máxima pelo método de Goland e Reissner e os valores experimentais, para o adesivo: Araldite® AV138 (a), Araldite® 2015 (b) e SikaForce® 7888 (c).

A análise comparativa dos valores obtidos pelo critério da tensão  $\sigma_y$  máxima com os dados experimentais mostra que os valores experimentais de  $P_{\text{máx}}-L_0$  são inferiores aos valores obtidos pelo método de Goland e Reissner para  $L_0$  elevados, enquanto para valores de  $L_0$  os valores previstos de  $P_{\text{máx}}$  são inferiores para os três adesivos.

O estudo realizado pela amplitude da variância apresenta diferenças significativas. Para o Araldite® AV138 esta varia entre 2700 N ( $L_0=12,5$  mm) e 63900 N ( $L_0=50$  mm). No caso do Araldite® 2015 a diferença varia entre 3510 N ( $L_0=12,5$  mm) e 33110 N ( $L_0=50$  mm), aproximadamente. Os valores apresentados para o SikaForce® 7888 variam entre 5500 N ( $L_0=12,5$  mm) e 38360 N ( $L_0=50$  mm). A dispersão de valores mais significativa verifica-se para o adesivo Araldite® AV138.

Constata-se que, para valores pequenos de  $L_0$ , os valores obtidos experimentalmente registam algum grau de aproximação aos valores obtidos pelo método, afastando-se com o aumento de  $L_0$ . No caso do adesivo Araldite® AV138 a diferença percentual é de 46% para  $L_0=12,5$  mm e de 691% para  $L_0=50$  mm. No caso do adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=12,5$  mm a diferença é de 64% face aos 240% para  $L_0=50$  mm. No caso do adesivo SikaForce® 7888 este apresenta diferenças menos significativas com 68% para  $L_0=12,5$  mm e 174% para  $L_0=50$  mm. Em função dos resultados obtidos, conclui-se que o critério da tensão  $\sigma_y$  máxima não é adequado à previsão da resistência das JSS.

#### 4.1.3 Modelo analítico de Hart-Smith

O estudo de Hart-Smith [55] envolve a divisão do problema em quatro passos. O primeiro e principal consiste em obter o valor de  $M$  induzido nas extremidades da junta e o carregamento aplicado a meio da sobreposição. Esta quantidade define o pico da tensão  $\tau_{xy}$  e  $\sigma_y$  no adesivo. No passo seguinte é considerada a influência da tensão axial devido à flexão na resistência dos aderentes. O terceiro passo apresenta a análise da distribuição da tensão  $\tau_{xy}$  no adesivo usando a formulação elasto-plástica. Por último, é discutido o problema das tensões de  $\sigma_y$ . Segundo Hart-Smith, a distribuição das tensões  $\tau_{xy}$  é dada pela equação (31)

$$\tau_{xy} = A_2 \cosh(2\lambda' x) + C_2, \quad (31)$$

onde

$$\lambda' = \sqrt{\left[ \frac{1+3(1-\nu^2)}{4} \right] \frac{2G_a}{t_a E t}}, \quad (32)$$

$$A_2 = \frac{G_a}{t_a Et} \left[ \bar{P} + \frac{6(1-\nu^2)M}{t} \right] \frac{1}{2\lambda' \sinh(2\lambda'c)}, \quad (33)$$

$$C_2 = \frac{1}{2c} \left[ \bar{P} - \frac{A_2}{\lambda'} \sinh(2\lambda'c) \right], \quad (34)$$

$$M = \bar{P} \left( \frac{t+t_a}{2} \right) \frac{1}{1 + \xi c + \left( \frac{\xi^2 c^2}{6} \right)} e \quad (35)$$

$$\xi^2 = \frac{P}{D}. \quad (36)$$

$D$  é dado pela equação (37)

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}. \quad (37)$$

Todos os cálculos foram efectuados para cada um dos adesivos e  $L_0$ , e os valores obtidos de  $P_{\text{máx}}$  podem ser visualizados na Tabela 15. O critério utilizado para a obtenção dos valores de  $P_{\text{máx}}$  foi o critério da tensão  $\tau_{xy}$  máxima.

O valor de  $P_{\text{máx}}$  foi encontrado também neste método analítico a partir da função *SOLVER* do *EXCEL*. Os resultados computacionais foram obtidos através do procedimento da adição de restrições necessárias ao problema de modo a executar a função desejada, sendo que o valor de  $P$  encontrado seja máximo.

Tabela 15 - Valores de  $P_{\text{máx}}$  obtidos pelo método de Hart-Smith elástico.

	$L_0$ (mm)	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7888
$P_{\text{máx}}$ (N)	12,5	3079,7	2926,9	2918,7
	25	3446,0	3402,0	3331,2
	37,5	3820,9	3773,7	3690,0
	50	4207,7	4154,2	4059,1

Podem ser observadas na Figura 88 as curvas da distribuição de tensão  $\tau_{xy}$  relativamente aos três adesivos utilizando o método de Hart-Smith, para dois valores de  $L_0$ .

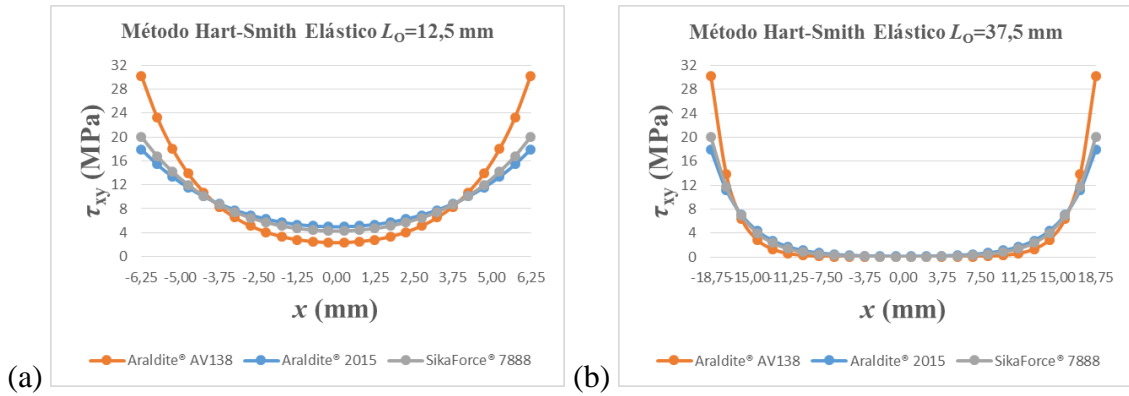


Figura 88 - Distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  pelo método Elástico de Hart-Smith para:  $L_0=12,5$  mm (a) e  $L_0=37,5$  mm (b).

A aplicação do critério da tensão  $\tau_{xy}$  máxima permitiu obter as previsões de  $P_{\max}$  apresentadas na Figura 83 e comparadas com os valores experimentais.

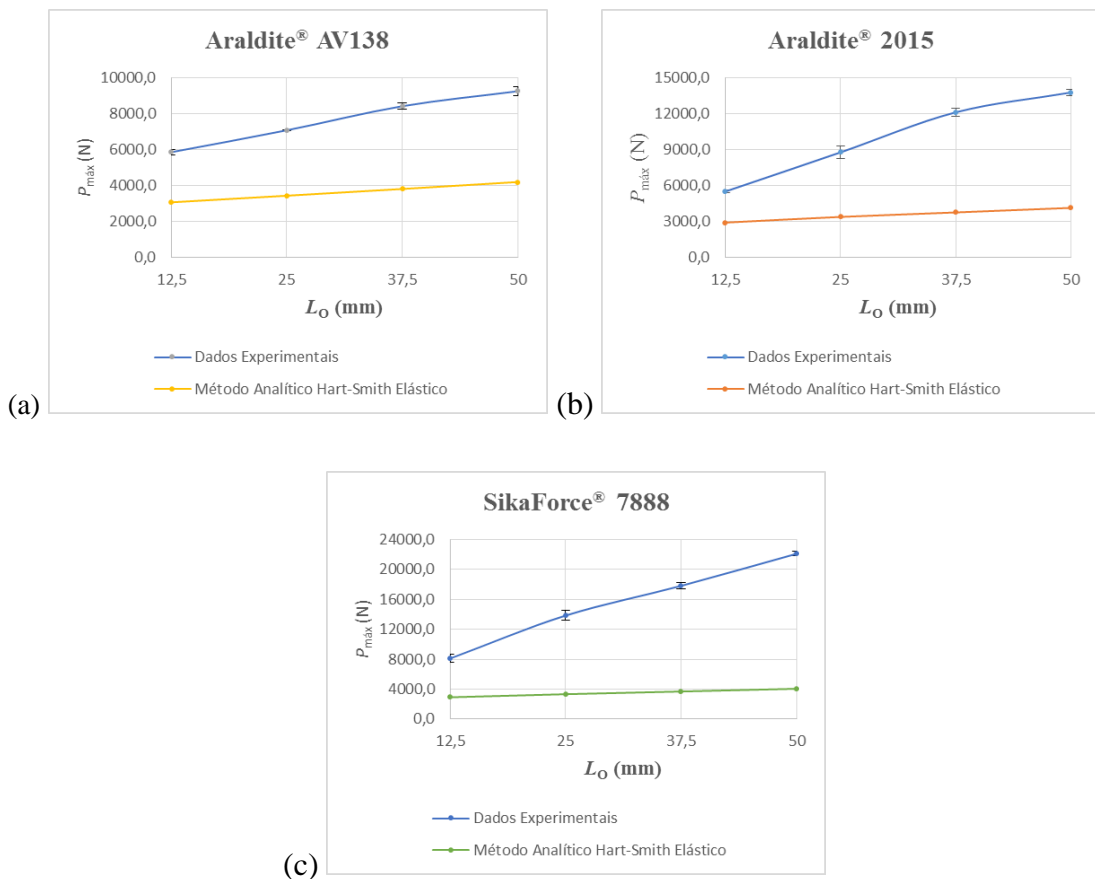


Figura 89 - Comparação entre as previsões de  $P_{\max}$  pelo método Elástico de Hart-Smith e os valores experimentais, para o adesivo: Araldite® AV138 (a), Araldite® 2015 (b) e SikaForce® 7888 (c).

No geral, verifica-se uma diferença superior nos valores obtidos em comparação com os dados experimentais, relativamente ao modelo de Volkersen. Por outro lado, as previsões são muito próximas das obtidas pelo modelo de Goland e Reissner.

A amplitude da variância apresenta também para este método valores muito mais significativos para o adesivo SikaForce® 7888 do que para os outros dois. No caso do Araldite® AV138 os valores são mais reduzidos do que para o método anterior, variando entre aproximadamente 2800 N ( $L_0=12,5$  mm) e 5040 N ( $L_0=50$  mm). Para o Araldite® 2015 a variação ocorre entre valores de aproximadamente 2600 N ( $L_0=12,5$  mm) e 9600 N ( $L_0=50$  mm). Os valores apresentados para o SikaForce® 7888 variam entre 5100 N ( $L_0=12,5$  mm) e 18000 N ( $L_0=50$  mm), aproximadamente.

No que diz respeito à diferença percentual entre valores obtidos pelo método e experimentalmente, para o caso do adesivo Araldite® AV138 regista-se uma diferença de 47 % para  $L_0=12,5$  mm e de 55 % para  $L_0=50$  mm. No caso do adesivo Araldite® 2015 a diferença percentual obtida para  $L_0=12,5$  mm é igualmente de 47 % face aos 70 % para  $L_0=50$  mm. Como seria de esperar, a diferença mais significativa acontece para o adesivo SikaForce® 7888 com 64 % para  $L_0=12,5$  mm e 82 % para  $L_0=50$  mm. O método apresenta-se pouco fiável para adesivos frágeis e ainda menos preciso para adesivos dúcteis.

Assumindo que  $x$  se encontra a meio da sobreposição da junta, Hart-Smith encontra a expressão (38) para o cálculo da distribuição de  $\sigma_y$

$$\sigma_y = A \cosh(\chi x) \cos(\chi x) + B \sinh(\chi x) \sin(\chi x), \quad (38)$$

onde

$$\chi^4 = \frac{E_a}{2Dt_a}, \quad (39)$$

$$A = -\frac{E_a M [\sin(\chi x) - \cos(\chi x)]}{t_a D \chi^2 e^{(\chi x)}} e \quad (40)$$

$$B = \frac{E_a M [\sin(\chi x) + \cos(\chi x)]}{t_a D \chi^2 e^{(\chi x)}}. \quad (41)$$

A distribuição de tensões  $\sigma_y$  em função de  $L_0$  para o método de Hart-Smith elástico está apresentada na Figura 90 para os três adesivos. No geral, à semelhança do método anterior as tensões  $\sigma_y$  continuam a apresentar magnitude inferior às tensões  $\tau_{xy}$ , excepto em zonas muito localizadas nas extremidades da ligação da junta. Na zona interior da camada de adesivo são geradas tensões de compressão e nas suas extremidades tensões de tracção, devido à curvatura ou deformação transversal da junta, governada pela deformação dos aderentes, que provoca a separação nas extremidades da camada do adesivo e a compressão na zona intermédia.

