



## Utilização do método de elementos finitos extendido para a previsão de resistência de juntas híbridas em T

ROGÉRIO VALENTIM FERREIRA FARIA

novembro de 2018

# UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO PARA A PREVISÃO DE RESISTÊNCIA DE JUNTAS HÍBRIDAS EM T

Rogério Valentim Ferreira Faria

1141615

**2018**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



# UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO PARA A PREVISÃO DE RESISTÊNCIA DE JUNTAS HÍBRIDAS EM T

Rogério Valentim Ferreira Faria

1141615

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho.

**2018**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica





# JÚRI

## **Presidente**

Doutor Luís Manuel Martins Leite Magalhães

Professor Adjunto, ISEP

## **Orientador**

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

## **Arguente**

Doutor Hugo Queirós de Faria

Professor Adjunto Convidado, ESAN (UA)



## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, pela disponibilidade e passagem de conhecimentos ao longo da elaboração deste trabalho

À minha família, namorada e amigos pelo apoio e encorajamento oferecido durante a elaboração da presente dissertação.

Por fim ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) pela disponibilização de meios para que a realização deste trabalho fosse possível.



## PALAVRAS CHAVE

Junta em T, Junta híbrida, Adesivo, Elementos Finitos, Método de Elementos Finitos Extendido.

## RESUMO

Hoje em dia os requisitos mínimos de qualidade de um produto são bastante superiores aos que existiam por exemplo no século passado. Esta exigência de mercado obriga sempre à necessidade de procura de novas soluções, que devem ser simples e eficazes. As ligações adesivas de certa forma vieram facilitar a indústria, por exemplo, na indústria automóvel e aeronáutica, porque permitem a ligação de diferentes materiais sem que exista a necessidade da alteração das peças a unir. De forma a produzir novas soluções para a indústria em geral é importante existir investigação (estudo de comportamento) para desenvolvimento de novos adesivos e desenvolvimento de *software* de simulação de forma a otimizar as ligações adesivas. Para a análise do comportamento de juntas adesivas está a ser cada vez mais utilizado o Método de Elementos Finitos, no qual se enquadra o Método de Elementos Finitos Extendido (MEFE), que é um método mais recente e que se perfila por ser um método capaz de prever a resistência de juntas envolvendo adesivos. No entanto, ainda não existem muitos casos de estudo acerca da sua adequabilidade.

Neste trabalho é apresentado o estudo numérico do comportamento de juntas adesivas, soldadas e híbridas (soldadas por pontos e adesivas) do tipo T-peel sujeitas a carregamentos de tração. O estudo numérico será feito no *software* Abaqus® através do MEFE para a simulação do processo de rotura das juntas. Para o estudo da influência do tipo de adesivo, foram considerados 3 tipos de adesivos: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. Foram considerados os resultados experimentais obtidos no trabalho de Almeida [2], posteriormente comparados com a análise numérica pelo MEFE. O objetivo desta análise é de estimar a capacidade desta técnica para avaliar o desempenho das juntas adesivas, soldadas e híbridas T-peel, de forma a evitar a necessidade de realizar ensaios experimentais.

A análise por MEFE revelou que este método é bastante preciso quando usados os critérios de iniciação de dano MAXS e QUADS, enquanto o critério de propagação de dano tem pouco efeito nos resultados.



## KEYWORDS

T-peel joint, Hybrid joint, Adhesive, Finite Elements, Extended Finite Element Method.

## ABSTRACT

Nowadays the minimum quality requirements of a product are far superior to those that existed for example in the last century. This market requirement always obliges the search for new solutions, which must be simple and effective. Adhesive bonds have in a way facilitated the industry, for example in the automotive and aeronautical industry, because they allow joining of different materials without the need to change the parts to be joined. In order to produce new solutions for the industry in general it is important to have research (behavioural study) to develop new adhesives and development of simulation software in order to optimize adhesive bonds. For the analysis of the behaviour of adhesive joints, the Finite Element Method is increasingly used, in which the Extended Finite Element Method (XFEM), which is a more recent method, is framed as a method capable to predict the joint strength involving adhesives. However, there are still not many case studies about their suitability.

In this work, the numerical study of the behaviour of adhesive, welded and hybrid joints (welded by dots and adhesives) of T-peel type subjected to tensile loads is presented. The numerical study will be done in the Abaqus® software through the XFEM for the simulation of the process of joint failure. For the study of the influence of adhesive type, three types of adhesives were considered: Araldite® AV138, Araldite® 2015 and Sikaforce® 7752. The experimental results obtained in the work of Almeida[2] were considered, later compared with the numerical analysis by XFEM. The objective of this analysis is to estimate the ability of this technique to evaluate the performance of adhesive, welded and T-peel joints, in order to avoid the need to perform experimental tests.

The XFEM analysis revealed that this method is quite accurate when using the MAXS and QUADS damage initiation criteria, while the energy propagation criteria has a small effect on the results.



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
EF	Elementos finitos
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
JSD	Junta de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MAXE	Critério de deformação nominal máxima
MAXPE	Deformação principal máxima
MAXPS	Tensão principal máxima
MAXS	Critério de tensão nominal máxima
MDC	Modelo de dano coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFE	Método dos Elementos Finitos Extendido
MFLE	Mecânica da fratura linear elástica
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MMF	<i>Mixed-Mode Flexure</i>
QUADE	Critério quadrático de deformação
QUADS	Critério quadrático de tensão
RSW	<i>Resistance spot welding</i>

TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
VCCT	Técnica de Fenda Virtual
XFEM	<i>Extended Finite Element Method</i>

#### Lista de Unidades

<i>g</i>	Gramas
<i>MPa</i>	Mega Pascal
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celcius
<i>N</i>	Newton
<i>Psi</i>	Unidade de Pressão

#### Lista de Símbolos

$\delta_n^0$	Deslocamento normal correspondente a $t_n^0$
$\delta_s^0$	Deslocamento de corte correspondente a $t_s^0$
$\varepsilon_n$	Deformação
$\tau_{xy}, \tau$	Tensão de corte
<i>a</i>	Distância do centro do ponto de soldadura à extremidade da junta segundo <i>xx</i>
<i>b</i>	Distância do centro do ponto de soldadura à extremidade da junta segundo <i>yy</i>
<i>c</i>	Comprimento livre
<i>E</i>	Módulo de Young
$\varepsilon_T$	Deformação de rotura à tração
<i>G</i>	Módulo de corte

$G_c$	Tenacidade à fratura, energia crítica coesiva
$G_{Ic}$	Taxa crítica de libertação de energia sob tração pura
$G_{IIc}$	Taxa crítica de libertação de energia sob deslizamento
$L$	Comprimento ligado
$\varnothing$	Diâmetro
$P$	Força
$P_m$	Força máxima média experimental
$P_{m\acute{a}x}, P_{m\acute{a}x}$	Força máxima ensaio numérico Força máxima ensaio experimental
$R$	Raio interior de curvatura após a dobragem dos aderentes
$t_A$	Espessura do adesivo
$t_n$	Componentes de tensão normal superfície fraturada
$t_n^0$	Valores limite da de tensão normal da superfície fraturada
$t_p$	Espessura dos aderentes
$t_s$	Componentes de tensão ao corte superfície fraturada
$t_s^0$	Valores limite da tensão ao corte da superfície fraturada
$u$	Vetor de deslocamentos
$\nu^a$	Coefficiente de Poisson
$w$	Largura da junta
$\delta$	Deslocamento imposto
$\epsilon_n^0$	Limite da componente de deformação normal
$\epsilon_s$	Componente de deformação ao corte
$\epsilon_s^0$	Limite da componente de deformação ao corte

---

$\sigma$	Tensão
$\sigma_{\text{elast}}$	Tensão de limite elástico
$\sigma_{\text{elast}}$	Tensão de limite elástico
$\sigma_{\text{max}}^0$	Resistência de um material à tração
$\epsilon_e$	Deformação de von Mises equivalente
$\sigma_{\text{max}}$	Tensão principal máxima
$\sigma_{\text{rot}}$	Tensão de rotura, Tensão de rotura à tração
$\sigma_y$	Tensão de arrancamento ( <i>peel</i> )
$\sigma_{y \text{ avg}}$	Tensões de arrancamento média
$t$	Tensão, resistência atual

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Principais métodos de ligação (elaboração própria).....	5
Figura 2 - Esquema ilustrativo dos diferentes elementos do processo de adesão [5] ....	6
Figura 3 - As forças de adesão e coesão na adesão [8] .....	8
Figura 4 - Resistência de uma junta de simples sobreposição em função do comprimento de sobreposição [9] .....	8
Figura 5 - Diferentes locais de aplicação dos adesivos em automóveis [12] .....	9
Figura 6 - Exemplo de concentração de tensões em juntas rebitadas e adesivas [14] .	12
Figura 7-Esforço de tração e respetiva distribuição de tensões [19] .....	14
Figura 8 - Esforço de compressão e respetiva distribuição de tensões [19].....	14
Figura 9 - Esforço de corte e respetiva distribuição de tensões de corte numa junta adesiva [19].....	15
Figura 10 - Esforços de clivagem e respetiva distribuição de tensões de clivagem numa junta adesiva [19] .....	15
Figura 11 - Esforços de arrancamento e respetiva distribuição de tensões de arrancamento numa junta adesiva [19] .....	16
Figura 12 - Diferentes tipos de rotura coesiva [24].....	16
Figura 13 - Rotura interfacial [24] .....	17
Figura 14 - Rotura pelo aderente [24] .....	17
Figura 15 - configurações de juntas [25] .....	18
Figura 16 - Diferentes configurações de juntas [26] .....	18
Figura 17 - Diferentes tipos de família de adesivos segundo a sua capacidade de carga [29].....	19
Figura 18 - Colagem com adesivo Cianoacrilato [32] .....	23
Figura 19 - Soldadura por resistência por pontos [35].....	28
Figura 20 - Diferentes etapas de realização de uma soldadura por pontos [35].....	29
Figura 21 - (a) Parafusos submetidos à tração; (b) parafusos submetidos ao corte; (c) parafusos submetidos à tração e corte [37].....	30
Figura 22 - Possíveis modos de falha em conexões aparafusadas [37] .....	30

Figura 23 - Análise de Volkersen, a) junta carregada; b) tensão de corte no adesivo [3] .....	32
Figura 24 - Excentricidade do carregamento numa junta sobreposta simples [13] .....	32
Figura 25 – Deformação da junta devido à excentricidade do carregamento numa junta de sobreposição simples [13] .....	33
Figura 26- Tensões de arrancamento numa junta de sobreposição simples [3] .....	33
Figura 27- Representação elasto-plástica do adesivo [3].....	34
Figura 28- Explicação esquemática do corte plástico no adesivo [3].....	35
Figura 29- Juntas com ângulos de arredondamento diferentes [46].....	38
Figura 30- Modos de rotura [3] .....	39
Figura 31-Leis coesivas (a) triangular e exponencial e (b) trapezoidal [1] .....	40
Figura 32- Processo de rotura da JSS [56] .....	41
Figura 33- Definição de nós de enriquecimento numa malha de Elementos Finitos [58] .....	42
Figura 34- Diferentes métodos de ligação soldada a) soldadura por pontos b) soldura por cordão [67] .....	44
Figura 35-Processo ligação de juntas adesivas-soldadas através da técnica “weld- through” [69] .....	44
Figura 36 - Junta de sobreposição simples adesiva-aparafusada [76] .....	45
Figura 37 - Ligação adesiva e rebiteagem cega (processo com pré-furo) [67] .....	46
Figura 38 - Formação de um rebite auto-perfurante / união adesiva (processo sem pré- furo) [67].....	46
Figura 39- Processo de ligação por <i>clinch</i> [67] .....	47
Figura 40- Formação de vazios na camada adesiva em juntas híbridas por <i>Clinch</i> [67]	48
Figura 41-Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ à tração do aço DIN C45E [30].....	51
Figura 42-Aspeto dos provetes após rotura [2] .....	52
Figura 43-Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [83] .....	53
Figura 44-Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [82].....	54
Figura 45-Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ de provetes maciços de Sikaforce® 7752 [84] .....	55
Figura 46 – Dimensões e geometria das juntas T-peel [2]. .....	56
Figura 47-Provetes cortados e quinados [2] .....	57

Figura 48- Granalhagem mecânica dos provetes [2].....	57
Figura 49 – Aderentes após granalhagem, limpeza das superfícies de ligação e colocação de fio de 0,2 mm de diâmetro ao longo da superfície de colagem [2] .	58
Figura 50- Pesagem das massas de resina e endurecedor para o adesivo Sikaforce® 7752 [2].....	58
Figura 51-Juntas adesivas com alicates de pressão, dispostas horizontalmente sobre placa plana protegida com Teflon®[2].....	59
Figura 52-Aplicação de ponto de soldadura nas juntas híbridas [2] .....	59
Figura 53-Remoção de excesso de adesivo depois de curado [2].....	60
Figura 54-Máquina de ensaios Shimadzu® AG-X 100 e computador de aquisição de dados [2] .....	60
Figura 55-Provetes de uma junta soldada após rotura total [2] .....	61
Figura 56- Curvas $P-\delta$ experimentais das juntas soldadas [2] .....	62
Figura 57-Modo de rotura nas juntas adesivas com o Araldite®AV138 [2] .....	63
Figura 58-Curvas $P-\delta$ experimentais das juntas adesivas com o Araldite® AV138 [2] ...	64
Figura 59-Modo de rotura nas juntas híbridas adesivas com o Araldite® AV138 [2] ....	64
Figura 60 - Curvas $P-\delta$ experimentais das juntas híbridas com o Araldite®AV138 [2] ..	65
Figura 61 - Início da rotura do aderente pelo contorno do ponto de soldadura [2] .....	65
Figura 62 - Afastamento máximo das zonas de rotura pelo contorno do ponto de soldadura [2].....	66
Figura 63 - Rotura total do aderente por efeito de arrancamento de material [2] .....	67
Figura 64 - Modo de rotura nas juntas adesivas com o Araldite® 2015 [2] .....	67
Figura 65 - Curvas $P-\delta$ experimentais das juntas adesivas com o Araldite® 2015 [2] ..	68
Figura 66 - Modo de rotura nas juntas híbridas com o Araldite® 2015 [2].....	68
Figura 67 - Curvas $P-\delta$ experimentais das juntas híbridas com o Araldite® 2015 [2]....	69
Figura 68 - Modo de rotura nas juntas adesivas com o Sikaforce® 7752 [2] .....	70
Figura 69 - Curvas $P-\delta$ experimentais das juntas adesivas com o Sikaforce® 7752 [2] .	71
Figura 70 - Modo de rotura nas juntas híbridas com o Sikaforce® 7752 [2].....	71
Figura 71 - Curvas $P-\delta$ experimentais das juntas híbridas com o Sikaforce® 7752 [2]..	72
Figura 72 - Valores experimentais médios de $P_{máx}$ e respetivo desvio padrão para todas as configurações de juntas estudadas [2] .....	73

Figura 73 - Propriedades dos elementos segundo o MEFE .....	74
Figura 74 - Condições de fronteira impostas a) juntas adesivas e b) juntas híbridas ....	75
Figura 75 - Condições fronteira impostas nas juntas soldadas .....	76
Figura 76 - Detalhes da malha de MEF para análise de resistência das juntas adesivas	77
Figura 77 - Detalhes da malha de MEF para análise de resistência das juntas híbridas	78
Figura 78 – Propagação do dano no MEFX usando o conceito de nós fantasmas antes (a) e depois (b) da repartição de elementos fraturados em subelementos [86]... 80	
Figura 79 – Distribuição de tensões $\sigma_y$ a meio da espessura do adesivo em função de $x/L$ para as juntas adesivas. ....	83
Figura 80 – Distribuição de tensões $\sigma_y$ a meio da espessura do adesivo em função de $x/L$ para as juntas híbridas e soldadas.....	85
Figura 81 – Distribuição de tensões $\tau_{xy}$ a meio das juntas adesivas. ....	86
Figura 82 – Distribuição de tensões $\tau_{xy}$ a meio da espessura do adesivo em função de $x/L$ para as juntas híbridas e soldadas.....	87
Figura 83 - Valores experimentais médios de $P_m$ e valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente das juntas soldadas.....	88
Figura 84 - Valores experimentais médios de $P_m$ e valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente com o adesivo Araldite® AV138.....	89
Figura 85 - Valores experimentais médios de $P_m$ e valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente com o adesivo Araldite® 2015 .....	90
Figura 86 - Valores experimentais médios de $P_m$ e valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente com o adesivo Sikaforce®7752 .....	90
Figura 87 - Valores experimentais médios de $P_m$ e valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente com o adesivo Araldite® AV138.....	91
Figura 88 - Valores experimentais médios de $P_m$ e valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente com o adesivo Araldite® 2015 .....	92
Figura 89 - Valores experimentais médios de $P_m$ e valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente com o adesivo Sikaforce®7752 .....	93
Figura 90 - Variação de $P_{m\acute{a}x}$ para os diferentes critérios de propagação para juntas soldadas.....	94
Figura 91 - Variação de $P_{m\acute{a}x}$ para os diferentes critérios de propagação para o adesivo Araldite® AV138.....	95
Figura 92 - Variação de $P_{m\acute{a}x}$ para os diferentes critérios de propagação para o adesivo Araldite® 2015 .....	95

---

Figura 93 - Variação de $P_{máx}$ para os diferentes critérios de propagação para o adesivo Sikaforce®7752 .....	96
Figura 94 - Variação de $P_{máx}$ para os diferentes critérios de propagação para o adesivo Araldite® 2015 .....	97
Figura 95 - Variação de $P_{máx}$ para os diferentes critérios de propagação para o adesivo Sikaforce®7752 .....	98
Figura 96 - Variação de $P_{máx}$ para os diferentes critérios de propagação para o adesivo Araldite® AV138.....	98
Figura 97 - Energia dissipada dos ensaios experimentais e numéricos com critério de iniciação QUADS que assume diferentes critérios de propagação .....	99