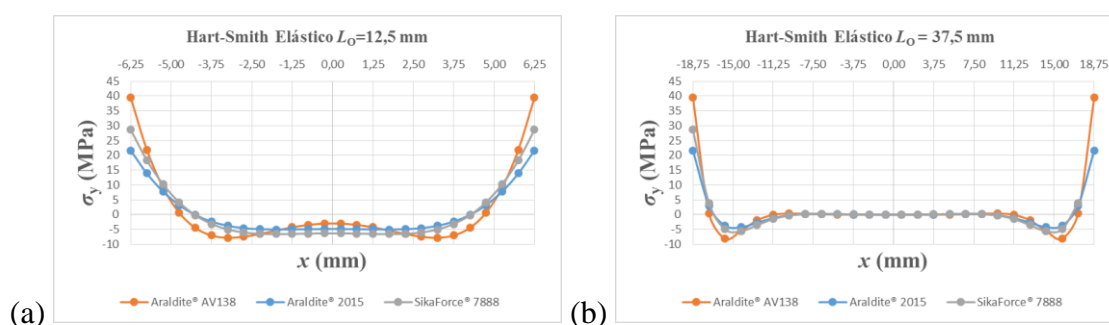


Figura 90 - Distribuição de tensões  $\sigma_y$  pelo método elástico de Hart-Smith para:  $L_0=12,5$  mm (a) e  $L_0=37,5$  mm (b).

Verifica-se que o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138, em relação aos restantes, possui gradientes de tensão mais elevados na proximidade de  $x=\pm c$ , correspondente às extremidades da camada do adesivo. Este facto deve-se ao valor de rigidez deste tipo de adesivo ser bastante elevado. A Tabela 16 mostra os valores obtidos por  $\sigma_y$  para  $P_{m\acute{a}x}$ , considerando o critério da tensão  $\sigma_y$  máxima.

Tabela 16 – Valores de  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos através do critério da tensão  $\sigma_y$  máxima pelo método de Hart-Smith elástico.

	$L_0$ (mm)	Araldite <sup>®</sup> AV138	Araldite <sup>®</sup> 2015	SikaForce <sup>®</sup> 7888
$P_{m\acute{a}x}$ (N)	12,5	7895,9	2381,1	3254,1
	25	10316,7	2779,6	3893,8
	37,5	13833,7	3241,0	4668,1
	50	19217,7	3812,2	5666,1

Na Figura 91 é apresentada a comparação dos resultados obtidos através do critério da tensão  $\sigma_y$  máxima pelo método de Hart-Smith com os dados experimentais.

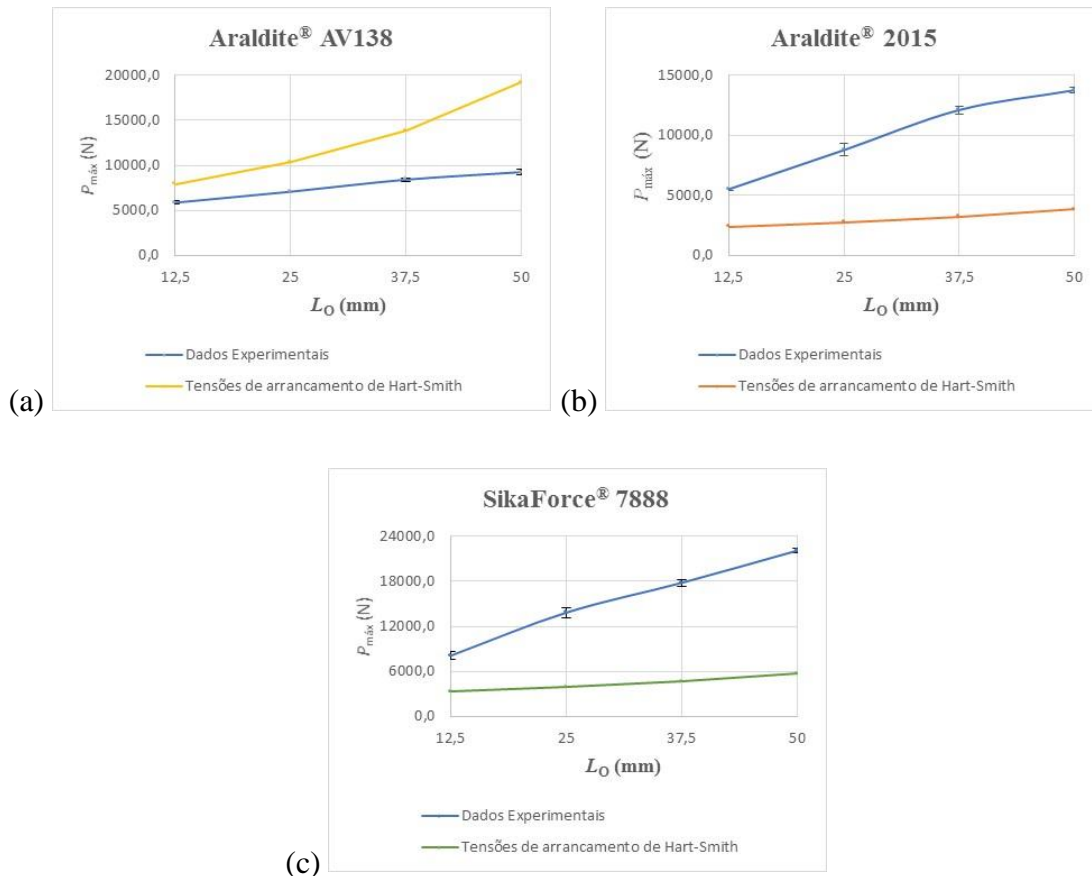


Figura 91 - Comparação entre as previsões de  $P_{m\acute{a}x}$  através do critério da tensão  $\sigma_y$  máxima pelo método elástico de Hart-Smith e os valores experimentais, para o adesivo: Araldite® AV138 (a), Araldite® 2015 (b) e SikaForce® 7888 (c).

A análise dos valores obtidos pelo critério da tensão  $\sigma_y$  máxima usando o método de Hart-Smith, em comparação com os dados experimentais, mostra que, no geral, se verifica uma diferença por defeito para dois adesivos (Araldite® 2015 e SikaForce® 7888) e se verifica uma diferença por excesso para o adesivo Araldite® AV138.

A amplitude da variância apresenta-se igualmente elevada. No caso do Araldite® AV138 os valores variam entre aproximadamente 2030 N ( $L_0=12,5$  mm) e 9970 N ( $L_0=50$  mm). Para o Araldite® 2015 a variação ocorre entre valores de aproximadamente 3140 N ( $L_0=12,5$  mm) e 9955 N ( $L_0=50$  mm). Os valores apresentados para o SikaForce® 7888 variam entre 4845 N ( $L_0=12,5$  mm) e 16430 N ( $L_0=50$  mm), aproximadamente.

Relativamente à diferença percentual entre valores obtidos pelo critério da tensão  $\sigma_y$  máxima e experimental, para o caso do adesivo Araldite® AV138 regista-se uma diferença de 35% para  $L_0=12,5$  mm e de 108% para  $L_0=50$  mm. No caso do adesivo Araldite® 2015 a diferença

percentual obtida para  $L_o=12,5$  mm é de 57% face aos 72% para  $L_o=50$  mm. A diferença para o adesivo SikaForce® 7888 e  $L_o=12,5$  mm é de 60% e, para  $L_o=50$  mm, esta é de 74%. Verifica-se que, igualmente ao observado para o método de Goland e Reissner, também pelo método de Hart-Smith, o adesivo que apresenta mais diferenças percentuais é o Araldite® AV138. Desta forma, conclui-se que o método considerado não é o mais adequado para a previsão da resistência destas juntas adesivas.

Hart-Smith também considerou o efeito da plasticidade da camada de adesivo. Neste caso, a tensão  $\tau_{xy}$  é modelada usando uma aproximação bi-linear elasto-perfeitamente plástica. A camada de adesivo é dividida em três regiões, uma região elástica central de comprimento  $l$  e duas regiões exteriores plásticas de comprimento  $d$ . A zona plástica aumenta com a solicitação aplicada, conforme pode ser visualizado na Figura 92, onde as linhas a vermelho indicam o comportamento elástico da distribuição de tensão, enquanto as linhas a azul indicam a plastificação da tensão do adesivo.

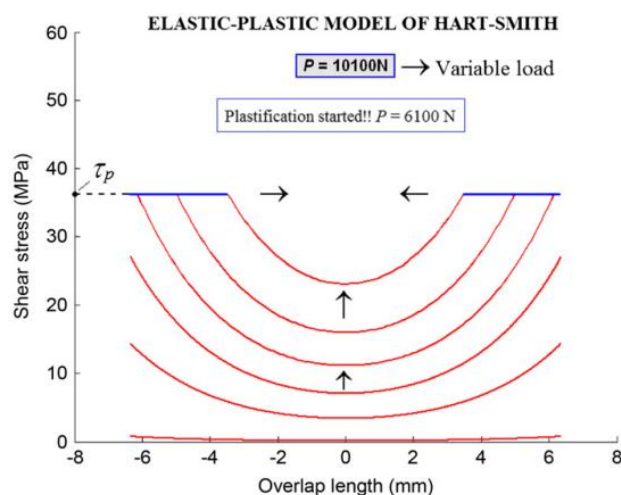


Figura 92 – Processo de plastificação no modelo de Hart-Smith Elasto-Plástico [13]

Quando o adesivo plastifica na totalidade ( $d=0$ ), a junta atinge um ponto onde não é possível ser aplicada mais carga, significando que o adesivo cedeu completamente. Este estado é chamado de "cedência global" [36]. A rotura da junta adesiva começa assim que este estado de "cedência global" é atingido.

A formulação proposta por Hart-Smith [55] é complexa e requer um processo iterativo para a sua resolução. No entanto, é possível encontrar  $P_{\text{máx}}$  através da aplicação de algumas simplificações [13]. No presente caso foi usado o método descrito no subcapítulo seguinte,

em que se considerou por aproximação  $d=0$ , e que corresponde também à aproximação de Adams [58].

#### 4.1.4 Tensão de cedência generalizada

O modelo simples de Adams [58] prevê a cedência global do adesivo. Este modelo é baseado no conceito da cedência global, que considera que, no momento da rotura a totalidade do adesivo se encontra sujeito ao nível de tensões  $\tau_{xy}$  igual ao limite do adesivo. Os valores de  $P_{\text{máx}}$  pelo método da tensão de cedência generalizada são conseguidos através da expressão (6). Os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 17.

Tabela 17 – Valores de  $P_{\text{máx}}$  obtidos pelo método da cedência generalizada.

	$L_0$ (mm)	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7888
$P_{\text{máx}}$ (N)	12,5	9437,5	5593,8	6250,0
	25	18875,0	11187,5	12500,0
	37,5	28312,5	16781,3	18750,0
	50	37750,0	22375,0	25000,0

Foram efectuadas comparações entre os valores obtidos para o método da tensão de cedência generalizada com os valores obtidos experimentalmente, como tem vindo a ser feito com todos os métodos. Os resultados podem ser visualizados na Figura 93. De um modo geral é possível verificar que existe uma grande disparidade de valores para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 e uma grande aproximação para o adesivo SikaForce® 7888.

A interpretação dos valores pelo estudo da variância indica a existência de amplitudes em alguns casos muito significativas nos valores obtidos. Tanto o Araldite® AV138 como o Araldite® 2015 apresentam uma variação progressivamente mais acentuada com o aumento de  $L_0$ . A variância para a junta com o adesivo Araldite® AV138 e  $L_0=12,5$  mm é de 3572,9 N e atinge o valor de 28501,3 N para  $L_0=50$  mm, correspondendo a uma diferença percentual de 61% para o primeiro caso de 308% para o último caso, comparativamente aos valores experimentais. No caso do adesivo Araldite® 2015, a variância é de 73,2 N para  $L_0=12,5$  mm e de 8607 N para  $L_0=50$  mm, o que em termos percentuais significa uma diferença de 1% para  $L_0=12,5$  mm e de 63% para  $L_0=50$  mm. Relativamente ao adesivo SikaForce® 7888, foram obtidos valores bastante diferentes dos anteriores adesivos, como esperado, correspondendo a uma variância de aproximadamente 1850 N para  $L_0=12,5$  mm (25%) e de 2900 N para  $L_0=50$  mm (13%), o que significa que este método é muito adequado para este

tipo de adesivos (dúcteis) e muito pouco adequado para adesivos frágeis. Pode ainda ser acrescentado que a menor diferença percentual encontrada para este adesivo corresponde a  $L_0=37,5$  mm com o valor de 5% e a maior corresponde a  $L_0=12,5$  mm (25%).

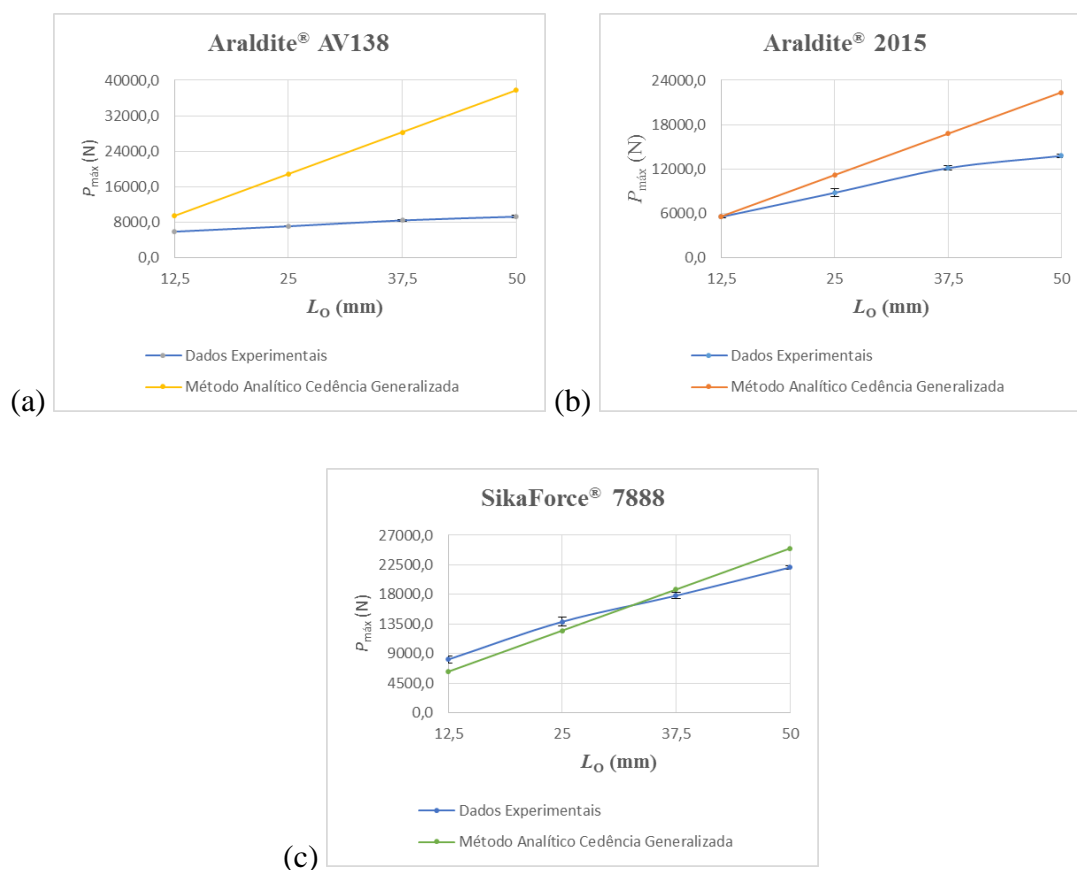


Figura 93 – Comparação de  $P_{m\acute{a}x}$  entre o método da cedência generalizada e os valores experimentais, para o adesivo: Araldite® AV138 (a), Araldite® 2015 (b) e SikaForce® 7888 (c).

#### 4.1.5 Comparação entre os vários métodos analíticos

Na Figura 94, Figura 95 e Figura 96 estão apresentadas as curvas relativas a todos os métodos numéricos abordados para cada um dos três adesivos, Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7888. Em cada uma das figuras podem ser observados com maior clareza a aproximação ou afastamento dos métodos mencionados anteriormente. De um modo geral, o método da tensão de cedência generalizada destaca-se dos restantes em excesso para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Os métodos restantes apresentam uma discrepância bastante elevada relativamente aos dados experimentais.

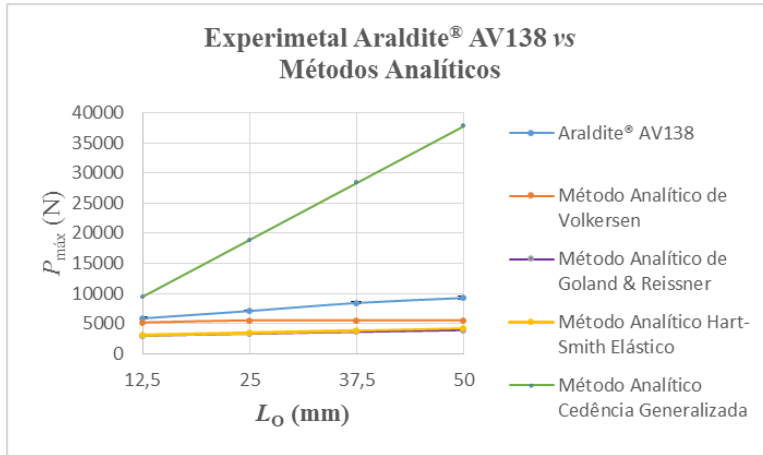


Figura 94 – Comparação entre os dados obtidos experimentalmente com os métodos analíticos para o Araldite® AV138.

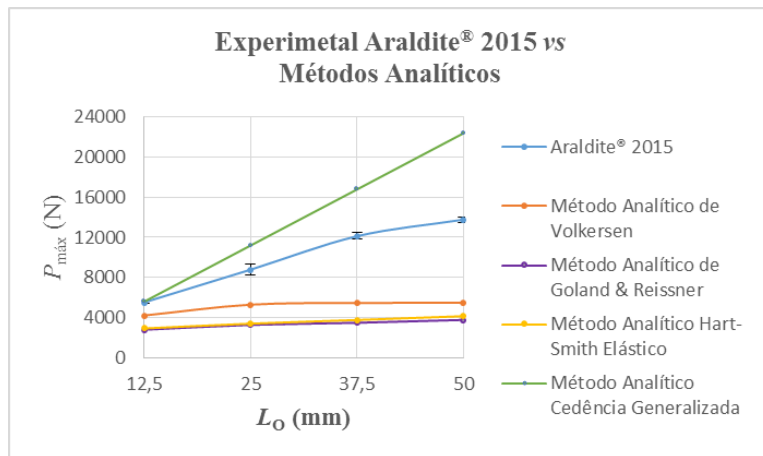


Figura 95 – Comparação entre os dados obtidos experimentalmente com os métodos analíticos para o Araldite® 2015.

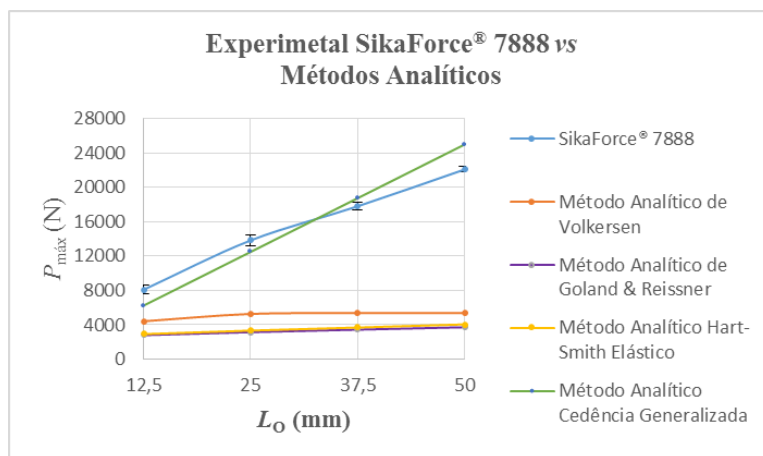


Figura 96 – Comparação entre os dados obtidos experimentalmente com os métodos analíticos para o SikaForce® 7888.

## 4.2 Modelos de dano coesivo

Neste subcapítulo apresenta-se a previsão de resistência das juntas pela técnica de MDC. Inicialmente faz-se uma exposição das condições de análise numérica recorrendo à utilização de um *software* computacional de análise por MEF (Abaqus®). De seguida, procede-se à descrição dos processos utilizados para determinação das propriedades coesivas. Como resultados apresentam-se os modos de rotura e é efectuada a comparação dos valores de  $P_{\text{máx}}$  obtidos numericamente com os valores obtidos por via experimental.

### 4.2.1 Condições da análise numérica

A análise numérica é baseada no MEF e, para tal, foi escolhido o *software* ABAQUS®, versão 6.13 (Dassault Systèmes). É um *software* que, para além de possuir uma extensa biblioteca de elementos e grande aplicação em diversos trabalhos na área da adesão, permite a utilização do módulo integrado de MDC para prever a resistência das JSS. Apresentam-se de seguida os procedimentos de pré-processamento da modelação em MEF, fazendo referência aos módulos de *software* em que a informação foi introduzida: *Parts*, *Property*, *Assembly*, *Step*, *Load* e *Mesh*.

A análise de MEF tem por base a utilização de elementos sólidos de 4 nós para a modelação dos substratos (CPE4 do ABAQUS®) e elementos coesivos para a camada do adesivo (COH2D4 do ABAQUS®). Para tal, utilizou-se uma análise 2D como aproximação da geometria em análise, que fornece resultados precisos para este tipo de geometrias. Os aderentes foram modelados como sólidos elasto-plásticos e o adesivo foi modelado com elementos MDC utilizando o *software* computacional indicado (Figura 97).

O MDC usado é o modelo de dano triangular que existe no ABAQUS® e que se encontra descrito na secção 2.3.3. Este modelo caracteriza adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivo e requer poucos parâmetros para a simulação.

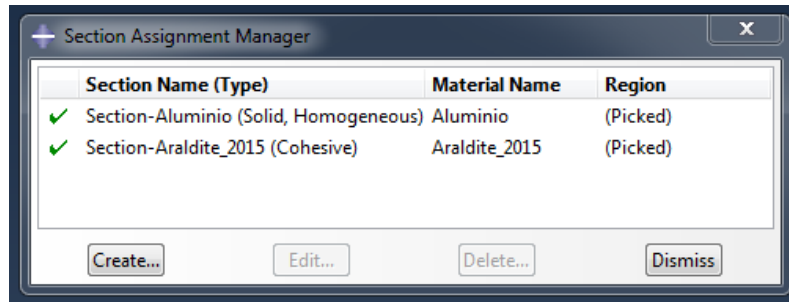


Figura 97 – Atribuição das secções dos substratos e adesivo para análise por MDC no ABAQUS®.

É de salientar que na interface gráfica existem vários passos que devem ser completados de forma sequencial. Deste modo, são de seguida descritas as operações realizadas na criação das JSS através da interface do ABAQUS®.

### 1º Passo - Part

Neste passo foi efectuado o desenho da junta adesiva, tal como mostra a Figura 98. Para modelar os substratos e o adesivo desenhou-se apenas um corpo, que foi posteriormente dividido em partições para a atribuição dos respectivos materiais. Na camada do adesivo, modelada por elementos MDC, considerou-se apenas um elemento na direcção de  $t_A$ . A modelação dos aderentes foi efectuada com elementos sólidos de quatro nós (CPE4 do ABAQUS®) de estado plano de deformação. Na análise de rotura por MDC considerou-se o comportamento não linear geométrico das juntas.



Figura 98 – JSS modelada no ABAQUS®

Na simulação numérica foram construídos modelos com as dimensões de cada configuração de junta testada. A Figura 99 mostra a construção de uma junta com  $L_0=12,5$  mm.

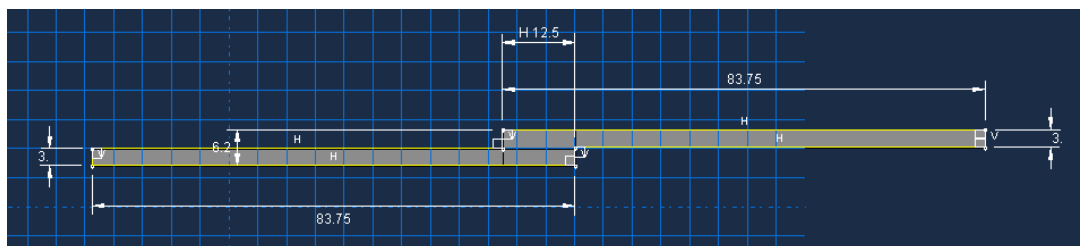


Figura 99 - Desenho 2D de uma junta com  $L_0=12,5$  mm no ABAQUS®.

Após o desenho do conjunto substratos-adesivo foi necessário efectuar partições por forma a atribuir diferentes propriedades e diferentes comportamentos às secções (Figura 100).

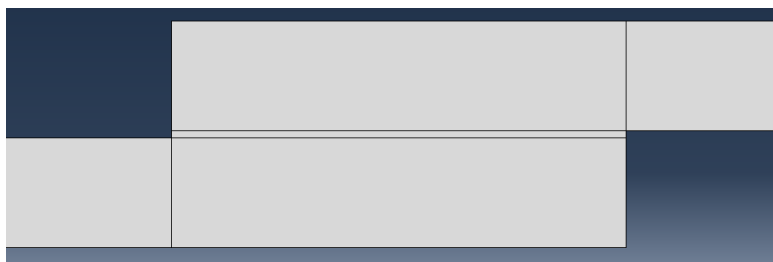


Figura 100 - Diferentes partições na simulação das juntas no ABAQUS®.

As partições criadas devem isolar diferentes zonas da junta, como a camada de adesivo com  $t_A=0,2$  mm e os aderentes.

### 2º Passo – Property

As propriedades mecânicas das partições anteriormente criadas são atribuídas nesta secção (adesivo e substratos). Também neste módulo são criados os materiais, as secções e são atribuídas secções às respectivas partições.

Na análise por MDC o adesivo é modelado pela aproximação contínua, com uma única linha de elementos coesivos e uma lei de tracção-separação triangular, incluindo a rigidez da camada adesiva.

### 3º Passo – Assembly

Como os modelos são constituídos por um componente (embora dividido em partições relativas aos diferentes constituintes da junta), não é necessário executar nenhuma operação neste passo.

### 4º Passo – Step

É nesta secção que os parâmetros de computação da simulação são introduzidos. Na Figura 101 estão descritos os incrementos utilizados e o tamanho dos incrementos. De modo a evitar a paragem da análise por exceder o número de incrementos permitido, foi considerado um valor de 10000 para o número máximo de incrementos a realizar na análise, para evitar o terminar da mesma por ter sido atingido o valor limite de incrementos. Considerou-se um tamanho inicial de incremento de 1% do deslocamento aplicado nos modelos. O tamanho

máximo do incremento foi também fixo em 1% do deslocamento aplicado. O tamanho mínimo do incremento foi um valor extremamente reduzido para contabilizar a redução de tamanho do incremento que o *software* tem necessidade de aplicar durante a fase da propagação de dano para evitar os problemas de convergência associados.

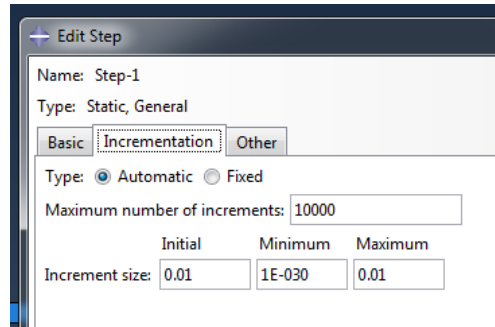


Figura 101 – Definição de incrementos para análise no ABAQUS®.