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação das energias e distâncias de ligação [3].....	7
Tabela 2 - Fatores que influenciam a escolha do adesivo [13] .....	10
Tabela 3 - Tipos de adesivos epóxico [25, 31].....	20
Tabela 4 - Adesivos fenólicos modificados [25] .....	21
Tabela 5-Principais características dos adesivos anaeróbicos [7, 25].....	22
Tabela 6 - Principais características dos adesivos cianoacrilatos [7, 25] .....	23
Tabela 7 - Principais características dos adesivos acrílicos modificados [7, 25] .....	24
Tabela 8- Principais características dos adesivos de poliuretano [15, 25].....	24
Tabela 9 - Classificação dos processos de soldadura segundo o estado dos materiais de base e de adição [35].....	26
Tabela 10 - Vantagens de ligações soldadas [36] .....	27
Tabela 11 - Desvantagens das ligações soldadas [36] .....	27
Tabela 12 - Vantagens e desvantagens do processo de soldadura por pontos [35] .....	29
Tabela 13 - Vantagens e desvantagens de ligações aparafusadas [2, 39] .....	31
Tabela 14 – Critérios de rotura testados por da Silva et al. (2009b) em vários modelos analíticos $\tau$ - tensão de corte, $\tau_r$ tensão de rotura, $\gamma$ - deformação ao corte tensão de rotura, $\gamma_p$ -deformação plástica ao corte, $\epsilon_e$ -deformação de von Misses equivalente $\epsilon_r$ -deformação de rotura à tração , , GY (global yielding ou cedência global no adesivo) [46] .....	36
Tabela 15 - Tabela dos valores médios dos ensaios de tração do aço (DIN C45E) .....	52
Tabela 16 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [6].....	53
Tabela 17 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [82] .....	54
Tabela 18 – Propriedades mecânicas do adesivo Sikaforce 7752® [84].....	55
Tabela 19 - Dimensões das zonas de malha, tipo de malha, refinamento, e distribuição na análise da resistência das juntas adesivas.....	77
Tabela 20 - Dimensões das zonas de malha, tipo de malha, refinamento, e distribuição na análise da resistência das juntas híbridas .....	79
Tabela 21 - Percentagens de desvio entre os valores de energia dissipada numérica e experimental de juntas soldadas.....	100

---

Tabela 22 - Percentagens de desvio entre os valores de energia dissipada numérica e experimental para juntas adesivas e híbridas com o adesivo Araldite® AV138 ..	100
Tabela 23 - Percentagens de desvio entre os valores de energia dissipada numérica e experimental para juntas adesivas e híbridas com o adesivo Araldite® 2015 .....	101
Tabela 24 - Percentagens de desvio entre os valores de energia dissipada numérica e experimental para juntas adesivas e híbridas com o adesivo Sikaforce® 7752 ...	102
Tabela 25 - percentagem de erro dos critérios QUADS e MAXS por comparação com os resultados experimentais .....	105

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>1</b>
<b>1.3</b>	<b>Organização do relatório</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Técnicas de união entre componentes</b> .....	<b>5</b>
2.1.1	Ligações adesivas.....	6
2.1.1.1	Vantagens e desvantagens .....	12
2.1.1.2	Esforços e modos de rotura .....	13
2.1.1.3	Configurações mais comuns de junta .....	17
2.1.1.4	Adesivos estruturais.....	19
2.1.2	Ligações soldadas .....	25
2.1.2.1	Soldadura de Resistência por Pontos .....	27
2.1.3	Ligações aparafusadas.....	29
<b>2.2</b>	<b>Previsão de resistência de juntas adesivas</b> .....	<b>31</b>
2.2.1	Métodos analíticos .....	31
2.2.1.1	Critérios de rotura.....	35
2.2.2	Métodos numéricos .....	37
2.2.2.1	Mecânica dos meios contínuos.....	37
2.2.2.2	Mecânica da fratura.....	38
2.2.2.3	Modelos de dano coesivo .....	39
2.2.2.4	Mecânica do dano.....	40
2.2.2.5	Método de Elementos Finitos Extendido.....	41
<b>2.3</b>	<b>Juntas híbridas</b> .....	<b>42</b>

---

2.3.1	Juntas adesivas-soldadas.....	43
2.3.2	Juntas adesivas-aparafusadas .....	45
2.3.3	Juntas adesivas-rebitadas.....	46
2.3.4	Outros tipos de juntas híbridas .....	47
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>51</b>
<b>3.1</b>	<b>Trabalho experimental .....</b>	<b>51</b>
3.1.1	Materiais utilizados .....	51
3.1.1.1	Substratos .....	51
3.1.1.2	Adesivos .....	52
3.1.1.2.1	Araldite® AV138 .....	53
3.1.1.2.2	Araldite® 2015.....	54
3.1.1.2.3	Sikaforce® 7752.....	55
3.1.2	Geometria das juntas .....	56
3.1.3	Processo de fabrico .....	56
3.1.4	Ensaio das juntas .....	60
3.1.5	Resultados obtidos .....	61
3.1.5.1	Juntas Soldadas.....	61
3.1.5.2	Juntas adesivas e híbridas com o Araldite® AV138.....	62
3.1.5.3	Juntas adesivas e híbridas com o Araldite® 2015 .....	67
3.1.5.4	Juntas adesivas e híbridas Sikaforce® 7752 .....	69
3.1.6	Análise dos resultados obtidos- comparação dos valores de $P_{max}$ .....	72
<b>3.2</b>	<b>Trabalho numérico .....</b>	<b>74</b>
3.2.1	Condições da análise numérica .....	74
3.2.2	Modelo de dano .....	80
3.2.2.1	Determinação das propriedades de dano.....	81
3.2.3	Análise de tensões na junta.....	82
3.2.3.1	Tensões de arrancamento .....	82
3.2.3.1.1	Juntas adesivas.....	82
3.2.3.1.2	Juntas híbridas .....	84

---

---

3.2.3.2	Tensões de corte.....	85
3.2.3.2.1	Juntas adesivas.....	85
3.2.3.2.2	Juntas híbridas.....	86
3.2.4	Previsão da resistência.....	87
3.2.4.1	Estudo do critério de iniciação.....	88
3.2.4.1.1	Juntas adesivas e soldadas.....	88
3.2.4.1.2	Juntas híbridas.....	91
3.2.4.2	Estudo critério de propagação.....	93
3.2.4.2.1	Juntas adesivas e soldadas.....	93
3.2.4.2.2	Juntas híbridas.....	97
3.2.5	Estudo da energia dissipada.....	99
4	CONCLUSÕES.....	105
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	109



# INTRODUÇÃO

**1.1** Contextualização

**1.2** Objetivos

**1.3** Organização do relatório



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Vindo dos tempos mais remotos a adesão/ligação de diferentes materiais era uma dificuldade existente. As ligações adesivas possibilitam essa união, a sua utilização tem vindo a aumentar cada vez mais devido às diferentes vantagens que apresentam em relação aos métodos mais tradicionais. A indústria aeronáutica e automóvel foram as grandes impulsionadoras para a evolução desta técnica de união, existindo cada vez mais investigação (estudo de comportamento) para desenvolvimento de novos adesivos e desenvolvimento de *software* de simulação de forma a otimizar as ligações adesivas. Os adesivos podem ser mais resistentes e frágeis, como é o caso do Araldite® AV138, ou menos resistentes e dúcteis, como por exemplo o SikaForce® 7752, sendo que estes são os principais fatores que influenciam a resistência da ligação adesiva.

As juntas adesivas apresentam como vantagens a melhor distribuição de tensões porque não existe a necessidade de furos, têm um bom comportamento à fadiga e resistência à corrosão. A desvantagem destas juntas está associada à concentração de tensões na extremidade da junta provocada pela deformação diferencial dos substratos na zona de sobreposição. De forma a aumentar a resistência das juntas adesivas é possível optar por ligações híbridas, que combinam a ligação adesivas com outra técnica de ligação, como por exemplo, rebitada ou soldada.

Dando maior importância às juntas híbridas adesivas-soldadas, estas proporcionam vantagens como aumento de resistência e rigidez, maior resistência ao arrancamento, clivagem e permitem fabricação mais fácil, já que não são necessárias fixações durante a cura do adesivo. O objetivo do ponto de soldadura é de, quando o adesivo entrar em rotura, a ligação soldada permitir manter a ligação de forma a evitar uma falha imediata.

De forma entender melhor o comportamento deste tipo de juntas, é importante avaliar/simular o seu comportamento através de modelos experimentais e numéricos. Desta forma, esta dissertação apresenta um caso de estudo numérico por MEFE, no sentido de validar esta técnica numérica para o projeto de juntas híbridas.

## 1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo o estudo numérico do comportamento de juntas adesivas, soldadas e híbridas (soldadas por pontos e adesivas) do tipo T-peel sujeitas a

carregamentos de tração, sendo os aderentes de aço de baixa liga DIN C45E. O estudo numérico será feito no software Abaqus® através do MEFE para a simulação do processo de rotura das juntas. Para o estudo da influência do tipo de adesivo, foram considerados 3 tipos de adesivos: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752.

Foram considerados os resultados experimentais obtidos no trabalho de Almeida [2], posteriormente comparados com a análise numérica pelo MEFE. Foi feita uma comparação de resistência das juntas através da força máxima. Os resultados experimentais foram comparados com análises numéricas detalhadas pelo MEFE.

O objetivo desta análise é de estimar a capacidade desta técnica para avaliar o desempenho das juntas adesivas, soldadas e híbridas T-peel, de forma a evitar a necessidade de realizar ensaios experimentais. A comparação dos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  numéricos e experimentais permite aferir a capacidade dos MEFE em prever a resistência das juntas em T-peel, de forma a ser possível prever o seu comportamento, e ainda averiguar qual o tipo de adesivo a usar de forma a maximizar a sua resistência.

### 1.3 Organização do relatório

A organização do relatório está dividida em 4 capítulos que abordam diferentes conteúdos, mas que vão de encontro ao objetivo final.

No capítulo 1 é apresentado o enquadramento geral da tese, onde são referidos o contexto, os principais objetivos e a organização da mesma.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, de forma a poder entender melhor o tema de estudo, onde é descrito as técnicas de união entre componentes, previsão de resistência de juntas, fazendo referência aos métodos analíticos e numéricos mais usuais e, para finalizar, uma breve informação sobre os tipos de juntas existentes bem como as suas vantagens e desvantagens.

No subcapítulo 3.1 é descrito o trabalho experimental realizado na tese de Almeida [2], onde é feita uma descrição dos materiais, a geometria das juntas utilizadas, o processo de fabrico bem como os ensaios realizados, sendo depois efetuada a sua análise.

O subcapítulo 3.2 apresenta todo o trabalho numérico realizado no Abaqus®, indicando as condições da análise numérica, o modelo de dano utilizado, apresentando depois a análise de tensões das juntas e sendo de seguida feita uma comparação das variáveis de dano utilizadas, indicando os resultados obtidos e a análise dos mesmos.

No capítulo 4 são apresentadas as relações finais do estudo feito e possíveis melhorias.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## **2.1 Técnicas de união entre componentes**

- 2.1.1 Ligações adesivas
- 2.1.2 Ligações soldadas
- 2.1.3 Ligações aparafusadas

## **2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas**

- 2.2.1 Métodos analíticos
- 2.2.2 Métodos numéricos

## **2.3 Juntas híbridas**

- 2.3.1 Juntas adesivas-soldadas
- 2.3.2 Juntas adesivas-aparafusadas
- 2.3.3 Juntas adesivas-rebitadas
- 2.3.4 Outros tipos de juntas híbridas



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os tipos de ligações adesivas mais utilizados e referidos os tipos de esforços mais solicitados, dando também importância aos modos de rotura e geometria juntas mais utilizadas. São apresentadas também as diferentes famílias de adesivos estruturais. É feita uma descrição dos métodos de junção de juntas híbridas mais utilizadas apresentando as suas vantagens e limitações. O capítulo é concluído sendo feita referência aos métodos analíticos e numéricos na previsão da resistência das ligações adesivas.

### 2.1 Técnicas de união entre componentes

A indústria ao longo dos tempos tem conhecido uma evolução enorme na diversificação de processos de ligação e das tecnologias utilizadas. Os métodos tradicionais de ligação como por exemplo por aperto mecânico (parafusos, rebites, etc.) e soldadura cada vez mais são tomados como soluções de segundo plano, pelo que se tem vindo a desenvolver o processo de ligação de materiais recorrendo à colagem com adesivos estruturais, que hoje em dia é uma tecnologia de primeira escolha de projeto [3].



Figura 1 - Principais métodos de ligação (elaboração própria)

As técnicas de união podem-se dividir em 2 grupos:

- **União móvel (não permanente):** os elementos utilizados para fixação podem ser colocados ou retirados do conjunto sem causar qualquer dano às peças que foram unidas. Este tipo de união é efetuado normalmente através de parafusos e porcas.
- **União permanente:** neste tipo de união não existe possibilidade de separar as peças sem danificar os elementos. Neste caso os processos que merecem um maior destaque são a soldadura, brasagem e ligação por adesivos.

Um dos principais motivos que tornam os adesivos como primeira escolha é a necessidade de unir materiais completamente distintos, como por exemplo metal e plástico, sem a necessidade de furos ou peças secundárias que fixem a união.

### 2.1.1 Ligações adesivas

Os materiais denominados adesivos são aqueles que promovem a adesão entre dois substratos, através da ação de forças intermoleculares. Portanto, a adesão é um fenómeno intersticial, enquanto o adesivo é o material que promove a união entre os vários materiais [4].



Figura 2 - Esquema ilustrativo dos diferentes elementos do processo de adesão [5]

Na Figura 2 está representado um esquema ilustrativo do processo de adesão. Os substratos (ou aderentes) contêm a superfície em que o adesivo vai ser utilizado. Por sua vez, o adesivo é aquele que vai promover a ligação entre os substratos. A interfase é a ligação entre os dois materiais, tendo por isso características químicas e físicas diferentes, e é determinante para a qualidade da ligação. O primário é uma substância aplicada nos substratos, se necessário, com o objetivo de facilitar a adesão e/ou proteger as superfícies do substrato [5].

Para perceber a adesão é necessário, em primeiro lugar, compreender as forças envolvidas entre átomos ou moléculas para depois aplicar este conhecimento ao que ocorre nas superfícies. Deste modo, existem forças (atrativas intermoleculares)

responsáveis pelo fenómeno físico-químico da adesão que unem os átomos para formarem moléculas. A adesão surge então quando os átomos ou as moléculas de um corpo estão suficientemente próximos dos átomos ou moléculas da superfície de outro corpo para, assim, permitir a ligação com as respetivas forças de ligação. A distância entre os átomos ou moléculas dos dois corpos deve ser da ordem de grandeza de alguns nanómetros. Em última análise, estas forças ligam os materiais [6]. Na Tabela 1 é possível verificar a diferença da energia de ligação necessária para os diferentes tipos de ligação.

Tabela 1 – Comparação das energias e distâncias de ligação [3]

Tipo de ligação		Energia da ligação [kJ/mole]	Comprimento da ligação [ $\times 10^{-10}$ m]
<b>Ligações primarias interatómicas</b>			
Ligações Químicas	Iónica	600 a 1200	
	Covalente	60 a 800	1 a 6
	Metálica	110 a 350	
<b>Ligações secundarias interatómicas e intermoleculares</b>			
Ligações do tipo van der Waals	London	0,08 a 40	
	Debye	Até 2	2 a 6
	Keesom	4 a 20	
Ligações de hidrogénio		Até 40	3
<b>Ligações dador-recetor</b>			
	Interações ácido-base (Bronsted)	Até 1000	
	Interações ácido-base (Lewis)	Até 80	

Apesar das forças de ligação anteriormente referidas, quando se encostam as superfícies de dois corpos não ocorre a junção entre eles por adesão. Tal acontece porque uma superfície sólida possui rugosidade que impede a aproximação para a auto-adesão. Deste modo, justifica-se a necessidade dos adesivos, dado que estes materiais possuem mobilidade molecular para harmonizar o contacto com as superfícies, o que permite a atuação das forças intermoleculares [3], com a exceção de superfícies cuja viscosidade é baixa, por exemplo: polímeros muito com pouca espessura apresentam propriedades autoadesivas [3].

A Figura 3 representa a força de adesão, que depende da afinidade entre o adesivo e os substratos. Já a coesão é a própria resistência interna do adesivo, quando sujeito a esforços. Quanto mais fortes forem as forças do adesivo, maior será a coesão, e consequentemente a resistência do adesivo [7].

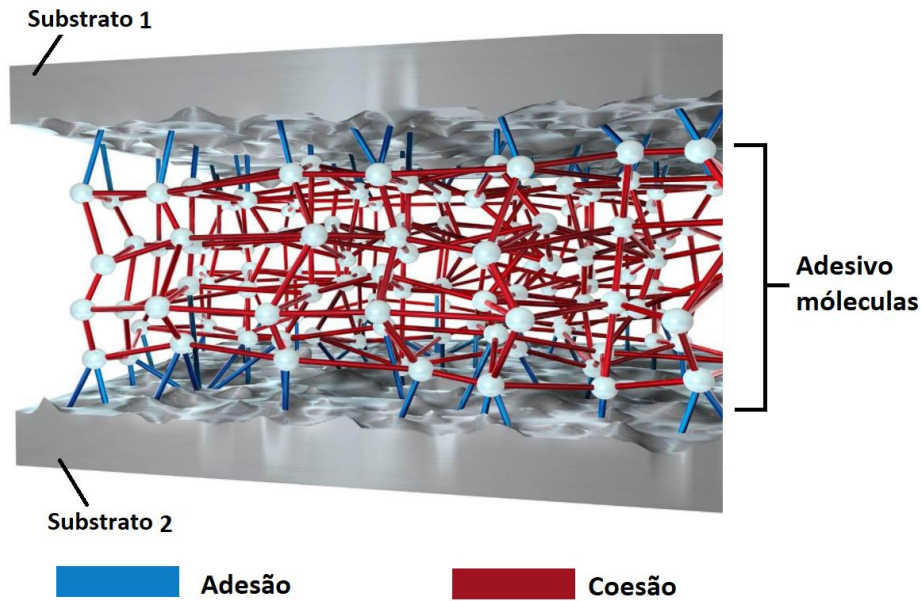


Figura 3 - As forças de adesão e coesão na adesão [8]

Um parâmetro importante nas ligações adesivas é o comprimento de sobreposição porque, através da sua variação, permite aumentar a resistência da junta. No entanto, a partir de um dado valor o seu aumento de resistência é insignificante, como representado na Figura 4. Portanto, de forma a equilibrar a resistência da junta com o peso do conjunto, o comprimento de sobreposição é um fator a ter em conta.