#### 5º Passo – Interaction

Não é necessário executar nenhuma acção neste módulo devido aos modelos serem constituídos por uma única peça.

#### 6º Passo – Load

De modo a simular o carregamento de tracção é necessário aplicar condições fronteira à junta adesiva. Na Figura 102 é possível visualizar as condições fronteira utilizadas nas simulações realizadas no ABAQUS®. Numa das extremidades do substrato é simulado um encastramento, enquanto na outra extremidade é aplicado um deslocamento horizontal de 1 mm e uma restrição vertical à secção.

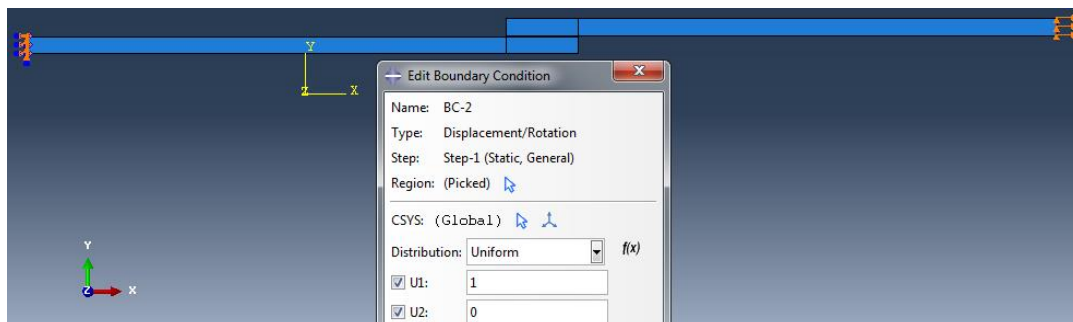


Figura 102 – Representação das condições fronteira na simulação.

### 7º Passo – Mesh

Neste passo de construção do modelo é efectuada a discretização da geometria em elementos finitos. As zonas onde ocorrem os maiores gradientes de tensão devem ser o mais refinadas possível. Na junta adesiva existe uma variação das dimensões da malha, mais refinada na zona da camada adesiva e nas suas proximidades, como mostra a Figura 103, onde se verifica que as zonas mais perto das extremidade da sobreposição estão mais refinadas do que o centro da junta.

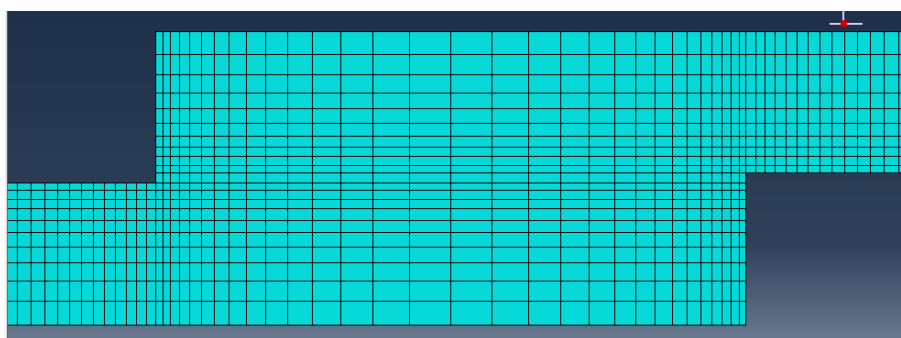


Figura 103 – Detalhe da malha do MEF na zona de sobreposição para uma junta com  $L_0=12,5$  mm.

Devido à necessidade de obter valores com elevada precisão foram atribuídos valores ao número de elementos e ao *bias ratio*, em função de  $L_0$ . Por exemplo, para  $L_0=12,5$  mm existem 15 elementos do meio para extremidade da sobreposição e no caso de  $L_0=50$  mm consideraram-se 55 elementos. Os diferentes valores atribuídos têm como finalidade a redução do esforço computacional, garantindo simultaneamente que a precisão dos resultados em zonas com grandes variações de tensões não é comprometida. O *bias ratio* é definido como o rácio de refinamento crescente ao longo de uma aresta do modelo.

### 8º Passo – Job

É nesta secção que se dá início à simulação da junta. Aqui é inserido o nome e a capacidade computacional que se pretende dedicar à simulação. De seguida submete-se a simulação e, caso seja desejado, segue-se a evolução da análise. Através do comando “*Results*” passa-se para o passo seguinte.

### 9º Passo – *Visualization*

Nesta secção visualiza-se os resultados obtidos para a junta adesiva. Na Figura 104 é possível observar uma JSS com  $L_0=12,5$  mm após rotura completa da camada de adesivo. Depois de terminada a simulação, procede-se à análise dos resultados para produzir as curvas  $P-\delta$ . Através do “output” da criação de dados XY, somam-se todas as reacções do encastramento e são retirados os valores do deslocamento para criar as curvas  $P-\delta$ .

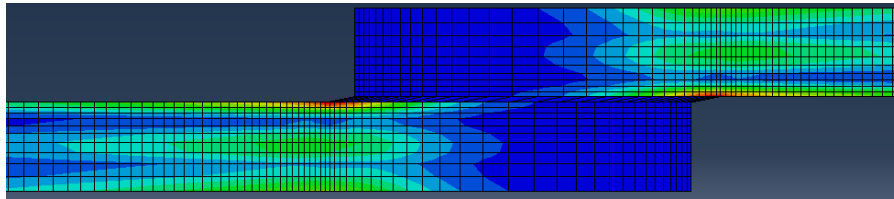


Figura 104 – Deformação de uma JSS após simulação.

#### 4.2.2 Determinação das propriedades coesivas

De modo a caracterizar as leis coesivas em tracção e corte dos é necessário conhecer  $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$ . No passado foram publicados alguns estudos que por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos em ensaios de adesivo maciço [90, 106]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias e propagação de fenda tipicamente em modo misto, levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [115, 116, 117]. Assim sendo, é recomendada a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados.

#### Araldite® AV138

Na determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138 foi utilizado um método inverso num trabalho anterior [118]. No entanto, devido à não existência de ensaios de caracterização à fractura, o procedimento seguido foi ligeiramente diferente do procedimento mais indicado. Neste caso, foram utilizados os valores de resistência à tracção e corte através de ensaios de adesivo maciço e de corte designados por *Thick Adherend Shear Test* (TAST), respectivamente, para a definição de  $t_n^0$  e  $t_s^0$ . Estes valores foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas, utilizando inicialmente valores típicos de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  para adesivos frágeis. As leis obtidas para tracção e corte foram então utilizadas

no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a JSS com  $L=20$  mm), e as leis do adesivo foram estimadas por ajuste das curvas  $P - \delta$  numéricas e experimentais, até obter valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  que reproduzam os resultados experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas com resultados bastante satisfatórios. Os valores de  $E$  e  $G$  foram também determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e corte (TAST). No referido trabalho [105] foi concluído que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades do adesivo. Na Tabela 14 estão apresentados os parâmetros utilizados na simulação da camada de adesivo Araldite® AV138, numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 18 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para o adesivo Araldite® AV138 [105].

$E$	$G$	$t_n^0$	$t_s^0$	$G_{IC}$	$G_{IIC}$
4890	1560	39,45	30,2	0,2	0,38
<b>MPa</b>				<b>N/mm</b>	

### **Araldite® 2015**

As leis coesivas da camada de adesivo no caso do adesivo Araldite® 2015 foram igualmente determinadas num trabalho anterior [118], por um método inverso para a determinação de  $t_n^0$  e  $t_s^0$ . Esta metodologia consiste basicamente na determinação de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  através de ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) e *End-Notched Flexure* (ENF), respectivamente, usando um método ou teoria apropriados para a sua obtenção. O valor de  $G_{IC}$  ou  $G_{IIC}$  é então utilizado para construção de uma lei coesiva no modo puro correspondente, que inicialmente tem um valor aproximado de  $t_n^0$  ou  $t_s^0$ , estimado em função das características do adesivo. A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tracção ou ENF para corte), com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de  $t_n^0$  ou  $t_s^0$  é então definido utilizando um procedimento de ajuste entre as curvas  $P-\delta$  numéricas e experimentais do respectivo teste de caracterização à fractura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo.

Na Tabela 19 estão apresentados os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® 2015 numa lei coesiva de modo misto [119]. Os valores de  $E$  e  $G$  foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço [120] e ensaios TAST, respectivamente.

Tabela 19 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para o adesivo Araldite® 2015 [118].

$E$	$G$	$t_n^0$	$t_s^0$	$G_{IC}$	$G_{IIC}$
1850	650	21,63	17,9	0,43	4,7
<b>MPa</b>				<b>N/mm</b>	

**SikaForce® 7888**

No caso do adesivo SikaForce® 7888 não se encontram disponíveis até à data as propriedades coesivas obtidas por métodos inversos. Neste adesivo, foram utilizados como aproximação valores de  $t_n^0$  e  $t_s^0$  obtidos por ensaios de adesivo maciço e por dados do fabricante, respectivamente. Para os valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  foram utilizados valores obtidos por ensaios DCB e por ENF, pela respectiva ordem.

Tabela 20 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para o adesivo SikaForce® 7888 [44].

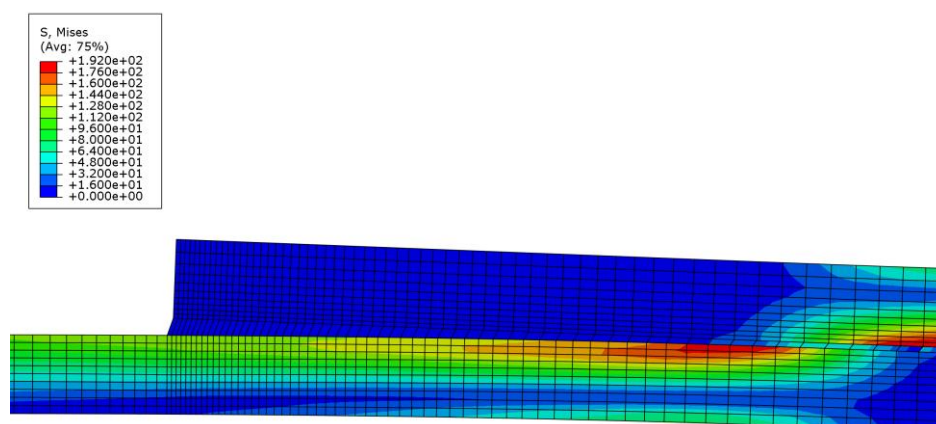
$E$	$G$	$t_n^0$	$t_s^0$	$G_{IC}$	$G_{IIC}$
1890	727	28,6	20	1,18	8,72
<b>MPa</b>				<b>N/mm</b>	

A generalidade dos valores presentes na Tabela 20 foram obtidos experimentalmente [44], à excepção de  $G$ ,  $t_s^0$  e  $G_{IC}$ . Para  $G_{IC}$  não foi utilizado o valor obtido experimentalmente [109], devido à obtenção de roturas parcialmente adesivas indicativas de uma medição incorrecta desse valor. Em alternativa, foi utilizado o valor obtido por [121], em que  $G_{IC}$  foi definido num ensaio DCB de provetes em compósito de fibra natural de juta com matriz de epóxico, do qual resultaram roturas coesivas do adesivo. Para os valores de  $G$  e  $t_s^0$  foram considerados os valores do fabricante. Os valores de  $E$  e  $t_n^0$  foram obtidos através de ensaios de adesivo maciço a uma velocidade de 1 mm/min [44], com recurso a um extensómetro fixo na zona de menor secção do provete. Foram registados os valores de  $P$  e  $\delta$  até ocorrer a rotura sendo posteriormente tratados no *software* Microsoft Excel®.

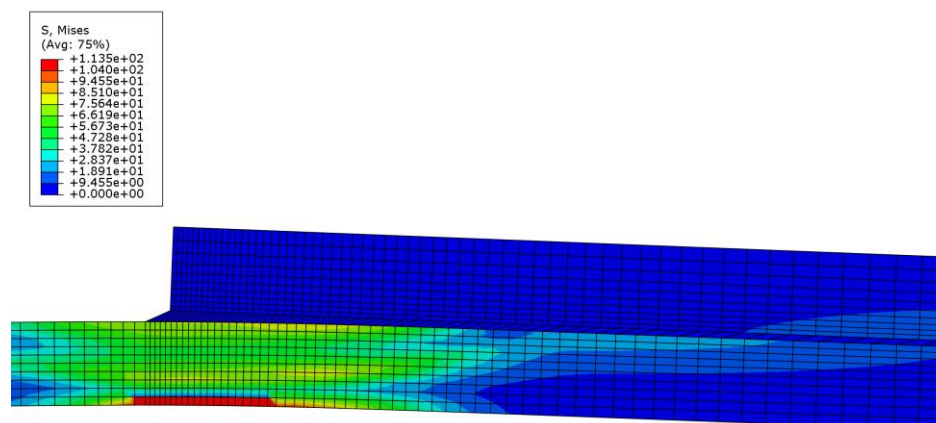
**4.2.3 Previsão da resistência**

Na análise numérica por MDC, para a previsão da resistência, foi usada uma abordagem contínua de modelação da camada adesiva e os aderentes foram considerados materiais elástico-plásticos. A iniciação do dano ocorreu nas extremidades de sobreposição da junta propagando-se para a região interior da ligação adesiva, em todas as simulações. Os modos de rotura coesiva obtidos podem ser observados por dois exemplos seleccionados com os

adesivos Araldite® AV138 (adesivo frágil) e SikaForce® 7888 (adesivo dúctil), para  $L_0=50$  mm (Figura 105).



(a)



(b)

Figura 105 –Rotura numa JSS obtida por MDC, para os adesivos: (a) Araldite® AV138 e (b) SikaForce® 7888, com  $L_0=50$  mm.

Apresenta-se uma comparação das curvas  $P-\delta$  obtidas experimentalmente e numericamente pelo MDC, para as juntas com o adesivo Araldite® AV138 e  $L_0=25$  mm (Figura 106 a), com o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=37,5$  mm (Figura 106 b), para as juntas com o adesivo SikaForce® 7888 e  $L_0=50$  mm (Figura 106 c).

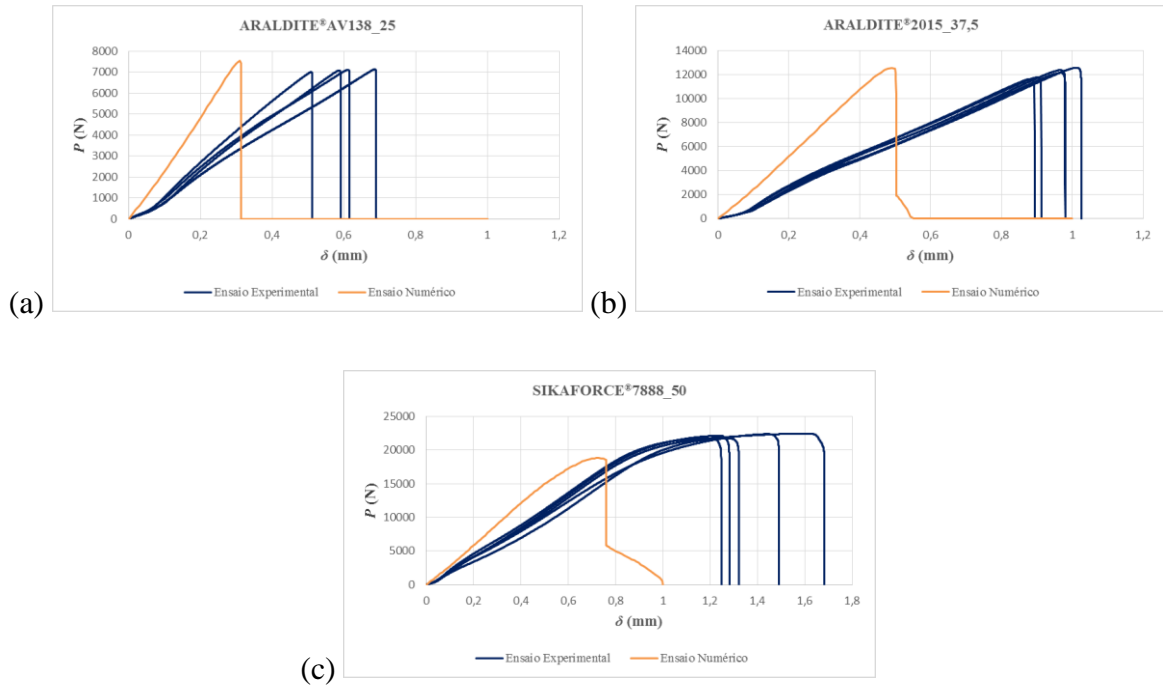


Figura 106 – Curvas  $P - \delta$  obtidas experimentalmente e numericamente pelo MDC: (a) adesivo Araldite® AV138 ( $L_0=25$  mm), (b) adesivo Araldite® 2015 ( $L_0=37,5$  mm) e (c) adesivo SikaForce® 7888 ( $L_0=50$  mm).

A correlação geral é bastante aceitável, nomeadamente para as juntas adesivas com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, em relação aos parâmetros de  $P_{m\acute{a}x}$ , rigidez e deslocamento de rotura. No caso do adesivo Sikaforce® 7888, os resultados experimentais de  $P_{m\acute{a}x}$  superam os numéricos, assunto que será abordado posteriormente.

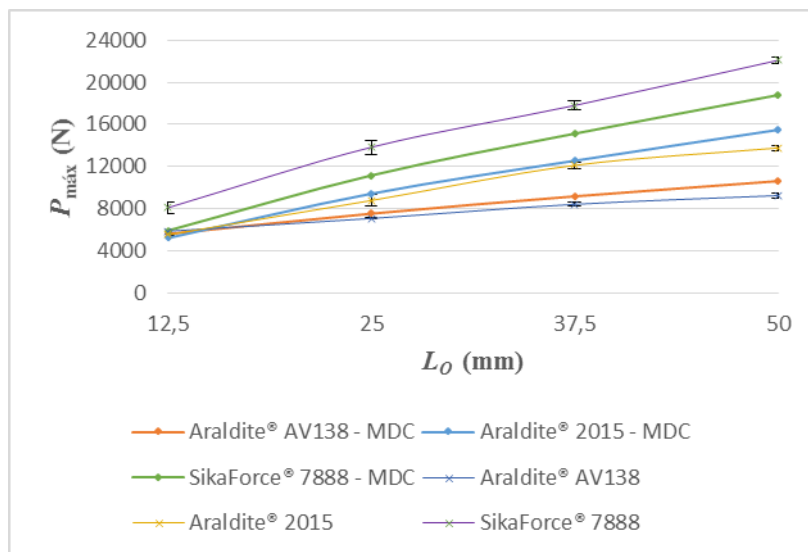


Figura 107 – Comparação entre os valores experimentais e numéricos de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  e do adesivo.

A Figura 108 apresenta uma comparação entre os valores de  $P_{\text{máx}}$  obtidos experimentalmente (com os respectivos desvios padrão) e os valores numéricos obtidos pelo MDC em função de  $L_0$ , para os três adesivos.

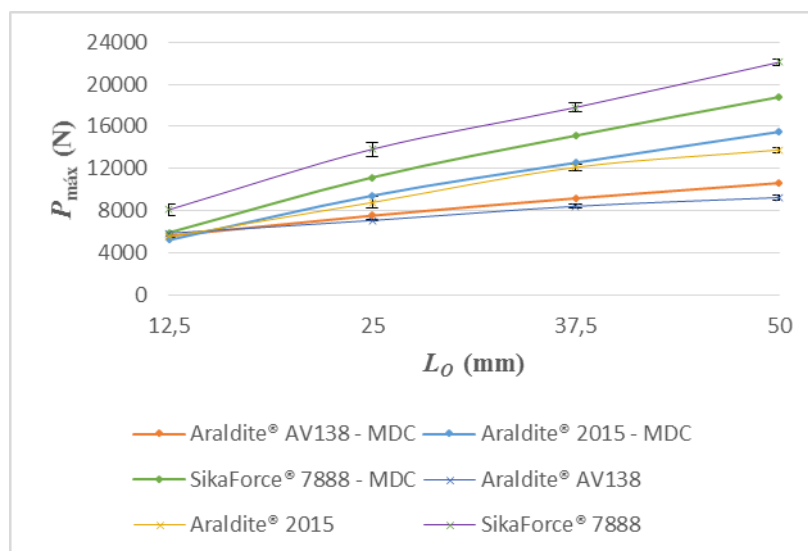


Figura 108 – Comparação entre os valores experimentais e numéricos de  $P_{\text{máx}}$  em função de  $L_0$  e do adesivo.

Verifica-se, de um modo geral, que os valores obtidos por MDC e experimentais relativamente a  $P_{\text{máx}}$  apresentam valores muito próximos para as juntas coladas com os adesivos Araldite® 2015 e Araldite® AV138. No caso das juntas coladas com o adesivo SikaForce® 7888, os valores de  $P_{\text{máx}}$  obtidos pelo método numérico são bastante inferiores aos valores experimentais. Contudo, a diferença é praticamente constante para todos os valores de  $L_0$ . Verificou-se um erro máximo de 9,8% para o adesivo Araldite® AV138, 7,7% para o adesivo Araldite® 2015 e, por último, 19,7% para o adesivo Sikaforce® 7888. Assim, é possível concluir que o método numérico utilizado é bastante preciso para adesivos frágeis e moderadamente preciso para adesivos dúcteis. É de salientar que, para as juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7888, os valores experimentais de  $P_{\text{máx}}$  diferem claramente daqueles obtidos pelo MDC, sendo que esta diferença está relacionada com a elevada plasticidade deste adesivo, tornando desajustada a utilização de leis coesivas triangulares. Em função das características do adesivo, seria mais adequada uma lei trapezoidal [107]. Contudo, apesar de a lei aplicada não ser a adequada para a totalidade dos adesivos escolhidos, esta lei permite obter uma noção geral do comportamento das juntas adesivas.

## 4.3 Método de Elementos Finitos Extendido

Em último lugar, considera-se o MEFE para previsão da resistência das juntas adesivas testadas neste trabalho. Começa-se por abordar as condições de análise numérica impostas no ABAQUS® para o MEFE. São também determinadas as propriedades de dano a utilizar na análise por MEFE para os diferentes critérios de iniciação de dano considerados. De seguida, é efectuado um estudo onde se comparam os resultados numéricos obtidos através de cada um destes critérios com os resultados obtidos experimentalmente, para os três adesivos. Pretende-se assim analisar a capacidade do MEFE na previsão da resistência das juntas, em função das características de cada adesivo. São ainda definidas as principais desvantagens deste método aplicado a juntas adesivas.

### 4.3.1 Condições da análise numérica

Também foi escolhido o *software* ABAQUS®, que possui um módulo integrado de MEFE, para a realização da análise numérica na previsão da resistência das JSS. Posteriormente, através de diferentes critérios introduzidos é efectuada uma análise dos vários componentes, previamente descritos no subcapítulo 2.3.5.

Os elementos da junta adesiva, adesivo e aderentes, foram modelados no *software* ABAQUS® como sólidos (Figura 109). Foi usada uma formulação enriquecida para os deslocamentos no interior do elemento, para simular o início e propagação do dano pelo MEFE.

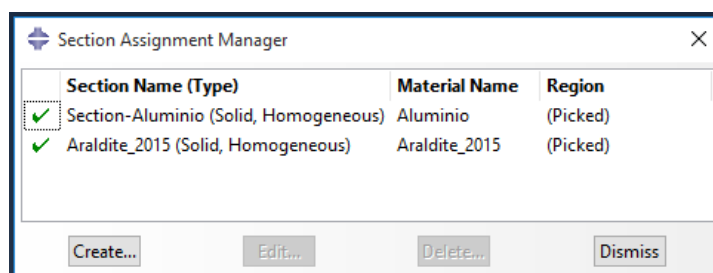


Figura 109 – Atribuição das secções dos substratos e adesivo no ABAQUS® na análise por MEFE.

À semelhança dos MDC, foram consideradas não linearidades geométricas no MEFE. O objectivo de tais não linearidades é o de simular com precisão as deformações (longitudinal e transversa) nos modelos numéricos. O mesmo acontece para o refinamento da malha. Para

os modelos numéricos e independentemente do critério utilizado, o refinamento utilizado é idêntico ao do MDC. A malha foi construída por uma fila de elementos na camada adesiva com as dimensões 0,2 mm por 0,2 mm, uma vez que em trabalhos anteriores foi definido que um tamanho de elemento semelhante a  $t_A$  fornece resultados aceitáveis pelo MEF [90]. Na elaboração das malhas para as diferentes juntas, foram considerados e aplicados os mesmos passos descritos para o MDC, onde o *bias ratio* e os números de elementos utilizados nos modelos foram igualmente idênticos aos da análise numérica usada nos MDC.

A modelação das juntas foi efectuada a duas dimensões. As condições impostas são idênticas às condições reais do ensaio experimental: uma das extremidades da junta é fixa enquanto na extremidade oposta é aplicada uma restrição vertical e um deslocamento de tracção.

### 4.3.2 Critérios utilizados para a previsão do início do dano

Os critérios utilizados para a formulação teórica do MEF foram descritos anteriormente no subcapítulo 2.3.5. No presente subcapítulo descrevem-se os critérios utilizados para a previsão do início do dano.

O MEF considera que os materiais assumem um comportamento inicial linear elástico. O início da degradação é simulado através de critérios de iniciação de dano. Os critérios considerados para este estudo foram os critérios MAXE e MAXS. Segundo o critério MAXE, o início do dano ocorre quando o rácio entre a deformação normal e o respectivo valor limite, ou o rácio entre a deformação de corte e o respectivo valor limite, atingir a unidade (o que ocorrer primeiro). No critério MAXS, o dano inicia quando o rácio entre a tensão normal e o respectivo valor limite, ou o rácio entre a tensão de corte e o respectivo valor limite, atingir a unidade (o que ocorrer primeiro). Existem outros critérios de iniciação de dano, tais como o MAXPE e o MAXPS, que são critérios baseados nas deformações e tensões principais máximas, respectivamente, comparados posteriormente com os respectivos valores limites dos adesivos, ou ainda, os critérios QUADE e QUADS. Estes dois critérios são baseados em deformações e tensões, respectivamente, em que é utilizada uma função quadrática que combina os respectivos valores de tracção e corte para prever a iniciação do dano.

As leis tracção-separação simulam a degradação do material, que pode ser linear ou exponencial. A lei de degradação escolhida neste trabalho foi a lei linear, que consiste na

redução proporcional das tensões transmitidas em função dos deslocamentos, até se dar a rotura completa.

### 4.3.3 Determinação das propriedades de dano

Para a análise pelo MEFÉ, além das propriedades  $E$ ,  $G$ ,  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  é ainda necessário conhecer os valores de  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e de  $\varepsilon_{m\acute{a}x}$  para os diferentes critérios. Independentemente do tipo de adesivo,  $\sigma_{m\acute{a}x}$  foi igualado à tensão de rotura à tracção e  $\varepsilon_{m\acute{a}x}$  foi igualado à deformação de rotura à tracção, pela proximidade das suas características. Algumas destas propriedades foram determinadas pelo fabricante. Por outro lado, os valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  para o adesivo Araldite® AV138 foram estimados [105]. O módulo  $G$  para o adesivo SikaForce® 7888 foi estimado pela Lei de Hooke.