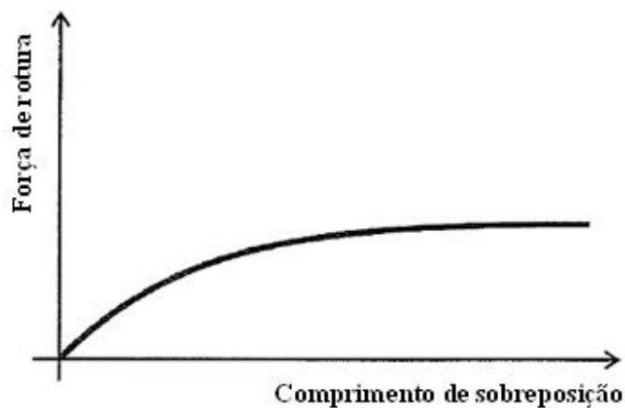


Figura 4 - Resistência de uma junta de simples sobreposição em função do comprimento de sobreposição [9]

Sobre outra perspectiva deve-se ter em consideração que as alterações geométricas podem em alguns casos enfraquecer as peças, devido por exemplo, as furações que são necessárias realizar, dado que a tensão que fica concentrada pode provocar a fadiga precoce do material. Deste modo, a espessura do material terá de ser consequentemente aumentada para obter a resistência de junta necessária [10].

Para além do mencionado até então, importa ainda fazer referência ao facto das ligações adesivas permitirem diminuir o número de componentes (parafusos, grampos). No entanto, é importante ter em consideração que a rugosidade das superfícies pode ser alterada por meios mecânicos, químicos e físicos, e para que o encravamento do adesivo nas irregularidades da superfície seja conseguido, é necessário que o adesivo molhe convenientemente o substrato para promover uma molhagem adequada das superfícies [11].

A ligação adesiva permite aos projetistas combinar diferentes materiais, de modo a que as qualidades específicas de cada um sejam utilizadas para a obtenção de um melhor resultado. O adesivo facilita a ligação de superfícies, produzindo uma montagem mais leve. Assim, neste tipo de ligações não existe alterações estruturais e por norma as propriedades dos materiais utilizados não são afetadas, como sucede com os métodos tradicionais.

As uniões por adesão apresentam menos perturbações geométricas, facultando uma melhor aparência do produto. As costuras não são visíveis depois da montagem. Esta vantagem oferece aos técnicos a oportunidade de melhorar a estética do produto.

Perante o exposto, verifica-se que este tipo de ligação tem inúmeras vantagens que serão descritas em pormenor no decorrer deste trabalho e por isso atualmente tem sido aproveitado por um conjunto vasto de indústrias, como a indústria automóvel (Figura 5) e a indústria aeronáutica.

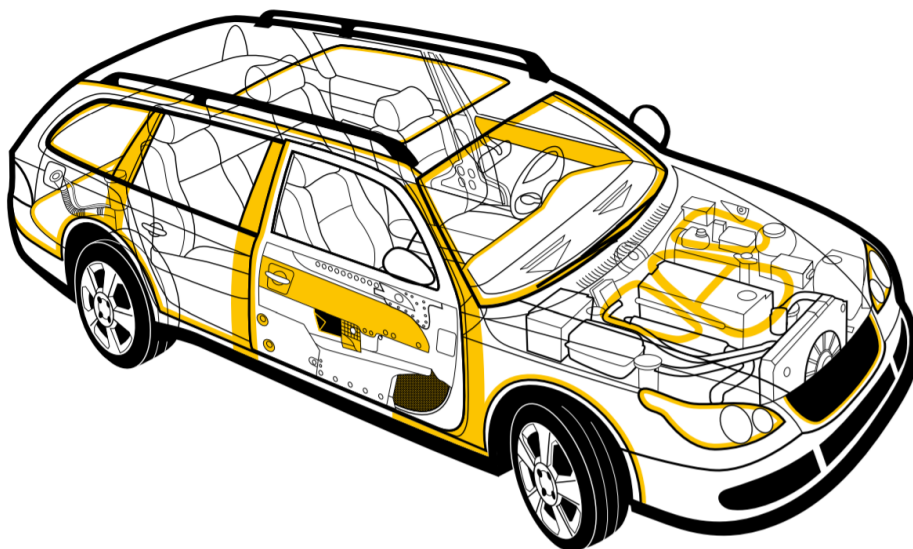


Figura 5 - Diferentes locais de aplicação dos adesivos em automóveis [12]

Contudo, as ligações adesivas estão ainda subordinadas a diferentes variáveis como, por exemplo, a composição das superfícies ou condições ambientais. Outros fatores deverão igualmente ser avaliados, por exemplo, o adesivo tem de ser adequado aos materiais que vai unir, ser ainda conciliável com os métodos de fabrico, e suportar as condições

ambientais operacionais. Também é necessário, neste processo, ter em consideração a preparação das superfícies, os métodos de aplicação, o tempo e os custos destes aspetos em todo o processo de ligação.

A Tabela 2 apresenta um resumo dos diferentes fatores que influenciam a seleção de um adesivo.

Tabela 2 - Fatores que influenciam a escolha do adesivo [13]

<b>Fatores que influenciam a escolha do adesivo</b>	
Tensões	Tração; Corte; Impacto; Arrancamento; Clivagem; Fadiga.
Fatores químicos	Externos (relacionados com o serviço) ; Internos (efeito dos aderentes nos adesivos).
Exposição	Desagregação; Luz; Oxidação; Humidade; Salinidade.
Temperatura	Alta; Baixa; Cíclica.
Fatores biológicos	Bolor; Roedores ou vermes.
Propriedades de trabalho	Aplicação; Tempo de ligação ou gama de temperaturas; Aderência; Tempo de cura; Estabilidade de armazenamento; Cobertura.

Como referido anteriormente, para que exista ligação de um adesivo a uma superfície é necessário existir um conjunto de forças físicas, e químicas que se acrescentam e influenciam mutuamente. Nesta linha de pensamento, e com o objetivo de explicar o mecanismo de adesão desenvolveram-se diversas abordagens teóricas.

Contudo, não existe uma teoria única que se baseie somente nos princípios físico-químicos e que desta forma permita explicar a adesão de uma forma completa. As teorias mais divulgadas são [3]:

- **Teoria electrostática** – foi desenvolvida nomeadamente para adesivos em fita sensíveis à pressão (*pressure sensitive tape*). A força da adesão é atribuída à transferência de eletrões através da interface que origina a criação de cargas negativas e positivas que se atraem;
- **Teoria da difusão** – esta teoria requer que os substratos e o adesivo sejam poliméricos, compatíveis e miscíveis. Aplica-se à soldadura de termoplásticos por solvente ou calor, e a adesão ocorre quando uma superfície difunde na estrutura de uma segunda superfície na qual se forma uma ponte de ligação ou ligação através da interface;
- **Teoria da adsorção** - esta teoria explica o mecanismo de adesão através das forças interatómicas que se encontram na superfície do adesivo e do substrato quando se estabelece um contacto molecular íntimo na interface. A adsorção física favorece a resistência das juntas adesivas estruturais, é o mecanismo de adesão mais importante;
- **Teoria mecânica** - neste caso a força de adesão predominante corresponde à fixação do adesivo nas irregularidades da superfície do substrato. Segundo esta teoria, para uma boa adesão, a superfície a colar deve apresentar uma micro-morfologia adequada, devendo selecionar-se um adesivo com viscosidade baixa para preencher os detalhes da superfície.

Existem também diversos tipos de adesivos que se podem classificar da seguinte forma, de acordo com os materiais poliméricos: termoplásticos, termoendurecíveis e elastómeros. Os termoplásticos são polímeros lineares ou que podem ser fundidos pela adição de calor, permitindo uma fácil deposição nas juntas. Os termoendurecíveis apresentam uma estrutura reticulada que se degrada com temperaturas elevadas. No caso dos elastómeros, estes materiais podem ser estendidos sob a ação de forças elevadas. A presença de reticulantes nos elastómeros impossibilita a sua fusão através da adição de calor. Estes adesivos são uma boa escolha para ligar substratos com diferentes expansões térmicas. Cada um deste tipo de adesivo apresenta pontos fracos e fortes ao nível das suas propriedades. Pode-se referir como pontos fracos a maior rigidez em relação aos termoplásticos, e a fraca resistência afetada pelo calor dos elastómeros.

Todos os processos de ligação têm as suas vantagens e desvantagens e os métodos de ligação referidos nesta dissertação não são exceção. No entanto, é necessário ter ponderação aquando da generalização das vantagens e desvantagens associadas a este tipo de ligação. Neste sentido, o próximo ponto vai descrever em pormenor estas vantagens e desvantagens.

### 2.1.1.1 Vantagens e desvantagens

O tema ligação adesiva envolve diversos fatores importantes para o bom comportamento da junta, entre os quais se podem salientar as forças envolvidas na adesão, o material dos substratos, os adesivos e os processos de preparação da superfície. Por fim, é necessário realizar ensaios com juntas adesivas ou sobre os próprios adesivos para determinar as suas propriedades.

O adesivo distribui as cargas sobre a área total da união, em vez de centralizar-se apenas nalguns pontos, resultando numa distribuição mais uniforme (Figura 6). Assim, os produtos que são montados com adesivos são mais resistente à flexão [10].

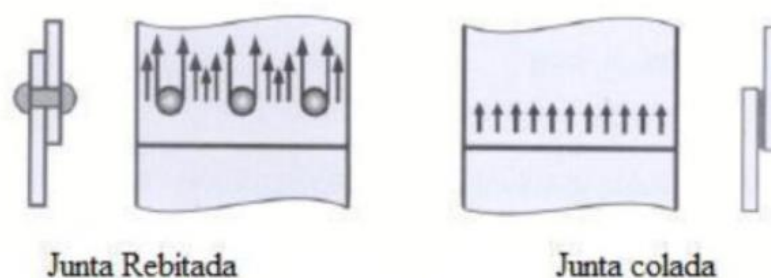


Figura 6 - Exemplo de concentração de tensões em juntas rebitadas e adesivas [14]

Nos métodos tradicionais de ligações, por exemplo, peças rebitadas, as convergências de tensões que ocorrem na zona de aperto dos parafusos podem levar à rotura do material. No entanto, quando a ligação é feita com adesivos, devido às suas propriedades viscoelásticas, observa-se uma significativa diminuição de vibrações, o que consequentemente permite melhorar a resistência à fadiga dos componentes utilizados [15].

Importa referir que nas ligações adesivas não existem alterações ao nível da estrutura dos componentes utilizados porque, ao contrário do que se verifica nos métodos tradicionais, não existe recurso ao uso de elevadas temperaturas. Como já referido anteriormente, as ligações adesivas permitem ao projetista selecionar um maior número de materiais [10]. Devido à capacidade de unir materiais distintos, as ligações adesivas permitem obter estruturas mais rígidas. Devido à ausência de outros materiais de ligação, as juntas adesivas têm melhores propriedades de resistência à corrosão, fazendo com que exista uma união mais eficaz. As ligações adesivas também têm a capacidade de funcionar como elemento ligante e vedante.

De seguida são apresentadas as principais vantagens e desvantagens da ligação adesiva [3, 16-18].

#### **Vantagens**

- Fornece grande área de suporte ao esforço;
- Permite manter a integridade dos materiais a unir;

- As juntas são completamente seladas;
- Fornece isolamento térmico e elétrico;
- Excelente resistência à fadiga;
- Amortece as vibrações e absorve o choque;
- Minimiza ou impede a corrosão galvânica entre metais dissimilares;
- Permite unir todas as formas e espessuras;
- Fornece contornos suaves;
- Junta as juntas;
- Junta-se a qualquer combinação de materiais diferentes;
- Muitas vezes menos caro e mais rápido do que fixação mecânica;
- O calor, se necessário, é muito baixo para afetar partes de metal;
- Fornece uma relação força / peso atrativa.

### **Desvantagens**

- As superfícies devem ser cuidadosamente limpas;
- As juntas devem ser projetadas para eliminar os esforços arrancamento e clivagem;
- O desempenho pode ser degradado por ambientes hostis;
- Não são validos testes não destrutivos;
- Podem ser necessários longos tempos de cura;
- Limitação na temperatura de operação contínua superior (geralmente 350 ° F);
- Pode ser necessário calor e pressão;
- Normalmente é necessário gabari e/ou fixadores enquanto o adesivo se encontra na cura;
- Normalmente é necessário um controle de processo rígido;
- Inspeção de juntas acabadas difíceis;
- A vida útil depende do ambiente;
- São necessárias considerações ambientais, de saúde e de segurança;
- Poderá ser necessário formação especial;
- Custo de equipamentos poderão ser elevados.

#### *2.1.1.2 Esforços e modos de rotura*

Todas as ligações adesivas estão sujeitas a esforços diversos. Os esforços a destacar são os de tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento. As juntas adesivas, ao estarem sujeitas aos diferentes tipos de esforços anteriormente mencionados, podem sofrer rotura sob diversos modos, tais como: rotura coesiva, rotura adesiva, rotura mista e rotura do substrato.

### **Esforços**

Os esforços de tração (Figura 7) e compressão (Figura 8) surgem quando as forças são aplicadas no plano perpendicular ao plano de colagem. Neste caso, a distribuição das tensões é uniforme. As juntas que funcionem em regime de tração ou compressão

devem encontrar-se perfeitamente alinhadas, para desta forma garantirem um carregamento axial uniforme.

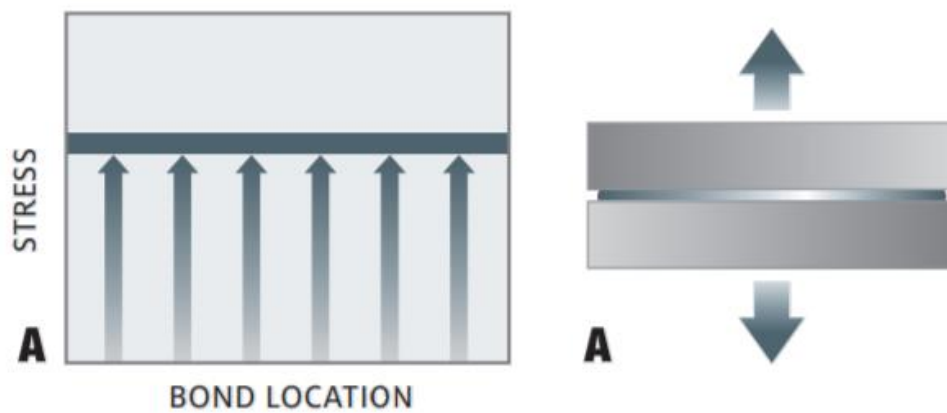


Figura 7 - Esforço de tração e respectiva distribuição de tensões [19]

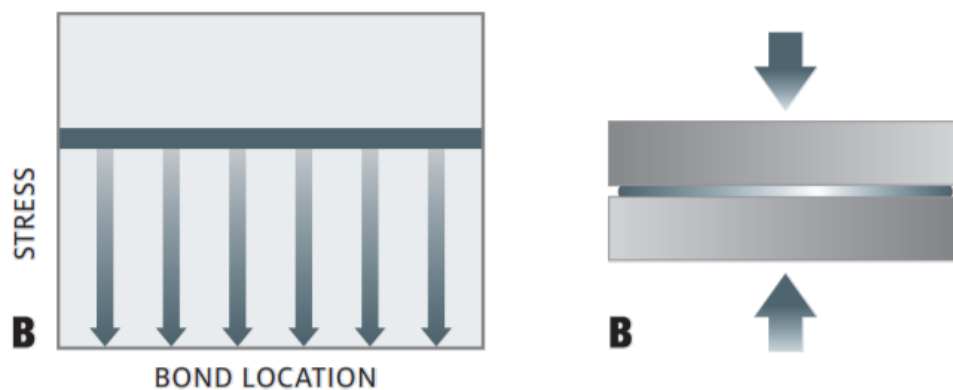


Figura 8 - Esforço de compressão e respectiva distribuição de tensões [19]

Na Figura 9 exibe-se um esforço de corte. Nas solicitações de corte existe o deslizamento de dois aderentes e conseqüentemente os extremos da junta estão sujeitos a um maior nível de tensões [20] como representado na Figura 9. Este esforço sucede como consequência da deformação diferencial de cada um dos aderentes [21]. Neste caso, a largura da sobreposição é mais importante do que o comprimento. Assim, ao ser aumentada a largura da ligação a junta fica mais resistente, dado que paralelamente são também aumentados os extremos da zona de sobreposição. No entanto, é necessário referir que quando se aumenta o comprimento da sobreposição, também aumenta a resistência da junta, embora esta seja limitada até um dado comprimento [22, 23].

Seguidamente, a Figura 10 mostra uma tensão de clivagem que representa uma tensão concentrada num extremo da junta, provocada por forças de tração aplicadas na extremidade do aderente e perpendicularmente ao plano da junta.