#### Araldite® AV138

A Tabela 11 apresenta os parâmetros do adesivo Araldite® AV138 utilizados para a análise pelo MEFÉ, considerando os critérios de início de dano MAXE e MAXS. No critério de deformação (MAXE) foram usados os valores de  $\varepsilon_{m\acute{a}x}$ ,  $\varepsilon_n^0$ ,  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$ , enquanto no critério baseado na tensão (MAXS) foram usados as propriedades  $\sigma_{m\acute{a}x}$ ,  $t_n^0$ ,  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$ .

Tabela 21 – Parâmetros utilizados no MEFÉ para o adesivo Araldite® AV138.

$E$	$G$	$t_n^0$	$t_s^0$	$\sigma_{m\acute{a}x}$	$G_{IC}$	$G_{IIC}$	$\varepsilon_{m\acute{a}x}$	$\varepsilon_n^0$	$\varepsilon_s^0$
4890	1560	39,45	30,2	39,45	0,2	0,38	1,21	1,21	7,8
<b>MPa</b>				<b>N/mm</b>		<b>%</b>			

#### Araldite® 2015

No caso das juntas adesivas com o adesivo Araldite® 2015, foram utilizados os valores das propriedades apresentados na Tabela 22 para os critérios de deformação e tensão. Relativamente aos parâmetros do Araldite® 2015 pode ser constatado que  $\varepsilon_{m\acute{a}x}$  e  $\varepsilon_n^0$  são superiores aos valores do adesivo Araldite® AV138, enquanto para os critérios de tensão os valores das propriedades  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e  $t_n^0$  são inferiores.

Tabela 22 – Parâmetros utilizados no MEFÉ para o adesivo Araldite® 2015.

$E$	$G$	$t_n^0$	$t_s^0$	$\sigma_{m\acute{a}x}$	$G_{IC}$	$G_{IIC}$	$\varepsilon_{m\acute{a}x}$	$\varepsilon_n^0$	$\varepsilon_s^0$
1850	650	21,63	17,9	21,63	0,43	4,7	4,77	4,77	43,9
<b>MPa</b>				<b>N/mm</b>		<b>%</b>			

**SikaForce® 7888**

Por último, são apresentados os valores das propriedades relevantes do adesivo SikaForce® 7888 na Tabela 23. De um modo geral, verifica-se que os valores das propriedades usadas nos critérios de deformação  $\varepsilon_{m\acute{a}x}$ ,  $\varepsilon_n^0$  e  $\varepsilon_s^0$  são visivelmente mais elevados do que os outros dois adesivos.

Tabela 23 – Parâmetros utilizados no MEFE para o adesivo SikaForce® 7888.

$E$	$G$	$t_n^0$	$t_s^0$	$\sigma_{m\acute{a}x}$	$G_{IC}$	$G_{IIC}$	$\varepsilon_{m\acute{a}x}$	$\varepsilon_n^0$	$\varepsilon_s^0$
1890	727	28,6	20	28,6	1,18	8,72	43	43	100
<b>MPa</b>				<b>N/mm</b>		<b>%</b>			

**4.3.4 Previsão da resistência**

Sabe-se que a propagação de dano em modo misto nas juntas adesivas é uma limitação intrínseca à utilização do MEFE, contudo, esta técnica foi utilizada para aferir as suas potencialidades. Conforme referido anteriormente, os critérios de iniciação de dano escolhidos para tal avaliação baseiam-se em deformações ou tensões e desta forma, prevê-se que uma das principais desvantagens da utilização deste método seja a dependência do refinamento da malha [104].

Os critérios MAXS e MAXE permitem a escolha da direcção de crescimento do dano, entre normal e paralela à direcção local 1 (direcção longitudinal) do modelo. Isto significa que nos modelos numéricos corresponde a uma propagação horizontal (no alinhamento da camada adesiva) ou vertical. Dada a disposição dos elementos finitos é possível escolher a direcção de crescimento do dano, pelo *software* ABAQUS®, conforme mostrado na Figura 110.

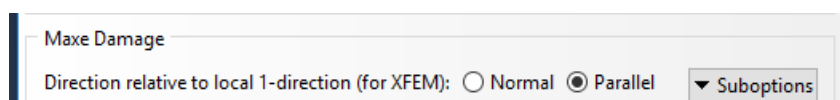


Figura 110 – Escolha da direcção de propagação do dano pelo MEFE para o critério MAXE.

Observa-se pela Figura 111 o início de propagação numa JSS considerando a direcção da propagação de dano paralela à direcção 1. A escolha desta direcção recaiu numa tentativa de modelar o crescimento da rotura ao longo da camada adesiva. Apesar da possibilidade de induzir a propagação de fendas longitudinais, devido à propagação de dano predominantemente em corte, grande deflexão transversal e associadas rotações da camada adesiva, não foi possível modelar a propagação de fenda. Esta impossibilidade está

relacionada com grandes dificuldades de convergência, mesmo após a aplicação de todas as ferramentas disponíveis no *software* para ultrapassar esta limitação [91].

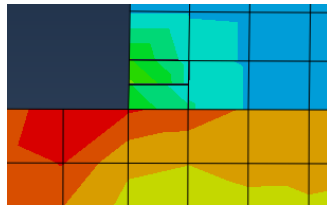


Figura 111 – Início do dano numa JSS na direcção longitudinal da camada adesiva.

Assim, para os critérios de iniciação de dano, a previsão da resistência de juntas pelo MEFE limita-se a associar o  $P_{máx}$  ao ponto de iniciação da rotura.

Num estudo efectuado sobre a influência da malha nos resultados obtidos [105], realizado com JSS e JSD unidas por adesivos frágeis, constatou-se que a utilização de uma dimensão dos elementos finitos na camada de adesivo com o valor de  $t_A$  fornece uma estimativa aproximada de  $P_{máx}$ . Por este motivo a escolha da malha utilizada neste trabalho recaiu no valor de 0,2 mm para os elementos finitos enriquecidos representativos da camada de adesivo. Os resultados mostraram um comportamento distinto entre os critérios baseados em deformações e tensões, com os valores de MAXS a subestimarem de forma significativa os valores de  $P_{máx}$  obtidos pelo método experimental. As variações percentuais são muito elevadas, atingindo uma diferença máxima de 92,6% (Figura 112).

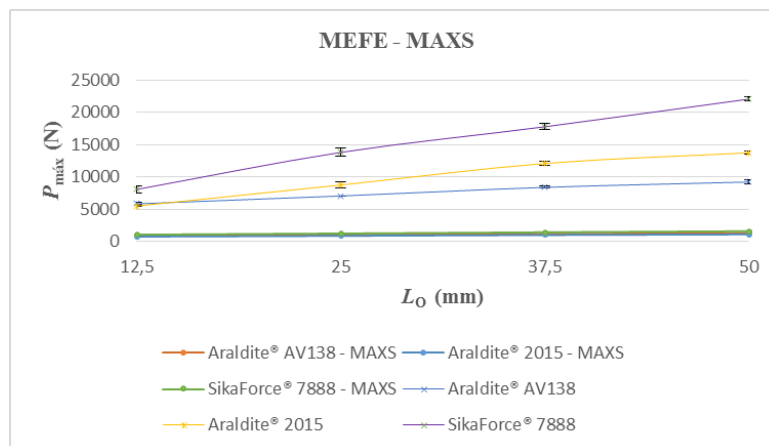


Figura 112 –Variação de  $P_{máx}$  em função de  $L_0$  para o critério MAXS.

A grande diferença constatada deve-se à existência da singularidade de tensão que faz com que as tensões limite dos adesivos durante o processo de ensaio de tracção sejam alcançadas

muito rapidamente. Salienta-se o facto de os resultados obtidos por este critério, no caso do adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7888, superam até cinco vezes os resultados obtidos experimentalmente.

Na Figura 113 está apresentada uma comparação dos resultados obtidos pelo MEFE e critério MAXE com os resultados obtidos experimentalmente, para as juntas coladas com os adesivos Araldite<sup>®</sup> AV138 e Araldite<sup>®</sup> 2015. Não se apresentam os resultados relativos ao adesivo SikaForce<sup>®</sup> 7888 devido a estes serem bastante superiores aos experimentais (em cerca de cinco vezes).

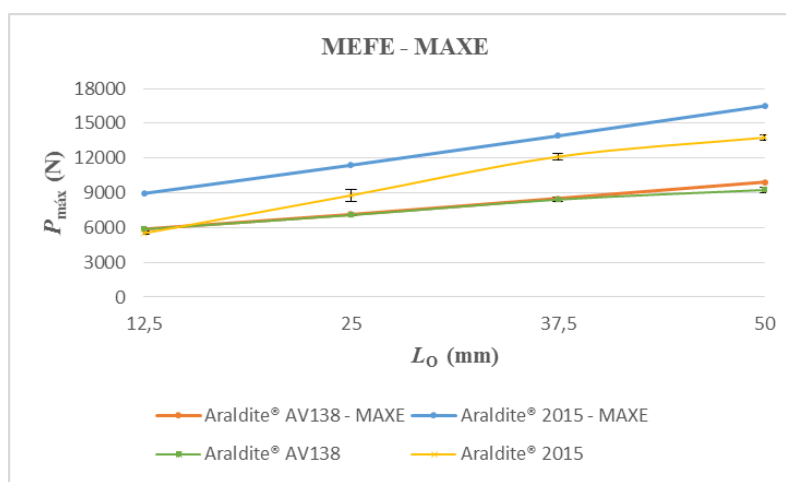


Figura 113 – Comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os resultados obtidos pelo MEFE, com o critério MAXE, para os adesivos Araldite<sup>®</sup> AV138 e Araldite<sup>®</sup> 2015.

Para os referidos adesivos, especialmente o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138, a carga de iniciação de rotura é um indicador aproximado de  $P_{máx}$ . Com o critério MAXE, a diferença máxima de  $P_{máx}$  entre os resultados experimentais e os resultados obtidos pelo MEFE para este adesivo é de 7,4% ( $L_o=50$  mm). No caso do adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 a diferença é mais acentuada, de cerca de 62,2% ( $L_o=12,5$  mm). Contudo, excluindo os resultados obtidos para  $L_o=12,5$  mm consegue-se melhorar substancialmente a aproximação obtida pelo MEFE. Pelos resultados obtidos é possível verificar que, para adesivos frágeis como é o caso do Araldite<sup>®</sup> AV138, a técnica adoptada é bastante precisa na simulação do comportamento real das juntas adesivas. Para adesivos como o Araldite<sup>®</sup> 2015, que possuem alguma ductilidade, o MEFE apresenta alguma precisão. Para adesivos em que a ductilidade é muito elevada, como é o caso do Sikaforce<sup>®</sup> 7888, não é recomendada a avaliação da resistência da junta por este método.



## 5 Conclusões

Este trabalho consistiu num estudo de previsão da resistência de juntas adesivas com adesivos de diferentes características e diferentes valores de  $L_0$ , envolvendo a verificação e adequação de modelos analíticos e numéricos aplicados a cada tipo de junta adesiva. Para este estudo foram consideradas JSS com substratos de alumínio, quatro valores de  $L_0$  (12,5; 25; 37,5 e 50 mm) e escolheram-se três adesivos, que variam desde um adesivo com comportamento rígido e frágil (Araldite® AV138), passando por um adesivo com menor resistência mas ductilidade moderada (Araldite® 2015) até um adesivo de alta resistência e ductilidade (SikaForce® 7888).

Fez-se uma descrição detalhada do trabalho experimental realizado. Obtiveram-se os resultados experimentais sob a forma de curvas  $P-\delta$ , através das quais se verificou que o aumento de  $P_{\text{máx}}$  com  $L_0$  é bastante dependente do tipo de adesivo usado. Dos resultados obtidos foi possível concluir que o aumento de  $P_{\text{máx}}$  para o adesivo Araldite® AV138 é reduzido, comparativamente aos outros dois adesivos, devido à sua fragilidade. Para  $L_0=12,5$  mm o adesivo Araldite® AV138 apresentou um valor de  $P_{\text{máx}}$  ligeiramente superior aos valores do adesivo Araldite® 2015. A explicação reside no facto de que, para valores de  $L_0$  reduzidos, as distribuições de tensões são mais constantes ao longo da camada do adesivo. Assim, o adesivo com maior resistência, apesar de ser um adesivo frágil, apresentou maior resistência do que o adesivo mais dúctil, mas com resistência inferior. É de salientar que embora tenha uma resistência inferior ao adesivo Araldite® AV138, o adesivo Araldite® 2015 possui ductilidade moderada, tornando-o capaz de suportar cargas superiores para valores de  $L_0$  mais elevados. Para este adesivo, observou-se também um aumento de  $P_{\text{máx}}$  mais acentuado com o aumento de  $L_0$  devido à sua capacidade de plastificação. Por ser um

adesivo que combina a elevada resistência dos epóxicos com a ductilidade dos poliuretanos, o adesivo SikaForce<sup>®</sup> 7888 apresenta valores de  $P_{m\acute{a}x}$  bastante superiores aos restantes. Este adesivo é mais favorável tanto para valores de  $L_0$  reduzidos (devido à resistência mecânica) como elevados (devido à ductilidade).

Foram efectuadas comparações dos resultados obtidos experimentalmente com outros métodos, nomeadamente métodos analíticos (Volkersen, Goland e Reissner, Hart-Smith e cedência generalizada) e numéricos (MEF e MEFE). Apresenta-se de seguida as conclusões tiradas para cada método de previsão.

- **Volkersen** Os valores de  $P_{m\acute{a}x}$  experimentais são mais elevados do que as previsões pelo método de Volkersen, nomeadamente para os adesivos Araldite<sup>®</sup> 2015 e SikaForce<sup>®</sup> 7888. Para os três adesivos, as previsões de  $P_{m\acute{a}x}$  não variam de forma significativa com  $L_0$ . Experimentalmente, verifica-se que para valores de  $L_0$  pequenos os valores obtidos pelo método de Volkersen aproximam-se dos experimentais. Contudo, para valores de  $L_0$  superiores este modelo deixa de apresentar uma aproximação precisa do comportamento das juntas. Com o método de Volkersen são atingidas diferenças percentuais entre 12% e 40% para o menor e maior  $L_0$ , respectivamente, no caso do adesivo frágil (Araldite<sup>®</sup> AV138) e diferenças percentuais de 45% e 76% para os mesmos valores de  $L_0$  para o adesivo mais dúctil (SikaForce<sup>®</sup> 7888).
- **Goland e Reissner** Verificou-se que os valores experimentais são igualmente mais elevados do que os obtidos pelo método de Goland e Reissner (critério da tensão  $\tau_{xy}$  máxima). Por este método,  $P_{m\acute{a}x}$  não varia significativamente com  $L_0$  para os três adesivos. Por outro lado, constatou-se que, para valores pequenos de  $L_0$ , os valores obtidos experimentalmente aproximam-se dos valores obtidos pelo método, afastando-se com o aumento de  $L_0$ . Foram atingidas diferenças percentuais entre 49% e 58% para o menor e maior  $L_0$  respectivamente, no caso do adesivo frágil (Araldite<sup>®</sup> AV138) e diferenças percentuais de 65% e 83% para os mesmos valores de  $L_0$  para o adesivo mais dúctil (SikaForce<sup>®</sup> 7888). Pelo critério da tensão  $\sigma_y$  máxima, observaram-se discrepâncias bastante superiores entre os resultados experimentais e os previstos pelo método analítico, pelo que se concluiu que o critério da tensão  $\sigma_y$  máxima não é adequado à previsão da resistência das JSS.

- **Hart-Smith Elástico** Existe uma variação significativa entre os valores experimentais de  $P_{m\acute{a}x}$  e os respectivos valores pelo método de Hart-Smith (critério da tensão  $\tau_{xy}$  máxima), especialmente para valores de  $L_o$  mais elevados. Esta diferença é superior para os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7888, comparativamente ao adesivo Araldite® AV138. Foram atingidas diferenças percentuais entre 47% e 55% para o menor e maior valor de  $L_o$ , respectivamente, no caso do adesivo frágil (Araldite® AV138) e diferenças percentuais de 64% e 82% para os mesmos valores de  $L_o$  (12,5 mm e 50 mm) para o adesivo mais dúctil (SikaForce® 7888). Pelo critério da tensão  $\sigma_y$  máxima, registaram-se igualmente diferenças significativas entre as previsões de  $P_{m\acute{a}x}$  e os dados experimentais, embora por excesso ou defeito, dependendo do adesivo usado.
- **Tensão de cedência generalizada** O comportamento das juntas foi também comparado com o método da tensão de cedência generalizada. Verificou-se uma grande disparidade de valores de  $P_{m\acute{a}x}$  para os adesivos Araldite® AV138 e 2015 e um grande grau de aproximação para o adesivo SikaForce® 7888. Foram atingidas diferenças percentuais entre 61% e 308% para o menor e maior valor de  $L_o$ , respectivamente, no caso do adesivo frágil (Araldite® AV138) e diferenças percentuais de 25% e 13% para os mesmos valores de  $L_o$  (12,5 mm e 50 mm) para o adesivo mais dúctil (SikaForce® 7888).
- **MDC** A modelação por MDC com uma lei de dano triangular mostrou ser bastante precisa para as juntas com adesivos frágeis e moderadamente dúcteis. No caso do adesivo SikaForce® 7888, a lei de dano triangular revelou não ser a mais adequada devido à grande ductilidade do adesivo, cujo resultado foi a subestimação da resistência das juntas. Foi verificado um erro máximo nas juntas de 9,8% para o adesivo Araldite® AV138, de 7,7% para o adesivo Araldite® 2015 e de 19,7% para o adesivo Sikaforce® 7888.
- **MEFE** Verificou-se que não é possível modelar a propagação do dano, devido à rotura ocorrer predominante em modo de corte, implicando problemas numéricos de convergência que impossibilitam a propagação de dano. Por causa desta limitação, a resistência da junta foi aproximada à carga correspondente à iniciação da fenda, onde se recorreu ao uso de dois critérios baseados em tensões e deformações limites.

Considerou-se este procedimento devido a demonstrações anteriores que confirmam que esta metodologia permite obter valores aproximados, com a premissa de que seja utilizado um tamanho do elemento na camada de adesivo igual a  $t_A$ . Os resultados obtidos pelo critério baseado na deformação (MAXE) evidenciaram valores de  $P_{\text{máx}}$  aproximados para os adesivos Araldite® AV138 e 2015. A diferença máxima de  $P_{\text{máx}}$  entre os valores obtidos experimentalmente comparativamente aos valores obtidos pelo MEFE foi de 7,4% ( $L_0=50$  mm) no caso do adesivo Araldite® AV138 e de 62,2% ( $L_0=12,5$  mm) para o adesivo Araldite® 2015. A avaliação da resistência da junta por este método para adesivos de elevada ductilidade (SikaForce® 7888) não é recomendada dado que foram verificados valores aproximadamente cinco vezes superiores aos resultados experimentais. Por outro lado, com o critério baseado em tensão (MAXS) os valores experimentais de  $P_{\text{máx}}$  foram fortemente subestimados, pelo que este método não se relevou adequado na previsão da resistência. A variação percentual obtida relativamente aos valores experimentais foi muito elevada, atingindo uma variação máxima de 85,7% ( $L_0=37,5$  mm) para o adesivo Araldite® AV138. Relativamente ao adesivo Araldite® 2015 e ao SikaForce® 7888 a diferença é mais acentuada, com cerca de 91,8% ( $L_0=50$  mm) e 92,6% ( $L_0=50$  mm), respectivamente.

Através da realização deste estudo foi possível avaliar em pormenor as potencialidades de alguns métodos analíticos e numéricos na previsão da resistência de juntas adesivas, permitindo aferir as suas potencialidades e limitações.

Como sugestão para trabalhos futuros, fica a possibilidade de realizar um estudo idêntico mas com outro tipo de substratos, nomeadamente substratos que não plastifiquem antes da rotura do adesivo. Sugere-se também estudar outros tipos de geometrias de juntas, como as JSD. Como o adesivo SikaForce® 7888 é muito dúctil pode-se considerar utilizar uma lei trapezoidal em vez da lei triangular. Refere-se ainda a utilização de métodos analíticos mais refinados.

## *Referências Documentais*

- [1] L. F. M. da Silva e A. Öchsner, *Modeling of Adhesively Bonded joints*, Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [2] L. F. M. da Silva, A. G. de Magalhães e M. F. S. F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*, Porto: Publindustria, 2007.
- [3] O. Volkersen, *Die Nietkraftverteilung in Zubeanspruchten Nietverbindungen mit Konstanten Loschongquerschnitten*, *Luftfahrtforschung*, vol. 15, 1938: 41-47.
- [4] E. H. Schindel-Bidinelli, *Pratique du Collage Industrial*, Cachan: Lavoisier, 1992.
- [5] J. L. Esteves, “Estudo do Comportamento de Adesivos Estruturais,” Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1990.
- [6] A. M. Correia, “Estudo Químico e Envelhecimento Higrotérmico de um Adesivo Epóxico. Comportamento Mecânico de Juntas Coladas,” Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, 1993.
- [7] N. A. de Bruyne, “Bonded Structures Limited,” em *Bonded Aircraft Structures*, Cambridge, 1957.
- [8] D. F. Monteiro, “Análise do Comportamento à Fractura de Juntas de Aços de Juntas efectuadas com Adesivos Estruturais,” Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1995.
- [9] D. M. Magalhães, “Adhesive joint development for aerospace applications,” Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [10] E. M. Petrie, *Handbook of Adhesives and Sealants*, New York: McGraw-Hill, 2000.
- [11] A. M. G. Pinto, “Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos,” Dissertação submetida para a obtenção do grau de doutor em Engenharia Mecânica, FEUP, Porto, Julho de 2007.
- [12] N. F. Q. Ribeiro, “Efeito de alterações geométricas na resistência de juntas de sobreposição - Tese de mestrado em Engenharia Mecânica,” Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Outubro 2012.
- [13] R. Q. Rodríguez, P. Sollero, M. B. Rodrigues, W. P. de Paiva e É. L. de Albuquerque, “Failure criteria for adhesive bonded joints,” *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 37, pp. 26-36, 2012.
- [14] R. D. Adams, *Adhesive Bonding: science, technology and applications*, Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [15] E. Sika. [Online]. Available: [http://automotive.sika.com/en/solutions\\_products/solution-finder.html](http://automotive.sika.com/en/solutions_products/solution-finder.html). [Acedido em 02 09 2015].
- [16] M. Inácio, T. Pinheiro, P. Barros e I. Castro, “Adesivos estruturais,” 27 10 2010. [Online]. Available: [http://paginas.fe.up.pt/~projfeup/cd\\_2010\\_11/files/MMM514\\_apresentacao.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~projfeup/cd_2010_11/files/MMM514_apresentacao.pdf). [Acedido em 22 Setembro 2014].

- [17] A. Louro, I. Vicente, D. Santos, L. Máimo, J. Amorim e R. Carvalho, *Adesivos estruturais na construção de aviões*, Porto: Projecto FEUP, 2010/2011.
- [18] P. Cognard, *Handbook of adhesives and sealants*, Volume 1, London: Elsevier, 2005.
- [19] O. S. d. Andrade, S. Kina e R. Hirata, “SISTEMAS ADESIVOS - Aplicação clínica e conceitos actuais,” [Online]. Available: [http://www.ronaldohirata.com.br/wp-content/uploads/2012/09/adesivos\\_ksh.pdf](http://www.ronaldohirata.com.br/wp-content/uploads/2012/09/adesivos_ksh.pdf). [Acedido em 20 Novembro 2014].
- [20] “Killing - Tintas e adesivos,” [Online]. Available: [http://www.killing.com.br/site/produto.php?id\\_categoria=1&id\\_subcategoria=4&id\\_segimento=12](http://www.killing.com.br/site/produto.php?id_categoria=1&id_subcategoria=4&id_segimento=12). [Acedido em 22 Outubro 2014].
- [21] “<http://cursosapateiro.com.br/4-Femininos.html>,” [Online]. [Acedido em Out 2015].
- [22] “Cipade, industria e investigação de produtos adesivos S.A.,” [Online]. Available: <http://www.cipade.com/products.php?cat=adhesives&subcat=5&app=1#application>. [Acedido em 02 09 2015].
- [23] “MLC - Madeira Laminada Colada,” [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/mlcufsc/>. [Acedido em 07 01 2015].
- [24] M. V. Loureiro, S. Borschiver e P. L. A. Coutinho, “Tendências Tecnológicas de Adesivos e Selantes aplicados na Construção Civil,” *Journal of technology Management & Innovation*, vol. 4, nº 2, p. 116, 2009.
- [25] “GROSSL - Indústria de abrasivos,” [Online]. Available: <http://www.grossl.com.br/>. [Acedido em 07 01 2015].
- [26] “Palomar Technologies,” Automated microelectronic and optoelectronic packaging systems, [Online]. Available: <http://www.palomartechnologies.com/processes/die-bonding/die-attach>. [Acedido em 08 05 2015].
- [27] E. L. d. M. Mehl, “Conceitos Fundamentais sobre Placas de Circuito Impresso,” [Online]. Available: [http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI\\_Conceitos\\_fundamentais.pdf](http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI_Conceitos_fundamentais.pdf). [Acedido em 11 05 2015].
- [28] “Tecnologia de montagem superficial,” wikipédia, [Online]. Available: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Tecnologia\\_de\\_montagem\\_superficial](http://pt.wikipedia.org/wiki/Tecnologia_de_montagem_superficial). [Acedido em 11 05 2015].
- [29] “Ellsworth Adhesives,” Copyright © 2015 Ellsworth Adhesives, [Online]. Available: <http://www.ellsworthadhesives.co.uk/media/pdf/JointDesign.pdf>. [Acedido em 03 09 2015].
- [30] M. J. Davis e A. McGregor, “Assessing adhesive bond failures: mixed-mode bond failures explained,” em *ISASI Australian Safety Seminar*, Canberra, June 2010.
- [31] J. G. Quini e G. Marinucci, “Polyurethane structural adhesives applied in automotive composite joints,” *Materials Research*, vol. 15, pp. 434-439, 2012.
- [32] L. F. M. da Silva, “Adhesive joints for low and high temperatures,” A dissertation submitted for the Degree of Doctor of Philosophy at the University of Bristol, Bristol, 2003.