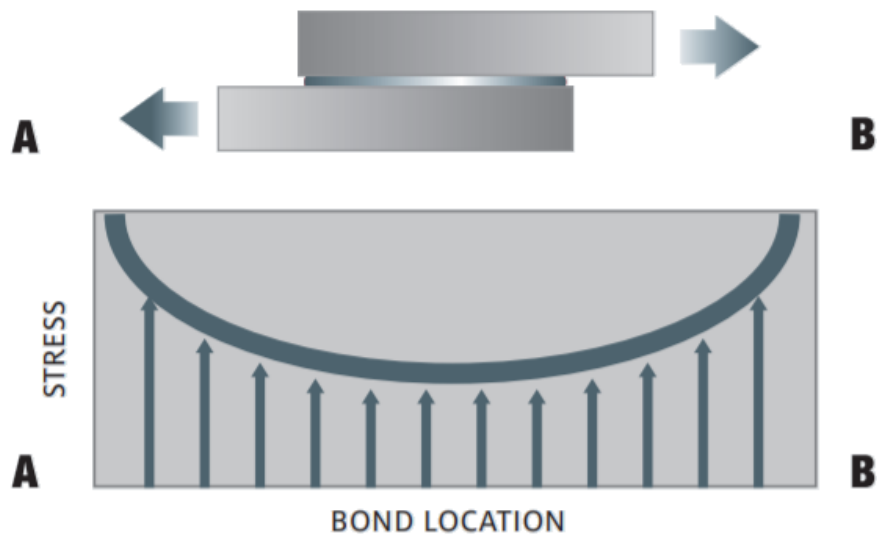


Figura 9 - Esforço de corte e respetiva distribuição de tensões de corte numa junta adesiva [19]

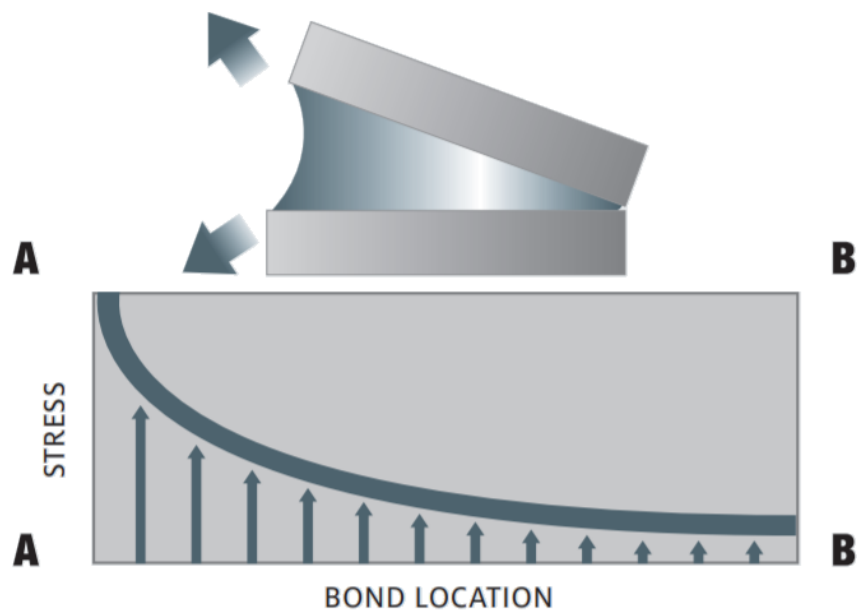


Figura 10 - Esforços de clivagem e respetiva distribuição de tensões de clivagem numa junta adesiva [19]

Por fim, apresenta-se o arrancamento, que consiste no aparecimento de uma tensão de arrancamento concentrada na zona limite da junta (Figura 11). No arrancamento, um ou os dois aderentes são bastante flexíveis e podem deformar, o que leva à concentração das forças atrativas nas extremidades da ligação.

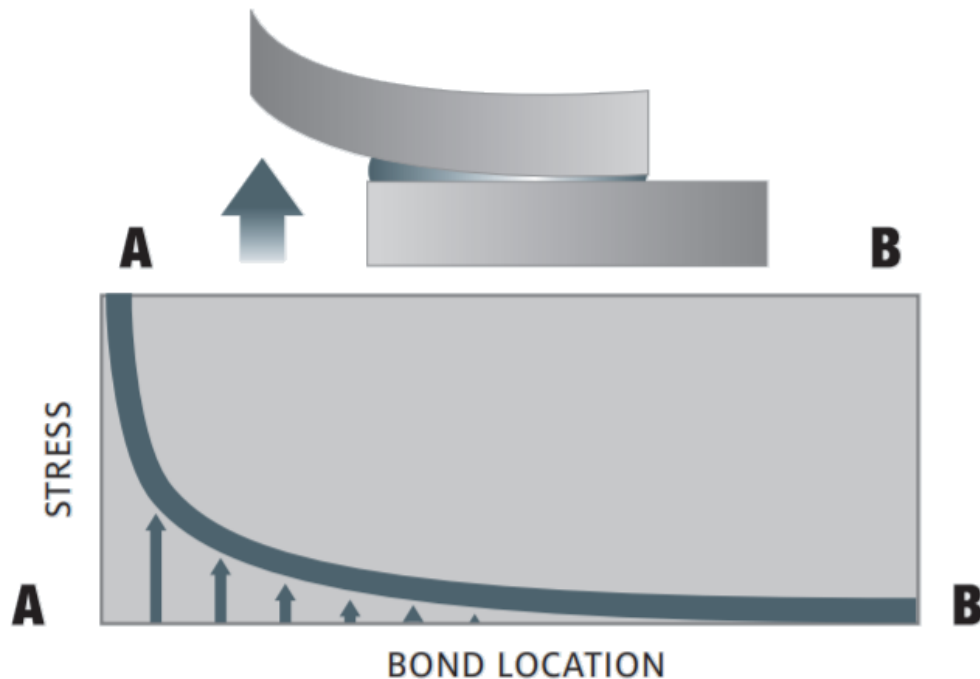


Figura 11 - Esforços de arrancamento e respetiva distribuição de tensões de arrancamento numa junta adesiva [19]

### Modos de rotura

Pretende-se que uma junta adesiva, tal como já foi mencionado anteriormente, seja o mais resistente possível. No que concerne à rotura espera-se que ocorra sempre pelo substrato. O modo de rotura evidencia a zona menos resistente da junta permitindo assim avaliar eventuais erros de projeto e implementar alterações dos processos de fabrico.

De seguida apresenta-se a descrição dos 4 principais modos de rotura:

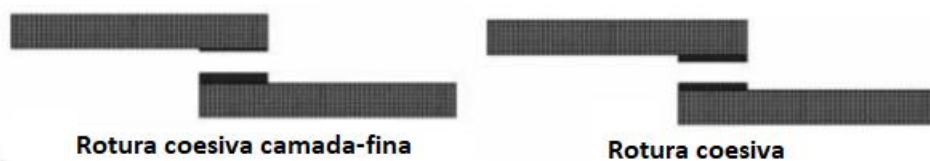


Figura 12 - Diferentes tipos de rotura coesiva [24]

A Figura 12 ilustra os tipos de **Rotura coesiva** que sucedem quando existe uma falha e a mesma se expande ao longo do adesivo. Esta falha pode propagar-se no centro da camada, dando-se assim uma rotura coesiva. Contudo, em termos de controlo de qualidade da ligação adesiva, é recomendável que se verifique uma rotura coesiva.



Figura 13 - Rotura interfacial [24]

A Figura 13 exemplifica uma **Rotura interfacial**, quando esta ocorre entre o adesivo e o aderente. Na maioria dos casos, a ocorrência deste tipo de falha confirma a menor resistência à rotura do adesivo em questão. Este é um tipo de falha que não é aceitável em termos de qualidade e pode ser solucionado através da preparação superficial dos aderentes. A principal causa deste tipo de roturas tem a ver com o facto de as superfícies não estarem devidamente preparadas e limpas antes da aplicação do adesivo. O objetivo da preparação superficial consiste normalmente no aumento da rugosidade das superfícies, de modo a promover o contato mecânico com o adesivo, através das forças de Van der Waals [25]. Os procedimentos dependem dos substratos a ligar e são objeto de normalização.

A **Rotura mista** é uma mistura das ruturas mencionadas anteriormente, existindo zonas em que existe rutura coesiva e outras em que a mesma é adesiva, sendo que as superfícies se caracterizam por uma percentagem de áreas coesivas e adesivas [25].

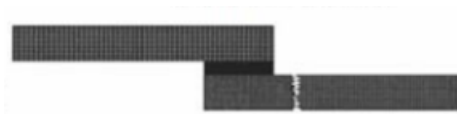


Figura 14 - Rotura pelo aderente [24]

Por fim, a Figura 14 representa a **rotura pelo aderente**, que se verifica quando o adesivo é mais resistente que o material do suporte. Neste caso, o adesivo mantém-se praticamente inalterado e ocorre falha mais ao nível do suporte [3].

É importante que seja feita a correta caracterização da rotura para se ter um entendimento completo ao nível das propriedades da junta.

### 2.1.1.3 Configurações mais comuns de junta

As juntas adesivas podem ter várias formas. As mais comuns são: Junta Sobreposição Simples (JSS), Junta Sobreposição Dupla (JSD) e junta em degraus. Estas e outras configurações estão apresentadas na Figura 15.

Devido à sua facilidade de fabricação e ampla utilização, a JSS tem sido a mais estudada na literatura em termos experimentais. De facto, o carregamento não é colinear, o que introduz flexão dos substratos [25]. Por isso, o adesivo fica sujeito não apenas a corte, mas também a arrancamento na extremidade da junta. A JSD, a junta com chanfro e as

juntas em degrau são projetadas especificamente para diminuir o arrancamento [15]. As juntas com chanfro e com degrau são mais eficientes, mas os custos de fabrico são bastante superiores aos custos das juntas de sobreposição.

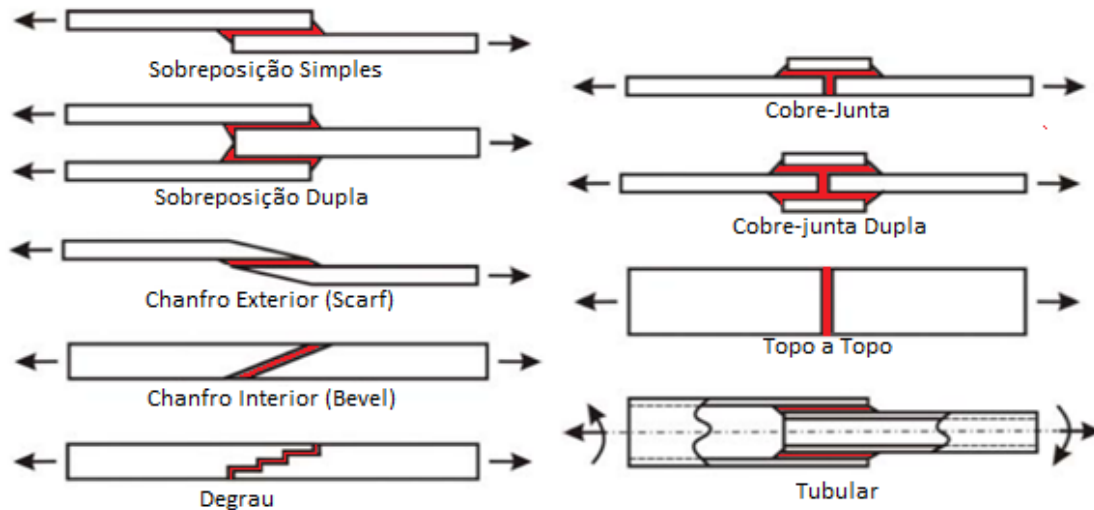


Figura 15 - configurações de juntas [25]

Na elaboração de projetos que envolvam juntas adesivas, nem sempre o projetista consegue cingir aos tipos de junta mais comuns. Por vezes, é necessário utilizar um diferente tipo de junta. No entanto deve-se ter em atenção aos esforços desenvolvidos, de forma a que a junta não fique fragilizada por ação de esforços de clivagem e de forças assimétricas [26].

A Figura 16 representa algumas configurações favoráveis ou não favoráveis de juntas adesivas.

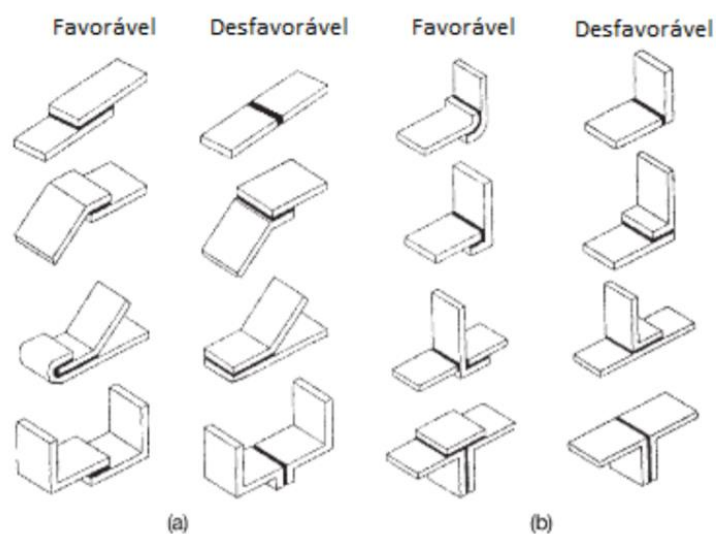


Figura 16 - Diferentes configurações de juntas [26]

#### 2.1.1.4 Adesivos estruturais

Os adesivos estruturais apresentam alta resistência, são definidos como aqueles que possuem resistência ao corte superior a 1000 psi (6,9 MPa) à temperatura ambiente e resistência aos ambientes operacionais mais comuns. A sua principal função é manter estruturas juntas e ser capaz de resistir a altas cargas sem deformação porque o objetivo principal dos adesivos estruturais é resistir à vida útil da aplicação e deve apresentar uma resistência semelhante aos materiais constituintes da estrutura a ser colada. Gauthier [27] afirma que um adesivo estrutural é definido como um material capaz de transferir as forças aplicadas à junta em condições de serviço.

São habitualmente termoendurecíveis que necessitam de reticulação química com a adição de um endurecedor e/ou fornecimento de calor. Também se podem incluir alguns elastômeros termoendurecíveis resistentes, como por exemplo os poliuretanos [3, 16, 28].

A Figura 17 apresenta as diferentes famílias de adesivos consoante a sua capacidade de carga, destacando-se os adesivos estruturais devido à sua capacidade de carga em relação às outras famílias de adesivos.

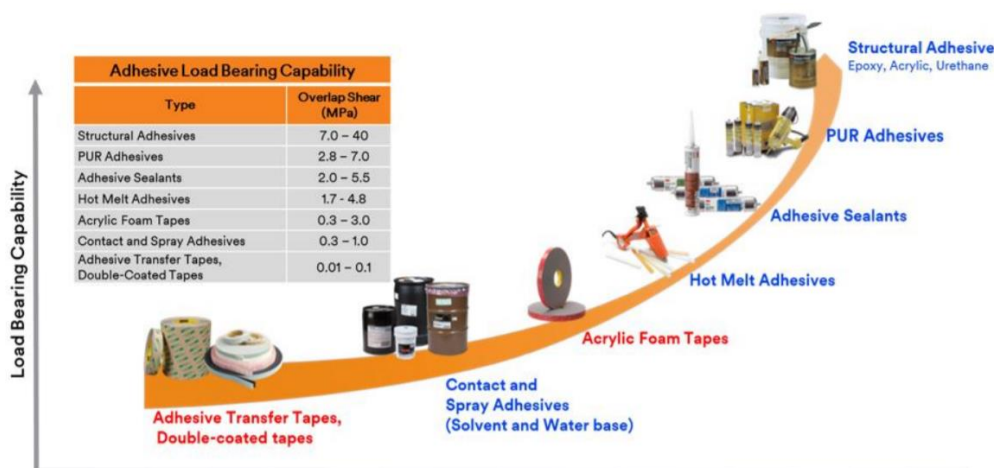


Figura 17 - Diferentes tipos de família de adesivos segundo a sua capacidade de carga [29]

Para além do exposto, importa por fim mencionar que existem diversos tipos de adesivos, consoante a sua natureza (naturais, sintéticos e semi-sintéticos).

Nesta dissertação não se dá relativa importância aos adesivos não estruturais porque estes não têm aptidão para suportar cargas substanciais, e a sua função resume-se apenas a garantir o correto posicionamento dos materiais a ligar. Por outro lado, estes adesivos apresentam baixa resistência ao corte e à temperatura. No entanto estes oferecem bom isolamento e capacidade de amortecimento de vibrações superior aos adesivos estruturais [15, 30].

## Adesivos epóxicos

Os adesivos epóxicos são bastante comercializados nos diferentes tipos de indústria (automóvel, aeronáutica, construção, etc.), sendo utilizados principalmente para aplicações permanentes. Estão disponíveis de diversas formas, tais como adesivos líquidos de baixa viscosidade, pastas sólidas ou filmes, e podem ser comercializados sob a forma de um ou mais componentes (resinas e endurecedores).

A diferente gama de adesivos e endurecedores permite ajustar o adesivo às propriedades mais convenientes para o projeto em causa, sendo extremamente importante assegurar as quantidades exatas de resina e endurecedor para a reação se dar corretamente.

Estes adesivos geralmente têm uma boa resistência química e mecânica, apresentam uma baixa densidade, baixa resistência ao arrancamento (a não ser que sejam modificados com um polímero mais tenaz) e elevada resistência ao corte [3, 10].

A modificação dos epóxicos através da adição de outras resinas (poliamida, polisulfido, fenólico) ou de elastómeros (Epóxido-poliuretano) leva à necessidade de separar os epóxicos nos seguintes grupos identificados na Tabela 3 [31].

Tabela 3 - Tipos de adesivos epóxido [25, 31]

<b>Epóxido-Fenólico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Elevada estabilidade e resistência ao corte a elevadas temperaturas;</li> <li>➤ Resistências de clivagem e arrancamento inferiores aos outros;</li> <li>➤ Cura é feita sob ação da pressão a temperaturas de 170°C.</li> </ul>
<b>Epóxido-Polisulfido</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Grande versatilidade;</li> <li>➤ Usados nas juntas de materiais com características térmicas diferentes;</li> <li>➤ Boa resistência ao meio ambiente, a vibrações e choques.</li> </ul>
<b>Epóxido-Poliamida</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Agente flexibilizante e endurecedor;</li> <li>➤ Processo de cura longo (12 a 16h) e realizado à temperatura ambiente;</li> <li>➤ Sub-grupo epóxido-nylon especialmente concebido para a indústria aeronáutica devido à sua elevada resistência ao arrancamento.</li> </ul>
<b>Epóxido-Nitrilo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Boa resistência ao arrancamento;</li> <li>➤ Existe sob forma de filmes e pode ser aplicado numa vasta gama de temperaturas (-55 a 120°C);</li> <li>➤ Aplicado na construção e manutenção de aviões comerciais a jato.</li> </ul>
<b>Epóxido-vinílico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Melhoram a resistência ao impacto e ao arrancamento;</li> <li>➤ Perdem resistência quando sujeitos a elevadas temperaturas.</li> </ul>
<b>Epóxido-poliuretano</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Têm uma resistência ao arrancamento idêntica à dos adesivos epóxido-poliamida;</li> <li>➤ Boa resistência a choques e vibrações;</li> <li>➤ Boa resistência à fadiga.</li> </ul>

## Adesivos fenólicos

Os adesivos fenólicos dominam o mercado de adesivos para madeira e representam também um dos maiores volumes de qualquer adesivo sintético.

Apresentam-se entre os adesivos de menor custo e podem ser formulados como dispersões de água, para permitir a penetração na estrutura celular da madeira, o que é importante para a formação de ligações permanentes. Para além da madeira, os adesivos fenólicos não modificados são utilizados principalmente como primários em materiais metálicos para preparar as superfícies para a colagem e como ligantes para produtos tão variados como lâ de vidro, tapetes de isolamento, areia de fundição, rodas abrasivas e materiais de revestimento de freio. Estes adesivos destacam-se por uma boa resistência mecânica, boa resistência a temperaturas elevadas e aos agentes ambientais. Como entrave apresentam baixa resistência à corrosão por solventes, baixa resistência ao impacto e são frágeis [15, 25].

Para melhorar as principais características dos adesivos fenólicos, estes são modificados (pela adição de uma resina ou elastómero (nitrilo ou policloropreno)), sendo que o processo de cura se efetua a quente e sobre pressão. A Tabela 4 apresenta os diferentes tipos de adesivos fenólicos modificados e as suas principais características.

Tabela 4 - Adesivos fenólicos modificados [25]

<b>Fenólicos-vinílicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• temperatura máxima de utilização de 130°C;</li> <li>• elevada resistência ao corte e ao arrancamento;</li> <li>• resistência à fadiga boa devido às propriedades plastificantes da fase vinílica;</li> <li>• comercializados como emulsões e filmes ou sob a forma de dois componentes (líquido + pó).</li> </ul>
<b>Fenólicos com nitrilo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• características mecânicas ligeiramente inferiores aos adesivos fenólicos-vinílicos;</li> <li>• consegue preservar as suas propriedades físicas até temperaturas de 160°C;</li> <li>• apresentados sob a forma de filme ou de líquido monocomponente.</li> </ul>
<b>Fenólicos com cloropreno</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tem características semelhantes à dos adesivos com nitrilo;</li> <li>• Resistem a baixas temperaturas até aos -50°C;</li> <li>• mais sensíveis aos agentes químicos que os adesivos anteriormente descritos.</li> </ul>

## Adesivos acrílicos

Os adesivos acrílicos são normalmente utilizados para colar tecidos, plásticos, couro e em alguns casos folhas metálicas. Nos adesivos acrílicos incluem-se os adesivos anaeróbicos, os cianoacrilatos e os acrílicos modificados.

### Anaeróbicos

Por norma estes tipos de adesivos apresentam-se como líquidos monocomponentes que podem ser curados à temperatura ambiente, mas também são comercializados na forma de pastas ou líquidos tixotrópicos (sem solventes) em que o processo de endurecimento se dá pela ação de polimerização do tipo radical-livre porque o adesivo por norma não cura quando se encontra em contacto com o oxigénio. Estes apenas curam quando o ar é excluído da resina.

São bastante utilizados na indústria, na fixação de peças estriadas e roscas, na ligação de peças de geometria cilíndrica e são utilizados como travão líquido de porcas para parafusos. A Tabela 5 resume as principais características dos adesivos anaeróbicos.

Tabela 5-Principais características dos adesivos anaeróbicos [7, 25]

---

Anaeróbicos	Resistência bastante variável podendo ser da ordem da dos epóxidos; Boa resistência a solventes; Preparação da superfície não precisa de ser muito cuidada; Temperatura máxima de utilização próxima dos 150°C; Cura por exclusão do ar; Espessuras finas.
-------------	---

---

### Cianoacrilatos

Os adesivos com cianoacrilato apresentam-se sob a forma de monocomponente no estado líquido de baixa viscosidade (sem solventes). Permitem colagens muito rápidas, quase instantâneas, e comercialmente são conhecidos como colas instantâneas, supercolas ou ainda por cola tudo.

A rapidez do processo de cura é influenciada por um mecanismo aniónico que requer humidade no ar para iniciar a polimerização. Contudo, estes adesivos apresentam dificuldade de cura em substratos ácidos que inibem a polimerização e não permitem uma boa molhagem resultando na formação de cadeias de baixo peso molecular [3].



Figura 18 - Colagem com adesivo Cianoacrilato [32]

São utilizados para colar pequenas partes de plásticos e borracha. A Tabela 6 apresenta as principais características desta família de adesivos.

Tabela 6 - Principais características dos adesivos cianoacrilatos [7, 25]

---

Cianoacrilato	Excelente resistência à tração; Baixa resistência ao arrancamento; Apresentam alguma fragilidade; Apresentam custos elevados; Cura rápida; Baixa capacidade de preencher espaços.
---------------	--

---

### **Acrílicos modificados**

Estes adesivos também são conhecidos como acrílicos reativos, sendo normalmente usados em aplicações termoplásticas sensíveis à pressão. Estes adesivos sofreram alterações na sua composição química pela introdução de polimetilmetacrilato e borracha de nitrilo. Apesar da adição de modificadores elastoméricos, apresentam alguma rigidez e uma baixa rigidez ao arrancamento e mau comportamento a baixas temperaturas. Na indústria estes adesivos são utilizados em operações altamente automatizadas devido à sua rápida cura e boa resistência (20-35 MPa).

Tabela 7 - Principais características dos adesivos acrílicos modificados [7, 25]

Acrílicos modificados	<p>Elevada resistência à humidade;</p> <p>Habilidade em ligar superfícies mal preparadas;</p> <p>Boa resistência ao arrancamento;</p> <p>Boa resistência ao impacto;</p> <p>Baixa resistência mecânica a altas temperaturas;</p> <p>Elevada flamabilidade;</p> <p>A resistência e o módulo são mais baixos do que para os epóxidos.</p>
--------------------------	---

### Adesivos Poliuretano

O principal uso dos poliuretanos é a colagem polímeros que são difíceis de colar, geralmente, a um material dissimilar ou a metais. Apresentam-se como 100% sólidos ou dissolvidos num solvente de uma ou duas partes.

O tipo de solvente de uma parte é usado para a ligação de contato de aderentes pegajosos após a liberação do solvente ou a reativação do solvente. Os produtos termoendurecíveis de duas partes são misturados e são completamente curados a 20°C em 6 dias, no entanto podem também ser curados a alta temperatura em 3 horas a 90°C ou em 1 hora a 180°C. As pressões de ligação de contato rondam por volta dos 0,35 MPa e a distância entre as superfícies a colar pode ir até aos 25 mm [15].

Tabela 8- Principais características dos adesivos de poliuretano [15, 25]

Poliuretano	<p>Resistência a temperaturas criogénicas (baixas temperaturas);</p> <p>Flexibilidade combinada com boa adesão;</p> <p>Boa resistência ao arrancamento;</p> <p>Boa resistência à abrasão, choques e vibrações;</p> <p>Formam ligações com elevada tenacidade;</p> <p>Resistência de rotura ao corte da ordem dos 20 MPa;</p> <p>Cura lenta à temperatura ambiente;</p> <p>Baixa resistência à alta temperatura;</p> <p>Curam com humidade, no entanto apresentam baixa resistência à humidade.</p>
-------------	--

## Adesivos de Poliimida

Foram desenvolvidos especificamente para aplicações aeroespaciais de alta temperatura (superiores a 200°C) com retenção de resistência a longo prazo. São os que apresentam as melhores características e melhor comportamento a elevadas temperaturas [33]. Estão disponíveis sob a forma de líquidos e filmes, no entanto são relativamente caros e difíceis de manusear durante o fabrico das juntas porque requerem longos tempos de cura com ciclos de pressão e temperatura elevadas. Existem dois tipos de poliimidias utilizadas:

- **as que curam por reação de condensação**, produzem humidade como subproduto o que resulta em formação de vazios. Necessitam de solventes para facilitar o escoamento. Para evitar a formação de vazios as juntas devido à humidade e aos solventes, as juntas são fabricadas em vácuo;
- **as que curem por reação de adição**, são de baixo peso molecular e curam por polimerização de adição a altas temperaturas e não libertam humidade na cura. No entanto, necessitam de solventes de alta temperatura para permitir o escoamento do adesivo. São mais fáceis de processar, contudo a sua estabilidade oxidativa não é tão boa como a dos poliimidias de condensação.

São utilizados em aplicações de baixo peso que possam estar sujeitas a temperaturas mais elevadas, como placas de chips, semicondutores, eletroímãs entre outros componentes eletrónicos. Possuem baixa resistência ao impacto e vibrações [3, 16, 25, 34].

### 2.1.2 Ligações soldadas

A soldadura não é propriamente um processo de trabalho dos materiais, mas uma operação auxiliar destes que consiste em ligar duas ou mais porções de material, de modo a constituírem um todo, resistindo como uma só peça e obtendo uma ligação permanente.

A soldadura pode realizar-se, fundamentalmente, por dois processos:

- por interposição, entre porções a ligar, de um material diferente, sendo uma soldadura ordinária ou heterogénea;
- por ligação sem interposição de um material estranho, sendo uma soldadura autogénea.

A primeira, a soldadura ordinária, apresenta a vantagem de ser mais fácil de realizar, mas tem o inconveniente de ser pouco resistente. Realiza-se pela interposição entre as partes a ligar, de um metal ou liga adequada, a solda, no estado de fusão. A solda, solidificando entre as porções a ligar, faz a união formando assim uma só peça.

Na soldadura autogénea, pelo contrário, não se interpõe elemento de adição. A união consegue-se por aquecimento na zona das superfícies que entram em contacto e por compressão. Esta compressão provoca uma aproximação das moléculas dos elementos

a ligar ao ponto de se fazer sentir a coesão molecular entre eles, o que origina uma verdadeira ligação dos materiais. Este processo tem a vantagem de a ligação poder ficar com uma resistência praticamente igual à do próprio material. A soldabilidade de qualquer metal depende de cinco fatores principais. Estes são o ponto de fusão, a condutividade térmica, a expansão térmica, a condição da superfície e a mudança na microestrutura.

Como existe uma grande variedade de processos de soldadura e diferentes tipos de classificações, é apresentada na Tabela 9 a classificação dos processos de soldadura segundo o critério de estado do material de base e material de adição durante a ligação.

Tabela 9 - Classificação dos processos de soldadura segundo o estado dos materiais de base e de adição [35]

Líquido/ Líquido		Sólido/ Líquido	Sólido / Sólido
Fusão	Brasagem/soldobrasagem	Pressão	
Eléctrodo revestido	Brasagem fraca	Explosão	
MIG ( <i>Metal Inert Gas</i> ) - MAG ( <i>Metal Active Gas</i> )	Brasagem forte	Difusão	
Fios Fluxados		Fricção	
TIG ( <i>Tungsten Inert Gas</i> )		Ultrassons	
Plasma		Pressão a frio	
Arco Submerso		Rolamento	
Resistência		Indentação	
Oxiacetilénica		Pressão com chama	
Eletroescória		Forjagem	
Eletrogás		estampagem	
Laser			
Feixe de Electrões			

A aplicabilidade de cada processo também tem as suas restrições, como por exemplo o tipo de matéria a soldar e a espessura do material base. Estas restrições têm como

principal problema a capacidade de cada processo em passar o calor para a junta e as propriedades físicas do material base (temperatura de fusão e condutividade térmica). De seguida são apresentadas as principais vantagens (Tabela 10) e desvantagens das ligações soldadas (Tabela 11).

Tabela 10 - Vantagens de ligações soldadas [36]

---

### Vantagens

---

- As estruturas são geralmente mais leves em relação às aparafusadas ou rebitadas pelo facto de não se usarem componentes de ligação como cobre-juntas ou *gussets*;
  - Grande resistência: usualmente a resistência da soldadura é igual ou superior à dos metais ligados;
  - Não há necessidade de furos na execução da ligação, o que evita a diminuição da resistência das peças;
  - Possibilidade de ligar juntas de geometria complexa;
  - Processo de ligação mais rápido que o aparafusamento ou rebitagem;
  - Podem ser feitas alterações e reparações com facilidade em estruturas existentes.
- 

Tabela 11 - Desvantagens das ligações soldadas [36]

---

### Desvantagens

---

- O ciclo térmico durante a sua fabricação pode criar tensões residuais e distorção na estrutura;
  - Requer em grande parte dos casos operadores altamente especializados e experientes;
  - Possibilidade de desenvolvimento de fissuras que diminuem a resistência à fadiga;
  - Equipamento por vezes de custo elevado;
  - Não permite a desmontagem da estrutura;
  - Dificuldade na inspeção da qualidade da junta.
- 

#### 2.1.2.1 Soldadura de Resistência por Pontos

Pelo caso de estudo da presente dissertação existe a necessidade de dar uma maior relevância ao processo de soldadura por pontos.

A soldadura de resistência por pontos normalmente aplica-se à ligação de chapas finas (<3,2 mm) sendo muito utilizada na indústria automóvel, mobiliário metálico e indústria de material ferroviário circulante (carruagens) [35].

O processo representado na Figura 19 envolve a aplicação de corrente elétrica e pressão mecânica (com amplitude) durante um determinado tempo, sendo que estes parâmetros devem estar perfeitamente definidos com as características do material a unir. A corrente passa dos eléttodos para as peças a unir por contacto, os eléttodos asseguram também a pressão e densidade da corrente necessária. Devido ao calor gerado nos eléttodos estes necessitam de ser arrefecidos através da circulação de água para minimizar o efeito de transferência de cobre dos eléttodos para as peças a unir.

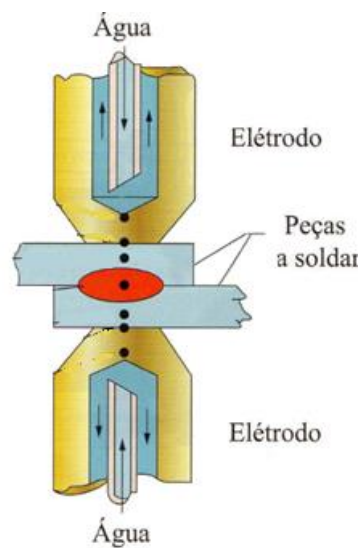


Figura 19 - Soldadura por resistência por pontos [35]

O processo é constituído por ciclo de 4 fases, como demonstrado na Figura 20 :

1. Tempo de compressão: consiste no posicionamento e início do contacto dos eléttodos com a peça e aplicação de pressão antes da passagem de corrente elétrica;
2. Tempo de soldadura: consiste no intervalo de tempo em que é aplicada corrente entre as peças a unir;
3. Período de manutenção: os eléttodos mantêm uma pressão sobre a peça após o impulso de corrente elétrica até que o núcleo solidifique;
4. Período de preparação: consiste no afastamento dos eléttodos e translação das peças para um novo ponto de soldadura.

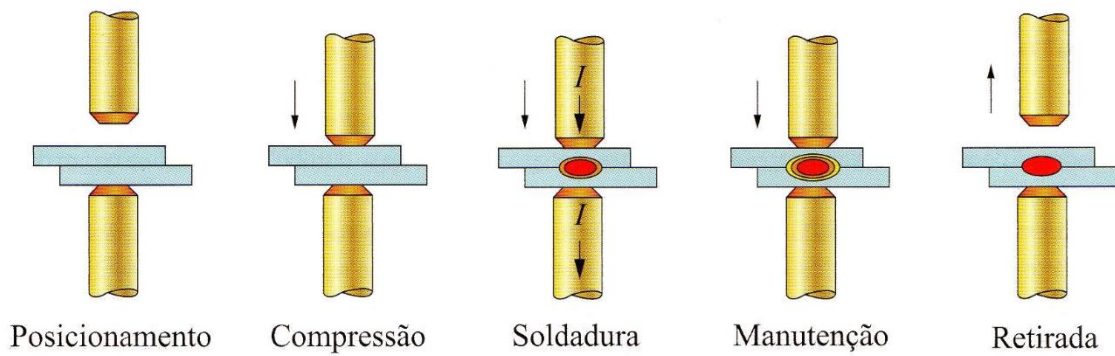


Figura 20 - Diferentes etapas de realização de uma soldadura por pontos [35]

A Tabela 12 apresenta as principais vantagens e desvantagens deste processo.

Tabela 12 - Vantagens e desvantagens do processo de soldadura por pontos [35]

Vantagens	Desvantagens
O seu baixo custo durante a produção;	Custo inicial dos equipamentos;
Inexistência de consumíveis;	Elevada especialização na manutenção;
Elevada fiabilidade;	Alguns metais precisam de preparação de superfície especial para tornar o RSW um sucesso;
Processo rápido;	Dificuldade em soldar materiais a partir de uma certa espessura.
Reprodutibilidade, processo pode ser aplicado de forma automática ou semi-automática.	

### 2.1.3 Ligações aparafusadas

A ligação aparafusada é um dos métodos de ligação mais utilizadas devido à sua versatilidade, porque permite rapidez de execução das ligações de campo, e a mão de obra utilizada para instalação e inspeção dos parafusos não necessita de ser especializada como por exemplo nas ligações soldadas. O equipamento de instalação é simples e sem muitos gastos de energia.

As ligações aparafusadas são consideradas ligações móveis e podem ser classificadas pela sollicitação que ocorre nos parafusos, como representado na Figura 21.