- [33] L. M. B. S. Teixeira, “Caracterização do comportamento mecânico de juntas de sobreposição simples coladas com adesivos estruturais,” Dissertação para obtenção do grau de mestre apresentada à FEUP, Porto, 2000.
- [34] A. N. S. Nascimento, “Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos - Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Janeiro de 2013.
- [35] L. D. R. Grant, R. D. Adamas e L. F. M. da Silva, “Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 19, pp. 405-413, 2009.
- [36] A. Crocombe, “Global yielding as a failure criteria for bonded joints.,” *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 9, pp. 145-153, 1989.
- [37] L. J. Hart-Smith, Bolted and Bonded joints, ASM Metal Handbook, Volume 21, Composites (ASM International), 2001.
- [38] L. F. M. da Silva, G. W. Critchlow e M. A. V. Figueiredo, “Parametric Study of Adhesively Bonded Single Lap Joints by the Taguchi Method.,” *Journal of Adhesion Science Technology*, vol. 22, nº 13, pp. 1477-1494, 2008.
- [39] B. B. R. da Silva, “Desenvolvimento de adesivos de poliuretano a base de óleo de mamona - Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia,” Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia, Porto Alegre , 2006.
- [40] L. R. Pereira, *Dossiê Técnico - Adesivos*, Minas Gerais: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, Junho, 2007.
- [41] C. Lima, Polímeros e Materiais Poliméricos - Manual para o professor, educa - Cultura científica e ensino/aprendizagem da Química, 1999.
- [42] S. A. d. C. Almeida, “Análise Computacional de Juntas Adesivas Simples e Duplas em Materiais Compósitos,” Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre, ISEL, Setembro de 2012.
- [43] G. Lavareda, *Introdução à Ciência e Engenharia dos Materiais (ICEM) - Materiais Poliméricos (Processamento)*, Lisboa: DCM - Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Nova de Lisboa, 2010.
- [44] J. A. B. P. Neto, “Estudo paramétrico de juntas adesivas em material compósito,” Tese de mestrado - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Julho de 2011.
- [45] J. L. C. Sosa e N. Karapurath, “Delamination modeling of GLARE using the extended finite element method.,” *Composites Science and Technology*, vol. 72, pp. 788-791, 2012.
- [46] R. D. Adams e N. A. Peppiatt, “Stress analysis of adhesive-bonded lap joints.,” *Journal of Strain Analysis*, vol. 9, pp. 185-196, 1974.
- [47] J. A. Harris e R. D. Adams, “Strength prediction of bonded single-lap joints by non-linear finite element methods.,” *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 4, pp. 65-78, 1984.

- [48] S. K. Panigrahi e B. Pradhan, “Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites.,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 26, pp. 183-201, 2007.
- [49] van Ingen, J. W. e Vlot, A., “Stress analysis of adhesively bonded single lap joints: Survey and evaluation of analyses.,” Report LR-740, Delft University of Technology, 1993.
- [50] L. F. M. da Silva, P. J. das Neves, R. D. Adams e J. K. Spelt, “Analytical models of adhesively bonded joints—Part I: Literature survey,” *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 29, p. 319–330, 2009.
- [51] *EAA Aluminium Automotive Manual-Joining: Hybrid joining techniques*, European Aluminium Association., 2005.
- [52] L. F. M. da Silva, R. F. T. Lima e R. Teixeira, “Development of a Computer Program for the Design of Adhesive Joints,” *The Journal of Adhesion*, vol. 85, pp. 889-918, 2009.
- [53] R. F. T. Lima, “Development of a software for the Design of Adhesive Joints,” Tese de Mestrado - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.
- [54] M. Goland e E. Reissner, “The stresses in cemented joints.,” *Journal of Applied Mechanics.*, vol. 66, pp. A17-27, 1944.
- [55] L. J. Hart-Smith, “Adhesive-Bonded Single-Lap Joints”, NASA CR-112236, January, 1973.
- [56] L. J. Hart-Smith, “Adhesive bonded joints for composites – phenomenological considerations,” em *Technology Conferences Associates Conference on Advanced Composites Technology*, California, 1978.
- [57] R. Q. Rodriguez, P. Sollero e M. B. Rodrigues, “Stress analysis and failure criteria of adhesive bonded single lap joints,” em *21st International Congress of Mechanical Engineering*, Natal, 2011.
- [58] R. D. Adams, J. Comyn e W. C. Wake, “Structural adhesive joints in engineering”, London: Chapman & Hall, 1997.
- [59] D. W. Oplinger, “Effects of Adherend Deflections in Single Lap Joints.,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 31(18), pp. 2561-2587, 1994.
- [60] M. Y. Tsai, D. W. Oplinger e J. Morton, “Improved theoretical solutions for adhesive lap joints.,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 35, n° 12, pp. 1163-1185, 1998.
- [61] X. Zhao, *Stress and failure analysis of adhesively bonded lap joints*, Bristol: Tese de Doutorado - University of Bristol, 1991.
- [62] Y. Gilbert e A. Rigolot, “Left bracket asymptotic analysis of double-lap adhesive-bonded joints loaded inshear tension right bracket.,” *JOURNAL DE MECANIQUE THEORIQUE ET APPLIQUEE*, vol. 3, pp. 341-372, 1979.
- [63] I. U. Ojalvo e H. L. Eidinnoff, “Bond Thickness effects upon stresses in single -lap adhesive joints.,” *AIAA Journal*, vol. 16, pp. 204-211, 1978.
- [64] L. Tong e G. P. Steven, *Analysis and design of structural bonded joints*, United States: Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA (US), 1999.

- [65] Q. Luo e L. Tong, “Fully-coupled nonlinear analysis of single lap adhesive joints,,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 44, pp. 2349-2370, 2007.
- [66] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura e J. J. M. S. Domingues, “Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs,,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 45, pp. 1497-1512, 2008.
- [67] Y. Zeng, “Feasibility study of cohesive zone model on crack propagation in pipeline steel under monotonic and fatigue loading,,” Tese de mestrado - Delft University of Technology, Delft, 2015.
- [68] A. A. Griffith, “The phenomena of rupture and flow in solids,,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of Series A*, vol. 221, pp. 163-197, 1920.
- [69] G. Fernlund e J. K. Spelt, “Failure load prediction,,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 11, pp. 213-227, 1991.
- [70] D. A. Dillard, H. K. Singh, D. J. Pohlit e J. M. Starbuck, “Observations of Decreased Fracture Toughness for Mixed Mode Fracture Testing of Adhesively Bonded Joints,,” *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 23, pp. 1515-1530, 2009.
- [71] J. Q. Xu, Y. H. Liu e X. G. Wang, “Numerical methods for the determination of multiple stress singularities and related stress intensity coefficients,,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 63, pp. 775-790, 1999.
- [72] J. R. Rice e G. F. Rosengren, “Plane strain deformation near a crack tip in a powerlaw hardening material,,” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 16, pp. 1-12, 1968.
- [73] Z. Chen, R. D. Adams e L. F. M. da Silva, “The use of the J-integral to analyse adhesive bonds with and without a crack,,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 31, pp. 48-55, 2011.
- [74] G. Ji, Z. Ouyang , G. Li, S. Ibekwe e S. Pang, “Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints,,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 47, pp. 2445-2458, 2010.
- [75] G. I. Barenblatt, “The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks,,” *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 23, pp. 434-444, 1959.
- [76] P. Feraren e H. M. Jensen, “Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints,,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 71, pp. 2125-2142, 2004.
- [77] T. Pardoen, T. Ferracin, C. M. Landis e F. Delannay, “Constraint effects in adhesive joint fracture,,” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 53, pp. 1951-1983, 2005.
- [78] D. Xie e A. M. Waas, “Discrete cohesive zone model for mixed-mode fracture using finite element analysis,,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 73, pp. 1783-1796, 2006.
- [79] S. Kumar e K. L. Mittal, *Advances in Modeling and Design of Adhesively Bonded Systems*, New York: Wiley, Julho 2013.
- [80] R. D. Adams e J. A. Harris, “Strength prediction of bonded single lap joints by nonlinear finite element methods,,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 4, p. 65-78, 1984.

- [81] Q. D. Yang e M. D. Thouless, “Mixed-mode fracture analyses of plastically deforming adhesive joints.,” *International Journal of Fracture*, vol. 110, pp. 175-187, 2001.
- [82] A. M. G. Pinto, A. G. Magalhães, R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura e A. P. M. Baptista, “Single lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive.,” *The Journal of Adhesion*, vol. 85, pp. 351-376, 2009.
- [83] G. Alfano e M. A. Crisfield, “Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues.,” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 50, p. 1701–1736, 2001.
- [84] O. Allix e A. Corigliano, “Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens.,” *International Journal of fracture*, vol. 77, p. 111–140, 1996.
- [85] N. Chandra, H. Li, C. Shet e H. Ghonem, “Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces.,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 39, p. 2827–2855, 2002.
- [86] J. Chen, “Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and by decohesion models.,” *J. Thermopl. Compos. Mater.*, vol. 15, p. 429–441, 2002.
- [87] M. S. Kafkalidis e M. D. Thouless, “The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints.,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 39, p. 4367–4383, 2002.
- [88] C. D. M. Liljedahl, A. D. Crocombe, M. A. Wahab e I. A. Ashcroft, “Damage modelling of adhesively bonded joints.,” *International Journal of Fracture*, vol. 141, pp. 147-161, 2006.
- [89] P. Jousset e M. Rachik, “Comparison and evaluation of two types of cohesive zone models for the finite element analysis of fracture propagation in industrial bonded structures.,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 132, pp. 48-69, 2014.
- [90] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura e J. J. M. S. Domingues, “Modelling single and double-lap repairs on composite materials.,” *Composites Science and Technology*, vol. 65, pp. 1948-1958, 2005.
- [91] L. F. M. da Silva e R. D. S. G. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints - Springer briefs in applied sciences and technology.*, Springer, Heidelberg, 2012.
- [92] K. Duan, X. Hu e Y. W. Mai, “Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints.,” *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 18, p. 39–53, 2004.
- [93] H. Khoramishad, A. D. Crocombe, K. B. Katnam e I. A. Ashcroft, “Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model.,” *International Journal of Fatigue*, vol. 32, pp. 1146-1158, 2010.
- [94] L. Daudeville e P. Ladeveze, “A damage mechanics tool for laminate delamination.,” *Composite Structures*, vol. 25, pp. 547-555, 1993.
- [95] G. Z. Voyiadjis e P. I. Kattan, “Damage Mechanics.,” *Marcell Dekker, New York.*, 2005.
- [96] P. G. S. Raghavan, “A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial de-bonding.,” *Mechanics of Materials*, vol. 37, pp. 955-977, 2005.

- [97] M. M. A. Wahab, I. A. Ashcroft, A. D. Crocombe e S. J. Shaw, "Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 15, pp. 763-781, 2001.
- [98] M. Imanaka, T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino e M. Kimoto, "Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive.," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 17, pp. 981-994, 2003.
- [99] V. Shenoy, I. A. Ashcroft, G. W. Critchlow e A. D. Crocombe, "Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue.," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 77, p. 1073-1090, 2010.
- [100] S. Mohammadi, "Extended finite element method for fracture analysis of structures.," *Blackwell Publishing, New Jersey*, 2008.
- [101] T. Belytschko e T. Black, "Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing.," *International Journal of Fracture Mechanics*, vol. 45, pp. 601-620, 1999.
- [102] N. Moës, J. Dolbow e T. Belytschko, "A finite element method for crack growth without remeshing.," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 46, pp. 131-150, 1999.
- [103] *Abaqus® Documentation. Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay.*, 2013.
- [104] R. D. S. G. Campilho, M. D. Banea, F. J. P. Chaves e L. F. M. da Silva, "eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I.," *Computational Materials Science*, vol. 50, pp. 1543-1549, 2011.
- [105] R. D. S. G. Campilho, M. D. Banea, A. M. G. Pinto, L. F. M. Silva e A. M. P. Jesus, "Strength prediction of single and double-lap joints by standard and extended finite element modelling.," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 31, pp. 363-372, 2011.
- [106] A. V. Pocius, "Adhesion and Adhesives Technology, An introduction, 2nd Edition. 83," Munique, Hanser, 2002.
- [107] R. D. S. G. Campilho, M. D. Banea, J. A. B. P. Neto e L. F. M. Silva, "Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer.," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 88, pp. 513-533, 2013.
- [108] R. D. F. Moreira, "Estudo de reparações adesivas pela técnica de remedo embebido com reforços exteriores para aumento da resistência. Tese Mestrado.," Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2013.
- [109] J. A. B. P. Neto, R. D. S. G. Campilho e L. F. M. da Silva, "Parametric study of adhesive joints with composites," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 37, pp. 96-101, 2012.
- [110] A. L. C. D. Loureiro, *Determination of the strain distribution on the adhesive joints using Fiber Bragg Grating (FBG).*, Porto: Tese Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- [111] B. Broughton e M. Gower, "Preparation and test of adhesive joints - National Physical Laboratory," ISSN1368 6550, UK, Set. 2001.

- [112] Henkel Corporation, "Hysol Surface Preparation Guide", Aerospace Group," [Online]. Available: [www.aerospace.henkel.com](http://www.aerospace.henkel.com). [Acedido em 07 10 2015].
- [113] L. F. M. da Silva, D. A. Dillard, B. R. K. Blackman e R. D. Adams, Testing adhesive joints: best practices, Weinheim: Wiley-VCH, 2012, pp. 26-36.
- [114] A. Ferreira, L. Linhares, P. Gustavo e V. Branco, "Efeito do comprimento de sobreposição na resistência de juntas adesivas de simples sobreposição," U. C. Processos de Fabrico II, FEUP, 2013.
- [115] T. Andersson e U. Stigh, "The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces.," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 41, pp. 413-34, 2004.
- [116] K. Leffler, K. S. Alfredsson e U. Stigh, "Shear behaviour of adhesive layers.," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 44, pp. 530-45, 2007.
- [117] J. L. Hogberg e U. Stigh, "Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer.," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 73, pp. 2541-56, 2006.
- [118] R. D. S. G. Campilho, A. M. G. Pinto, M. D. Banea, R. F. Silva e L. F. M. da Silva, "Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 25, pp. 2351-2368, 2011.
- [119] M. F. S. F. de Moura, J. P. M. Gonçalves, J. A. G. Chousal e R. D. S. G. Campilho, "Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints.," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 28, pp. 419-426, 2008.
- [120] E. A. S. Marques e L. F. M. Silva, "Joint strength optimization of adhesively bonded patches.," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 84, pp. 917-36, 2008.
- [121] R. D. S. G. Campilho, D. C. Moura, D. J. S. Gonçalves, J. F. M. G. da Silva, M. D. Banea e L. F. M. da Silva, "Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites.," vol. 50, *Composites: Part B.*, 2013, pp. 120-126.