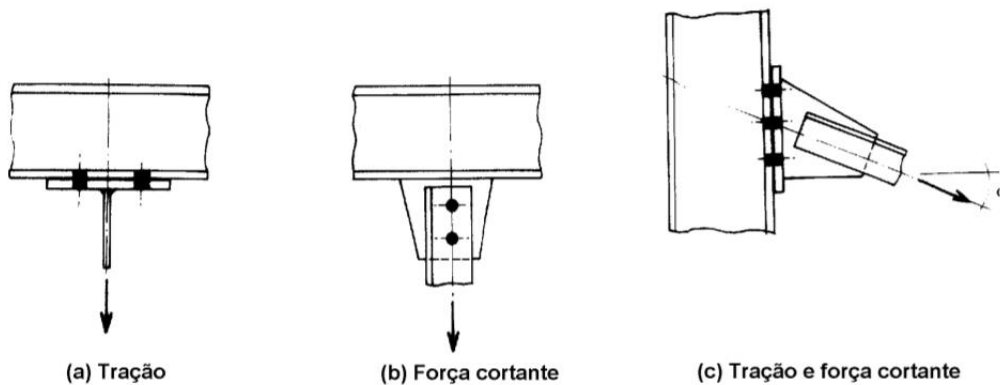


Figura 21 - (a) Parafusos submetidos à tração; (b) parafusos submetidos ao corte; (c) parafusos submetidos à tração e corte [37]

As ligações aparafusadas devem ser dimensionadas considerando os esforços atuantes. As ligações aparafusadas geralmente provocam uma diminuição da resistência das secções porque, para a instalação de parafusos, é necessário que se façam perfurações nos elementos a serem unidos, provocando assim uma diminuição da seção transversal resistente. Quando mal projetadas, estas juntas podem levar ao colapso da estrutura [38]. A existência destas perfurações poderá provocar diferentes modos de rutura quando a peça unida é solicitada a esforços. A Figura 22 apresenta os principais modos de rutura.

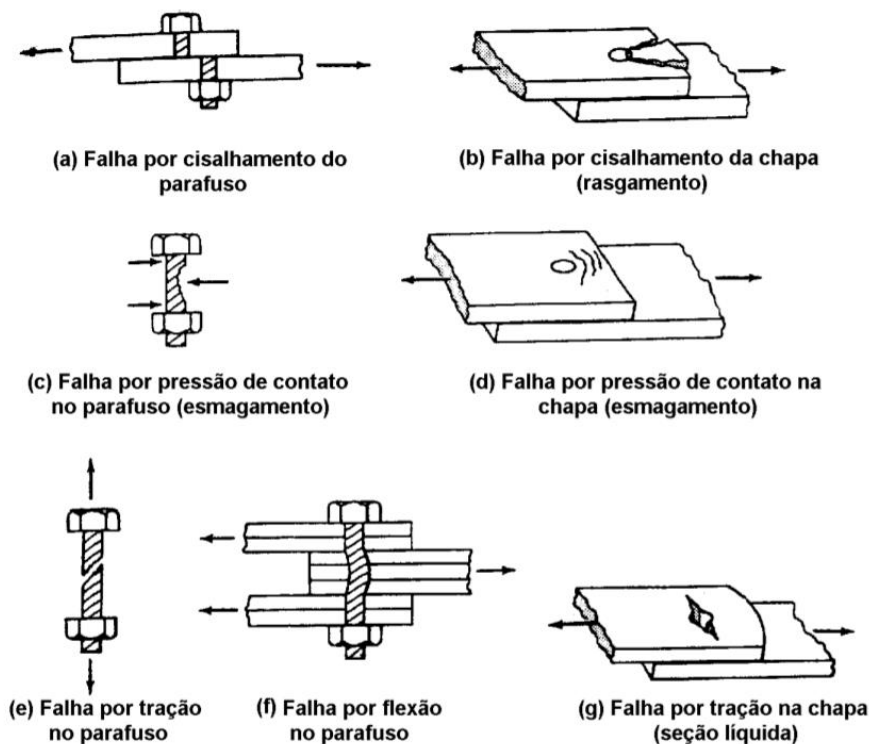


Figura 22 - Possíveis modos de falha em conexões aparafusadas [37]

De forma a reduzir ao mínimo os modos de falha ao unir as peças com os parafusos é importante ter em consideração os seguintes fatores:

- Profundidade do furo;
- Profundidade do furo roscado;
- Comprimento útil de penetração do parafuso;
- Diâmetro do furo passante;
- Tipo de cabeça e rosca;
- Dimensões e especificações do parafuso;
- Material do parafuso e da peça.

Tendo em consideração os fatores para o dimensionamento para as ligações aparafusadas, anteriormente mencionados, de seguida são apresentadas as vantagens e desvantagens deste método (Tabela 12).

Tabela 13 - Vantagens e desvantagens de ligações aparafusadas [2, 39]

Vantagens	Desvantagens
Unir diferentes materiais sem inconveniente;	Distribuição de tensões não uniforme nas peças ligadas;
Os parafusos podem ser removidos e reintroduzidos sem perder a sua eficácia;	Estruturas mais pesadas;
Facilidade de montagem;	Possibilidade de ocorrer desaperto;
Permitem montagens rápidas e inspeções rápidas;	Não uniformidade de aperto em uniões com vários parafusos;
Baixo custo.	Influência de condições climatéricas.

## 2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

No decorrer dos anos foram desenvolvidas diversas metodologias de previsão de resistência de juntas adesivas. Inicialmente surgiram os métodos analíticos e mais tarde os numéricos baseados em análises de Método de Elementos Finitos.

### 2.2.1 Métodos analíticos

Os métodos de previsão analíticos, também conhecidos por “*closed-form stress analysis*”, como o próprio nome indica, são técnicas analíticas que, através de um conjunto de equações diferenciais, descrevem o estado de tensão e deformação de uma junta. Estes métodos são sobretudo indicados para juntas de sobreposição simples e

tornam-se de difícil uso quando surgem não linearidades geométricas provocadas pela rotação das juntas sob carregamento e plasticidade do material.

Em seguida são apresentados alguns modelos analíticos indicando as suas limitações:

### **Análise de Volkersen**

Volkersen [3] foi pioneiro nos métodos analíticos de análise de juntas adesivas. É uma análise simples e limitada para a obtenção das tensões numa junta de sobreposição simples. O modelo considera que os substratos se deformam apenas em tração e o adesivo se deforma apenas em corte.

A Figura 23 representa esquematicamente o modelo analítico de Volkersen de uma junta de sobreposição simples quando sujeita a uma carga de tração, onde a tensão de corte no adesivo é máxima nas extremidades da junta e mínima no meio [3].

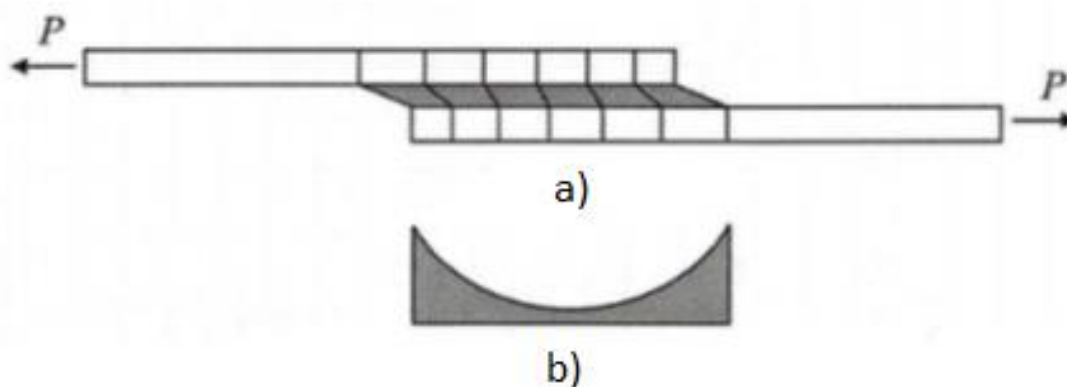


Figura 23 - Análise de Volkersen, a) junta carregada; b) tensão de corte no adesivo [3]

Como desvantagem, refere-se que neste modelo não foi equacionada a excentricidade do carregamento que é provocado pela geometria não simétrica da junta colada, e que por sua vez provoca momentos fletores nos substratos, provocando o aparecimento de deformações de flexão nos substratos, como representado na Figura 24 e Figura 25.

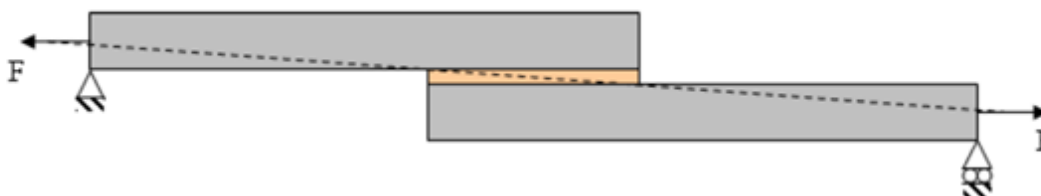


Figura 24 - Excentricidade do carregamento numa junta sobreposta simples [13]



Figura 25 – Deformação da junta devido à excentricidade do carregamento numa junta de sobreposição simples [13]

Verifica-se que o modelo de Volkersen é mais indicado para ser aplicado em juntas de sobreposição dupla uma vez que nas juntas de sobreposição simples existe o efeito de excentricidade do carregamento e um maior efeito de flexão não considerado neste modelo [3, 13].

### Análise de Goland e Reissner

A análise de Goland e Reissner [40] é considerada uma melhoria ao modelo de Volkersen no qual foi adicionado o efeito de rotação da junta.

As forças de tração aplicadas na JSS não são colineares, o que provoca um momento fletor na junta. Devido à cedência dos substratos a direção da linha de carregamento altera-se devido à rotação da junta. Esta situação provoca deslocamentos não proporcionais à força aplicada, o que provoca uma não linearidade geométrica.

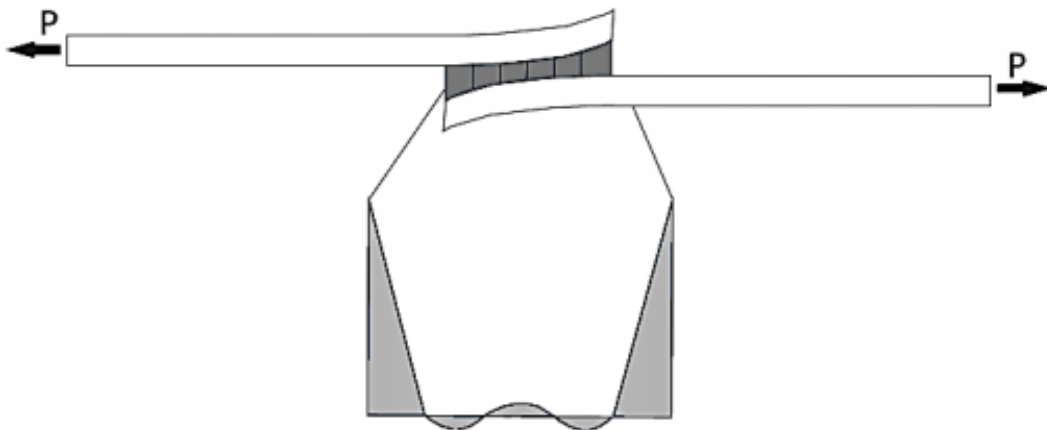


Figura 26- Tensões de arrancamento numa junta de sobreposição simples [3]

A seguinte equação, introduzida por Goland e Reissner [40], relaciona o momento fletor do aderente no final da zona de sobreposição com o plano de carga. O fator  $k$  é um fator de momento fletor que relaciona o momento do substrato no fim da sobreposição,  $M$ , com a força aplicada,  $t$  representa a espessura do substrato e  $\bar{P}$  é a força aplicada por unidade de largura.

$$M = k\bar{P}\frac{t}{2}$$

Esta análise permite também obter as tensões transversais de arrancamento no adesivo, como representado na Figura 26. Contudo, esta análise também não teve em consideração as variações das tensões do adesivo ao longo da espessura sobretudo na interface aderente/adesivo. Estas variações são relevantes quando ocorre a falha perto destas interfaces [3, 13].

## Análise de Hart-Smith

Hart-Smith [41] melhorou as teorias clássicas de Volkersen [42] e Goland e Reissner [40] para juntas de sobreposição simples e juntas de sobreposição dupla pois, como referido anteriormente, elas apenas consideram o comportamento elástico da junta. No entanto, os adesivos e os substratos podem-se deformar plasticamente (Figura 27).

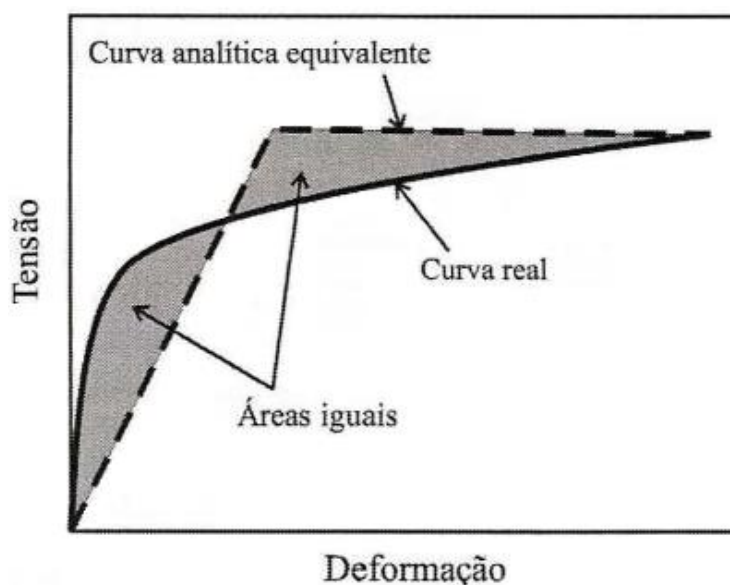


Figura 27- Representação elasto-plástica do adesivo [3]

Esta evolução permite uma melhor previsão da resistência da junta, sobretudo para os adesivos mais dúcteis que têm uma boa resistência plástica, porque a plasticidade do adesivo aumenta a resistência de uma junta.

Para melhor prever o comportamento do adesivo, o modelo elastoplástico desenvolvido por Hart-Smith assume que a tensão e deformação de rotura ao corte no modelo são iguais aos valores de tensão e deformação de rotura ao corte da curva de tensão-deformação real do adesivo, sendo que as duas curvas mantêm a mesma energia de deformação presente na área por baixo das mesmas [30].

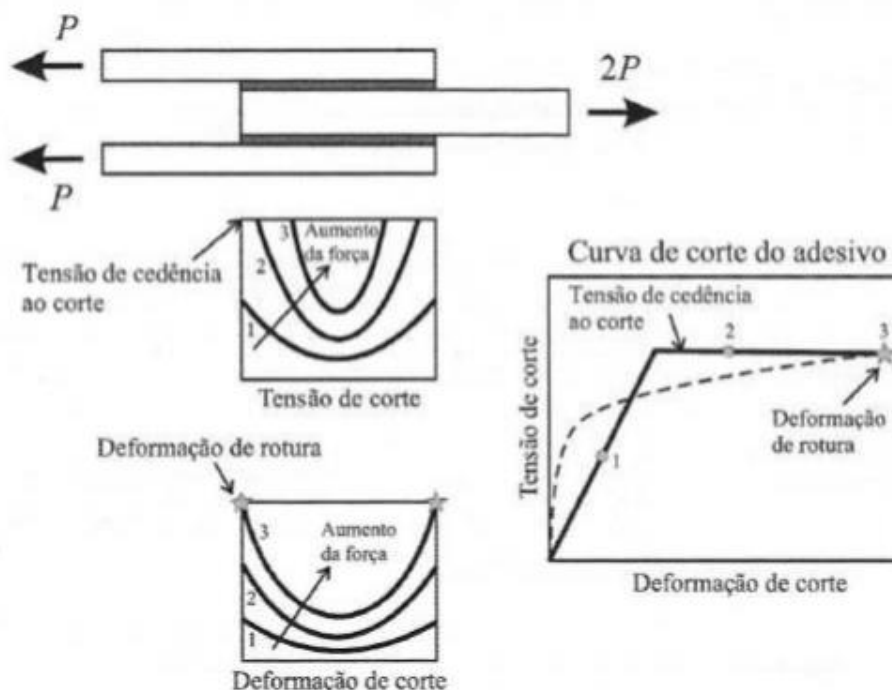


Figura 28- Explicação esquemática do corte plástico no adesivo [3]

Hart-Smith [43] também demonstrou que a intensidade de carga não é transferida ao longo da totalidade do adesivo, sendo que a maioria da carga é transmitida nas extremidades da ligação. Na zona intermédia os esforços transferidos são significativamente mais baixos (Figura 28) [3, 43].

### 2.2.1.1 Critérios de rotura

A análise de resistência das juntas adesivas pressupõe a utilização de critérios de rotura tendo como base a combinação com métodos analíticos ou métodos numéricos de estimativa das distribuições de tensões. Nos dias de hoje, à medida que o grau de complexidade e o número de componentes de tensão no adesivo e no aderente aumenta, dificulta a obtenção da solução analítica, sendo então necessário optar por uma solução numérica, como por exemplo Método de Elementos finitos [44].

Von Mises apresentou um critério de rotura em que um material cede sob tensões multi-axiais quando a sua energia de distorção atinge um valor crítico:

$$\sigma_{VM}^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = \text{constante},$$

onde  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  são as tensões principais. Ikegami et al. [45] utilizou o critério de rotura de Von Mises para estudar a resistência de juntas em chanfro com compósitos de fibra de vidro e metais.

A Tabela 14 expõe os diferentes critérios de rotura associado ao respetivo modelo analítico. Estes critérios apresentados foram testados em juntas de sobreposição simples por da Silva et al. (2009). Estes critérios não levam em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, assim como a presença de defeitos no adesivo.

Tabela 14 – Critérios de rotura testados por da Silva et al. (2009b) em vários modelos analíticos  $\tau$ - tensão de corte,  $\tau_r$  tensão de rotura,  $\gamma$ - deformação ao corte tensão de rotura,  $\gamma_p$ -deformação plástica ao corte,  $\epsilon_e$ -deformação de von Misses equivalente  $\epsilon_r$ -deformação de rotura à tração , , GY (global yielding ou cedência global no adesivo) [46]

Modelos	Critério de rotura
Volkersen (1938) (análise elástica)	$\tau > \tau_r$
Goland e Reissner (1944) (análise elástica)	$\tau > \tau_r$ ou $\sigma > \sigma_r$
Hart-Smith (1973a)	
Análise linear	$\tau > \tau_r$ ou $\sigma > \sigma_r$
Análise não linear	$\gamma > \gamma_p$ ou GY
Bigwood e Crocombe (1989) (análise linear)	$\tau > \tau_r$ ou $\sigma > \sigma_r$
Frostig et al. (1999)	$\tau > \tau_r$ ou $\sigma > \sigma_r$
Bigwood e Crocombe (1989)	$\epsilon_e > \epsilon_r$ ou GY
Wang et al. (2003) (análise não linear total)	$\epsilon_e > \epsilon_r$ ou GY
Adams e Mallick (1992)	
Análise linear	$\tau > \tau_r$ ou $\sigma > \sigma_r$
Análise não linear	$\epsilon_e > \epsilon_r$ ou GY
'Módulo efetivo'	$\epsilon_e > \epsilon_r$
Rotura transversal do compósito	$\sigma_{comp} > \sigma_{r\ comp}$
Adams et al. (1997)	
Aderente elástico e adesivo dúctil	GY
Aderente elasto-plástico	Cedência do aderente

No estudo de Silva et al. (2009) concluiu-se que as análises não lineares não têm solução através dos modelos analíticos, e verificou-se que o tempo de implementação e resolução não apresenta vantagem relevante sobre os modelos numéricos [46].

### 2.2.2 Métodos numéricos

Os métodos numéricos são tipicamente baseados em análises de Método de Elementos Finitos para a previsão de resistência de juntas adesivas, sendo esta metodologia capaz de prever a resistência com melhor precisão considerando diferentes condições materiais e geométricas. Por sua vez, isto leva a uma otimização de recursos e facilita na seleção do adesivo para uma dada aplicação.

O Método de Elementos Finitos, na sua forma mais comum, corresponde ao método dos deslocamentos, no qual as incógnitas são os deslocamentos (análise estrutural) e as solicitações são conhecidas. Contudo, noutros tipos de análises as variáveis de campo podem ser temperaturas, velocidades de fluido, entre outras [47].

Este método permite transformar uma distribuição contínua em unidades individuais de um domínio nos chamados Elementos Finitos (EF), ligados pelos seus nós, e cuja simplificação resulta na criação de um sistema de equações algébricas como alternativa às equações constitutivas integrais ou diferenciais que estão na base do método [48]. A previsão da resistência das juntas segundo métodos numéricos pode ser feita com recurso às seguintes técnicas:

- Mecânica dos meios contínuos;
- Mecânica da fratura;
- Modelos de dano coesivo;
- Mecânica do dano;
- Método de Elementos Finitos Estendido,

que serão descritos nos próximos subcapítulos para uma compreensão mais aprofundada.

#### 2.2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos consiste na utilização de métodos analíticos ou numéricos em que os valores máximos de tensão (por exemplo, critério de tensão normal máxima ou critério de tensão de corte máxima), deformação ou energia de deformação são usados em critérios de rotura para estimar a resistência da junta. A partir desta informação é possível prever a sua resistência pela comparação entre os valores máximos do parâmetro em causa e o valor limite respetivo do material [48, 49].

Um aspeto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidades de tensões nas extremidades do comprimento de sobreposição. Esta inferência foi feita por Adams [22], que utilizou o critério da tensão principal máxima em conjunto com o MEF para prever a resistência de juntas adesivas.

Um método eficaz de reduzir os efeitos da malha pela eliminação da singularidade traduz-se na utilização de geometrias com extremidades arredondadas como

representado na Figura 29. Esta alteração origina uma variação na distribuição de tensões na zona modificada geometricamente [22, 50].

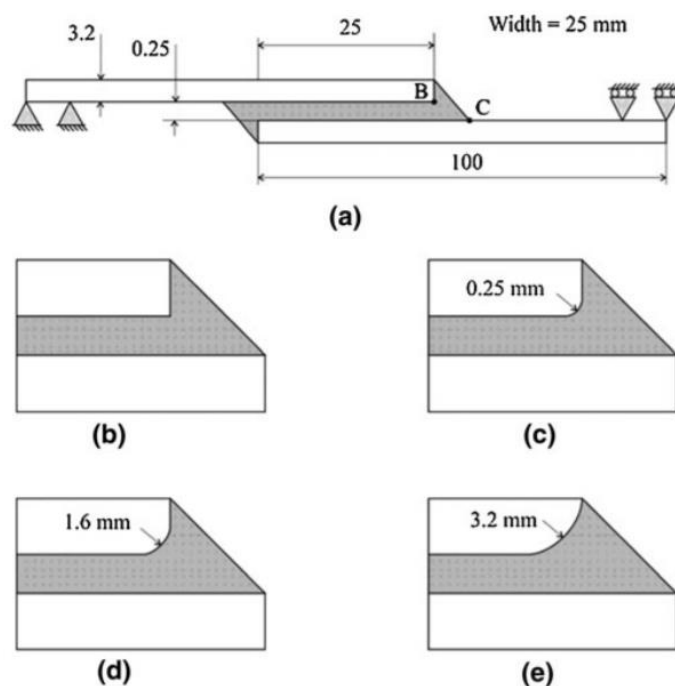


Figura 29- Juntas com ângulos de arredondamento diferentes [46]

Este método não é tão confiável para adesivos dúcteis porque os critérios existentes baseados em tensões não são adequados, uma vez que após o adesivo ceder ainda suporta deformações plásticas antes da rotura [49].

### 2.2.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica da fratura surgiu com o objetivo de compensar a inabilidade da mecânica dos meios contínuos em resolver problemas relacionados com a descontinuidade de tensões resultante da existência de fendas e entalhes nos materiais. Assim, a mecânica da fratura visa determinar se um defeito na estrutura irá ou não levar à rotura, sendo que essa causa pode ser induzida de diferentes maneiras, por fadiga, aplicação de cargas lentas ou por deformações. Deste modo, pode-se afirmar que os critérios baseados na mecânica da fratura estão fundamentalmente direcionados para a propagação de fendas em vez da sua iniciação.

Esta abordagem apresenta algumas dificuldades associadas, como o tamanho da fenda inicial a considerar e a sua localização [3].

Relativamente à aplicação em juntas adesivas existem vantagens na utilização do uso de taxas de libertação de energia comparativamente aos fatores de intensidade de tensão.

A não uniformidade das ligações adesivas, utilizou-se o uso das taxas de libertação de energia ( $G$ ), e a resistência à fratura,  $G_c$  [51] para descrever a fratura de juntas adesivas.

Contudo, a aplicação de taxas de libertação de energia apresenta dificuldades de propagação de fendas em modo misto (Figura 30) e dependência das taxas críticas de libertação de energia com a espessura da camada do adesivo.

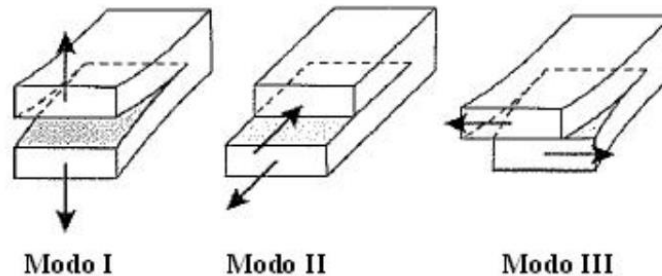


Figura 30- Modos de rotura [3]

Para lidar com este tipo de carregamento, existem critérios de fratura em modo misto, semelhantes aos critérios de rotura clássicos [18].

### 2.2.2.3 Modelos de dano coesivo

Os modelos de dano coesivo permitem modelar a iniciação do dano, sendo muito utilizados em programas que têm como base o MEF de forma a validar o comportamento dos materiais a ensaiar sujeitos a fratura [52].

Barenblatt [53] e Dugdale [54] foram os pioneiros no estudo destes modelos com o conceito da zona coesiva para caracterizar o dano sob cargas estáticas na zona de processo de fratura.

O método consiste no estabelecimento de leis de tração-separação (também denominadas leis coesivas) para modelar interfaces, sendo estas aplicadas entre os nós dos elementos coesivos. Podem-se ligar nós sobrepostos que representam diferentes materiais, diferentes camadas quando se trata de materiais compósitos ou então dois materiais sem contacto para simular uma camada fina (exemplo, ligação adesiva).

Segundo da Silva e Campilho [18], o princípio base dos MDC é que uma ou mais regiões de rotura podem ser introduzidas artificialmente em estruturas, em que se possibilita o crescimento do dano. As leis de tração-separação são tipicamente construídas por relações lineares. A Figura 31 apresenta 3 tipos de leis que podem ser utilizadas nos elementos coesivos: triangular, trapezoidal e linear-exponencial. As leis coesivas mais comumente utilizadas no âmbito das ligações adesivas são as leis triangular e trapezoidal [1].

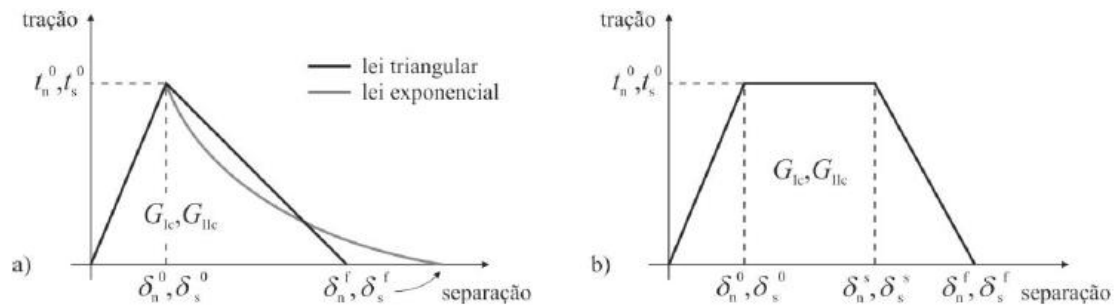


Figura 31-Leis coesivas (a) triangular e exponencial e (b) trapezoidal [1]

Em suma, os modelos de dano coesivo permitem simular a iniciação e a propagação do dano em juntas adesivas através da introdução de um modelo de dano apropriado. Para obtenção da iniciação do dano considera-se tipicamente um critério de tensões e para a sua propagação um critério energético. Um benefício da aplicação do método reside no facto de não ser necessária a existência de uma pré-fenda. A maior limitação dos modelos de dano coesivo encontra-se na necessidade de colocar os elementos coesivos nos caminhos de propagação de dano onde se pretende que este ocorra. Contudo, em juntas adesivas isto não é um problema, dado que a propagação do dano está limitada a planos conhecidos (camada de adesivo).

#### 2.2.2.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano representa uma alternativa aos modelos de dano coesivo que permite simular o dano e fratura de uma peça com uma fenda pré-definida ou dentro de uma região finita até à rotura da estrutura. Neste método, estabelece-se um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais através de uma redução de rigidez ou resistência.

As técnicas de modelação do dano podem ser locais ou contínuas. Na modelação de dano local, o dano ocorre numa linha (análise a duas dimensões (2D)) ou superfície (análise a três dimensões (3D)) que simula uma rotura interfacial entre materiais (exemplo, ligação entre adesivo e substrato). Na modelação contínua, o dano propaga-se por uma área (análise 2D) ou volume finitos (análise 3D) com o intuito de simular uma rotura ou modelar uma fratura coesiva do adesivo. O método mais utilizado em aplicações de juntas adesivas na previsão de dano da Mecânica do Dano são os modelos de dano coesivos [18].

Hua et al. [55] propuseram um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão da resistência de juntas adesivas sujeitas a diferentes condições ambientais, no qual foram consideradas juntas adesivas com um adesivo dúctil. A modelação numérica foi efetuada através da introdução de um parâmetro de dano com base em deslocamentos dos materiais que era dependente do

grau de humidade. Este critério foi aferido utilizando o teste *Mixed-Mode Flexure* (MMF) por amostras envelhecias artificialmente.

O parâmetro de dano permitiu obter uma função linear da resposta do material. Por outro lado, a implementação deste conceito permitiu a definição de um comprimento equivalente. O deslocamento plástico equivalente foi calculado a partir da energia de rotura.

Chen et al. [56] utilizaram o critério da energia de deformação plástica média através da mecânica do dano, previram o início da rotura e a propagação desta em JSS (Figura 32) bem como a carga de rotura. Através de uma análise por EF, foi possível obter uma simulação do processo de rotura.

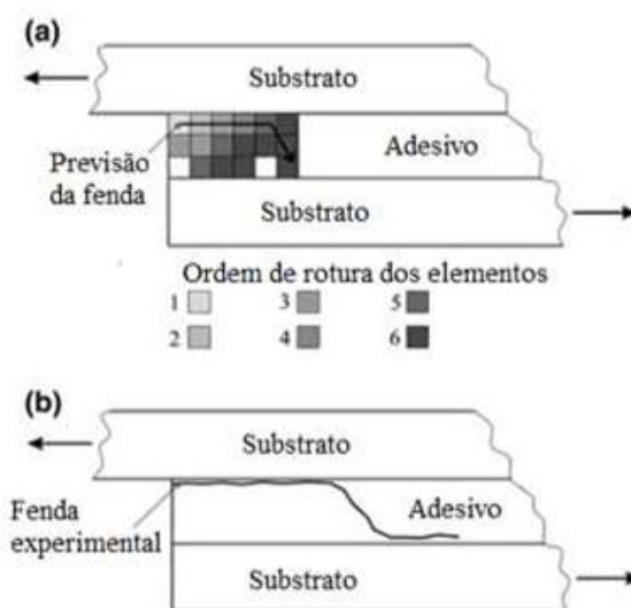


Figura 32- Processo de rotura da JSS [56]

Na obtenção dos resultados por EF, em comparação com os experimentais, verificou-se que o critério da energia de deformação plástica média foi bem-sucedido, apresentando uma boa aproximação relativamente aos ensaios experimentais.

Os Modelos de Mecânica do Dano apresentam uma vantagem em relação ao Modelo de Dano Coesivo pois permitem que o caminho de propagação da fenda não seja conhecido. Por outro lado, nos modelos de Dano Coesivo, a propagação da fenda é limitada a trajetos pré definidos[57].

#### 2.2.2.5 Método de Elementos Finitos Extendido

O Método de Elementos Finitos Extendido ou MEFE é uma técnica bastante recente para a modelação do dano em estruturas. É uma melhoria do Método de Elementos Finitos (MEF), e utiliza leis de dano para prever a fratura, que se fundamentam na resistência

dos materiais para iniciação do dano e deformação para a avaliação da rotura (definido por  $G_n^c$ ), em vez dos valores de  $t_n^0/t_s^0$  ou  $\delta_n^0/\delta_s^0$  utilizados pelo MDC. Uma vantagem dos MEFX é a não necessidade de a fenda seguir um caminho pré-definido. O MEFX possibilita o crescimento livre das fendas no interior de uma região sem o requisito da geometria das descontinuidades coincidir com a malha e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda.

Esta formulação tira a necessidade de definir uma nova configuração de malha para a simulação de propagação de fendas, por oposição ao clássico MEF. O método baseia-se na introdução de graus adicionais de liberdade, que são estabelecidos nos nós dos elementos que são intercetados pela geometria da fenda, como se representa na Figura 33.

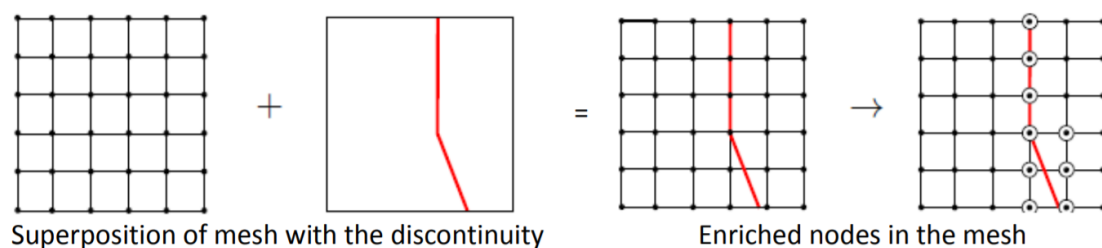


Figura 33- Definição de nós de enriquecimento numa malha de Elementos Finitos [58]

Durante o crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, e em simultâneo são criadas as funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos EF à volta do percurso/extremidade da fenda.

Campilho et al. [59] utilizaram este método e efetuaram uma comparação dos métodos MDC e MEF para a simulação de juntas de sobreposição simples e dupla entre aderentes de alumínio, coladas com um adesivo frágil. Através dos resultados obtidos concluiu-se que a utilização do MEF para propagação do dano não é a mais adequada porque se obtiveram melhores previsões por MDC. Contudo, obteve-se uma precisão razoável da previsão da resistência das juntas ao considerar que a rotura ocorria na altura da iniciação da fenda.

### 2.3 Juntas híbridas

A união de estruturas com adesivos é cada vez mais utilizada devido às suas vantagens, porque oferece uma distribuição mais uniforme das tensões e distribui a carga por maior área do que as juntas mecânicas, permitindo um aumento da vida útil e dimensão de peso na estrutura e evita corrosão entre materiais diferentes.

Contudo, os esforços de pico tendem a desenvolver-se próximo das extremidades da sobreposição devido ao esforço diferencial entre aderentes na sobreposição e

assimetria de carga, podendo provocar falhas prematuras. As juntas adesivas também são sensíveis ao tratamento de superfície e a fatores ambientais [60].

As juntas híbridas permitem explorar ambas as vantagens das ligações adesivas e outro método de ligação, como por exemplo ligações mecânicas (caracterizam-se por permitir a fácil e rápida desmontagem sem dano [61]) para melhorar a tolerância ao dano (estática ou fadiga) ou reparação de estruturas, combinado com facilidade de fabricação [62].

Na ligação híbrida, duas ou mais operações de união são realizadas simultaneamente ou sequencialmente, levando a propriedades superiores da junta devido às vantagens de ambos os métodos de união.

As principais vantagens das juntas híbridas adesivas-soldadas são:

- Produção de juntas contínuas e estanques;
- Redução de concentração de tensões;
- Em geral melhora a resistência (estática e dinâmica);
- Aumento da rigidez das juntas;
- Melhoria da resistência ao arrancamento e ao impacto (as uniões pontuais detêm o crescimento de fenda da ligação adesiva);
- Menores vibrações.

Uma vantagem importante é também que a união localizada imediatamente fixa a posição dos componentes até que ocorra a cura por adesivo, isto é, o processo de montagem é significativamente encurtado e facilitado.

Os métodos de junção de juntas híbridas mais utilizados são:

- Juntas Adesivo-soldadas;
- Juntas Adesivo-aparafusadas;
- Juntas Adesivo-rebitadas.

Hart-Smith [63, 64] demonstrou nos primeiros estudos de juntas híbridas em aviões que, embora não se tenha observado um aumento significativo na resistência em relação às juntas adesivas, a adição de um parafuso exibia vários benefícios.

### 2.3.1 Juntas adesivas-soldadas

As juntas híbridas adesivo-soldadas combinam o processo de ligação adesiva com ligação soldada. Esta combinação permite eliminar algumas desvantagens individuais. Este método de união de juntas proporciona vantagens para as ligações adesivas tradicionais [28, 62, 65] como aumento de força e rigidez, maior resistência ao arrancamento, clivagem e fabricação mais fácil, já que não são necessárias fixações durante a cura do adesivo [66]. Para as juntas soldadas este método possibilita uma melhor distribuição de tensões e melhor resistência ao corte e arrancamento.

Apenas alguns materiais possibilitam a união híbrida, que combina a ligação adesiva com a ligação soldada. Por norma existem as seguintes possibilidades que permitem unir juntas adesivas com um processo de soldadura, como representado na Figura 34:

- a) Um ponto de soldadura pode ser colocado entre os 2 substratos a unir (soldadura por pontos);
- b) Um cordão de soldadura permite união dos 2 substratos (por exemplo, soldadura por plasma).

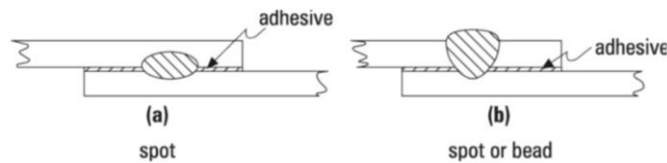


Figura 34- Diferentes métodos de ligação soldada a) soldadura por pontos b) soldadura por cordão [67]

Um aspecto importante a controlar no processo de soldadura a utilizar é o calor introduzido durante a operação, já que demasiada temperatura no substrato irá levar à redução de eficiência do adesivo devido em causa a ligação da estrutura. Por consequência uma das técnicas mais utilizadas de soldadura neste tipo de uniões híbridas é a soldadura por pontos [68, 69].

Este processo foi aperfeiçoado para o método *weld-through*, ou seja, soldadura após realização da junta adesiva, seguido de preenchimento da ligação com adesivo [36, 70], como representado na Figura 35. Contudo, para existir uma boa ligação deve-se efetuar os procedimentos normais de colagem de uma junta já mencionados nesta dissertação.

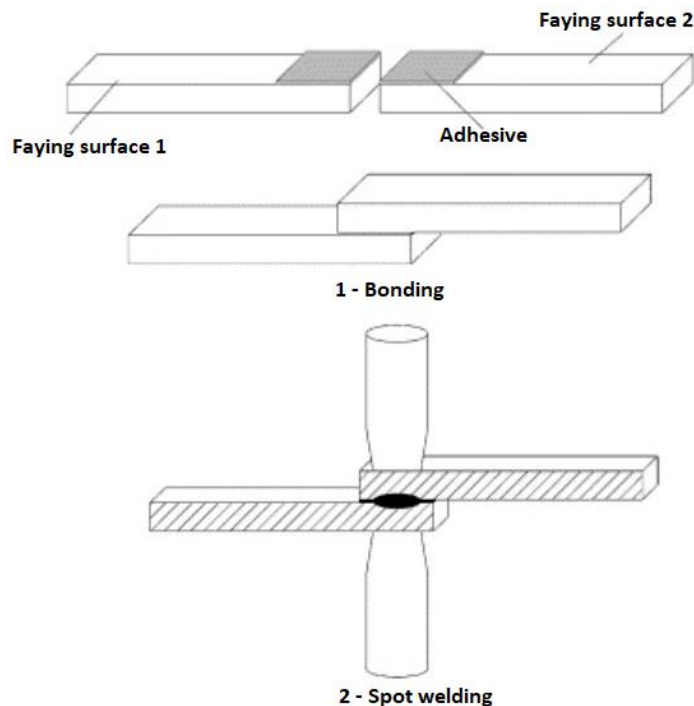


Figura 35-Processo ligação de juntas adesivas-soldadas através da técnica “weld-through” [69]

As juntas adesivas-soldadas têm vindo a aumentar com o aumento do conhecimento do seu processo de fabrico e as suas características mecânicas obtidas [66]. A indústria automóvel é uma grande impulsionadora neste processo porque vantagem existe possibilidade de automação do processo e pelas vantagens acima mencionadas [66, 71, 72]. Como desvantagens nas juntas adesivas-soldadas, além do controlo dos dois processos envolventes, destaca-se o dilema da utilização desta tecnologia em componentes estruturais primários e a dificuldade análise de tensões-deformações neste tipo de juntas devido à sua complexidade [65, 73].

### 2.3.2 Juntas adesivas-aparafusadas

Como já referido, as ligações adesivas causam menos concentração de tensão e distribuições mais uniformes de tensão e de deformação. No entanto, sabe-se que as juntas adesivas têm menos resistência em comparação com as juntas aparafusadas.

As juntas aparafusadas distinguem-se pela sua força. No entanto, esses tipos de ligações tem uma desvantagem principal devido aos furos perfurados que causam a concentração do esforço e da tensão, e conseqüentemente resultam no início prematuro de fenda por fadiga e no seu crescimento.

A fim de empregar os benefícios das juntas aparafusadas, tal como a alta resistência e a vantagem da distribuição de tensões da ligação adesiva, uma combinação de ligação adesiva com junta aparafusada pode ser usada para alcançar a máxima eficiência e resistência à fadiga [74].

Para obtenção de uma ligação híbrida adesiva-aparafusada é necessário efetuar alterações geométricas nos substratos para permitir a montagem dos parafusos (furação dos substratos). A degradação das propriedades mecânicas na presença de ambientes agressivos, tais como temperaturas e agentes corrosivos, é também uma preocupação para garantir uma eficácia plena deste tipo de ligação [75]. A Figura 36 representa uma junta híbrida adesiva-aparafusada a qual é possível verificar todas as partes integrantes deste tipo de junta.

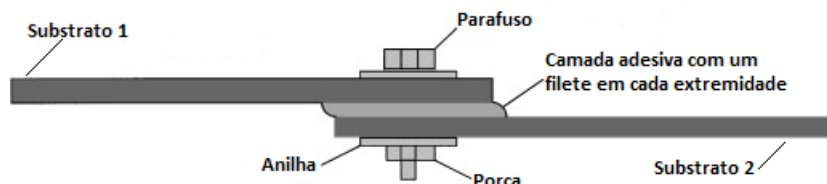


Figura 36 - Junta de sobreposição simples adesiva-aparafusada [76]

Existem alguns estudos referente ao comportamento deste tipo de juntas. De referenciar o estudo de Samaei et al. [74], em que se efetuaram ensaios experimentais e numéricos para estudo de fadiga e propagação de fenda numa junta de sobreposição simples de alumínio 2024-T3. Foram ensaiadas juntas aparafusadas e híbridas (adesiva-

aparafusada). Verificou-se nas juntas híbridas que a resistência à fadiga depende diretamente da força de aperto do parafuso, na medida em que o aumento desta força provocou uma maior longevidade da junta, ou seja, melhor resistência à fadiga.

### 2.3.3 Juntas adesivas-rebitadas

As juntas híbridas adesivas-rebitadas são utilizadas nos mais variados campos da indústria, mas este tipo de junta tem relevada importância na indústria aeroespacial e automóvel. Apresentam uma resistência entre 1,5 a 3 vezes superior às juntas adesivas e caracterizam-se pela alta fiabilidade a longo termo de utilização, melhor desempenho ao arrancamento (o rebite funciona como “*peel stop*”) permitindo melhor a vida útil à fadiga [67, 77].

A performance da junta híbrida depende da resistência do adesivo, e o rebite apenas se torna essencial quando a performance do adesivo diminuir devido por exemplo a condições atmosféricas (por exemplo elevada temperatura).

A adição de rebites nas juntas pode ou não ser necessário a existência de um furo pré-existente, tudo depende do método projetado para a união, como representado na Figura 37 e Figura 38.

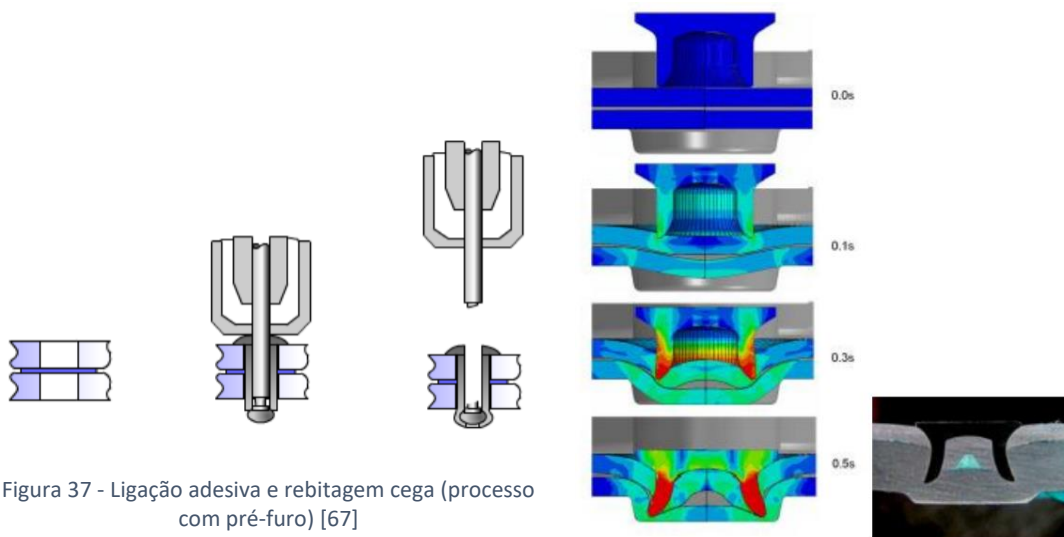


Figura 37 - Ligação adesiva e rebiteagem cega (processo com pré-furo) [67]

Figura 38 - Formação de um rebite auto-perfurante / união adesiva (processo sem pré-furo) [67]

No que diz respeito à produção de juntas híbridas rebiteadas podem ser utilizadas três técnicas de fabrico [78]:

**Flow-in:** o rebite é colocado, e só depois o adesivo é colocado e posteriormente curado. Neste caso, é necessário um adesivo de baixa viscosidade, e similarmente ao caso de soldagem é necessário tempo suficiente para permitir a infiltração do adesivo

entre as peças por capilaridade. Esta técnica de fabricação pode ser útil com o objetivo de aumentar a força de uma junta rebitada existente.

**Rivet-through uncured adhesive:** este procedimento idêntico ao método de união de juntas híbridas-soldadas. A principal diferença é que o ajuste do rebite não traz qualquer degradação adesiva pelo calor. Esta técnica é a mais utilizada porque permite obter boas propriedades mecânicas (fornecidas pelo adesivo) com uma fabricação fácil e rápida (fornecida pelo rebite) sem qualquer equipamento para segurar as peças durante a cura do adesivo.

**Rivet-through cured adhesive:** consiste na aplicação do rebite após a cura do adesivo. Este processo é o menos útil para a fabricação de juntas híbridas. De facto, observam-se todas as desvantagens recorrentes da cura do adesivo existentes nas juntas adesivas convencionais. O único propósito que torna útil este procedimento útil é para reparar ou aumentar a força de juntas pré-existentes.

Em suma, as juntas híbridas rebitadas apresentam características mais favoráveis no que diz respeito à rigidez, resistência à fadiga e resistência mecânica relativamente às juntas adesivas [79].

#### 2.3.4 Outros tipos de juntas híbridas

A escolha de um método de ligação específico é um aspeto importante na conceção e produção de um produto, pois deve ser tida em conta uma relação adequada entre resistência e custos de produção. Novos projetos de produtos impõem novos métodos de ligação. As juntas de cravamento (*clinch*) são uma tecnologia relativamente nova, na qual os substratos são deformados localmente, sem qualquer elemento adicional. A combinação destas com juntas coladas originou uma junta híbrida com possíveis aplicações na indústria. A Figura 39 apresenta uma junta de sobreposição simples já na sua fase final, ou seja, com o adesivo entre ambos os substratos.

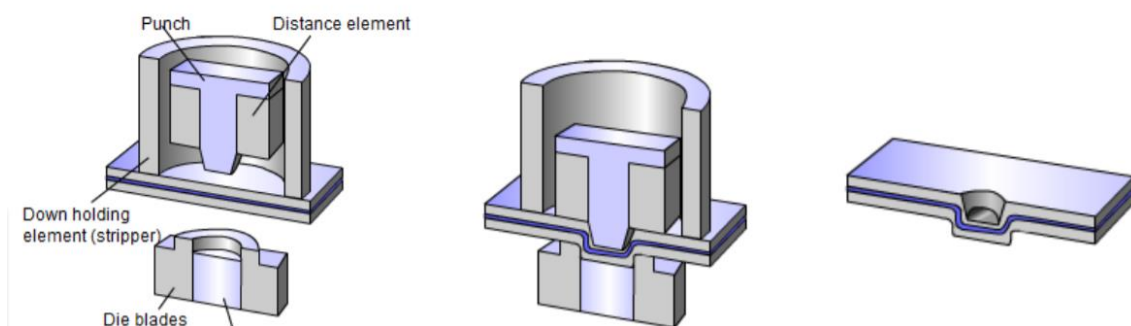


Figura 39- Processo de ligação por *clinch* [67]

Este método de ligação, ao contrário da ligação soldada, permite a união de diferentes tipos de materiais, como por exemplo aço, latão, cobre ou alumínio. Este processo de ligação necessita apenas de um punção e uma matriz, responsáveis por promover a

deformação plástica localizada das chapas. O adesivo é aplicado num dos substratos e, posteriormente, as duas partes são unidas, o que origina uma junta adesiva. De seguida, é efetuada a união por *clinch*, o que faz com que algum adesivo seja expelido da junta. Uma vez feito o *clinch*, a junta híbrida é deixada a curar [67, 80, 81].

É necessário efetuar o controlo da operação porque existe o risco de formação de vazios na camada adesiva. De facto, o adesivo ainda se encontra no estado líquido e, ao ser espremido para fora do ponto de cravação durante o processo de fabrico, provoca vazios próximo do *clinch* (Figura 40).

A adesão por *Clinch* tem a vantagem de ser um processo de união a frio. Contudo, as juntas por cravação não são tão resistentes em comparação com as juntas soldadas-rebitadas. Por conseguinte, a ligação por cravação é utilizada principalmente para aplicações menos exigentes na indústria automóvel, e para unir aço a alumínio em áreas onde as cargas estruturais são relativamente pequenas [67].

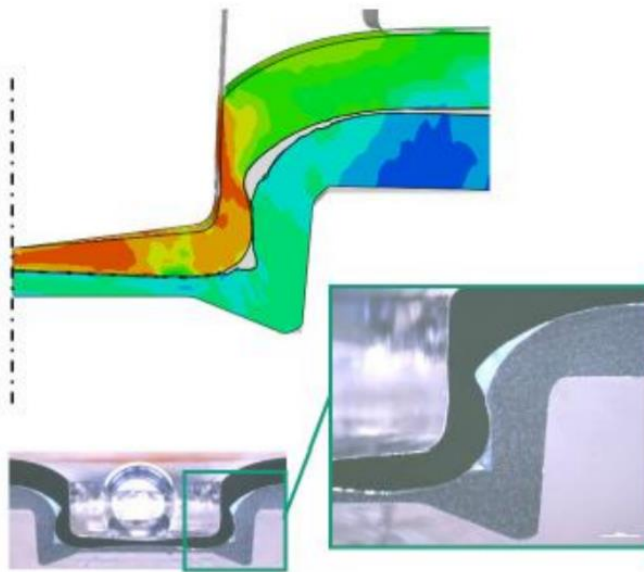


Figura 40- Formação de vazios na camada adesiva em juntas híbridas por *Clinch* [67]

# DESENVOLVIMENTO

## **3.1 Trabalho experimental**

- 3.1.1 Materiais utilizados
- 3.1.2 Geometria das juntas
- 3.1.3 Processo de fabrico
- 3.1.4 Ensaio das juntas
- 3.1.5 Resultados obtidos
- 3.1.6 Análise dos resultados obtidos- comparação dos valores de  $P_{max}$

## **3.2 Trabalho numérico**

- 3.2.1 Condições da análise numérica
- 3.2.2 Modelo de dano
- 3.2.3 Análise de tensões na junta
- 3.2.4 Previsão da resistência
- 3.2.5 Estudo da energia dissipada



## 3 DESENVOLVIMENTO

### 3.1 Trabalho experimental

Neste capítulo é feita uma descrição referente ao trabalho experimental realizado por Almeida [2] todo o processo de elaboração dos provetes e da obtenção dos resultados dos ensaios experimentais usados na presente dissertação.

Consiste na descrição dos materiais utilizados e suas características, preparação e elaboração das juntas e os respectivos ensaios de tração sendo também indicadas as condições para a realização dos ensaios, sendo finalmente apresentados os resultados obtidos experimentalmente e a respectiva análise.

#### 3.1.1 Materiais utilizados

Para o trabalho experimental foram utilizados substratos de aço de baixa liga (DIN C45E) e três tipos de adesivos, com diferentes propriedades, Araldite® AV138, 2015 e Sikaforce® 7752. De modo a facilitar a comparação de resultados e a compreender as propriedades de cada um dos materiais utilizados neste estudo, estes são abordados mais pormenorizadamente neste trabalho.

##### 3.1.1.1 Substratos

O material utilizado como substrato foi um aço de baixa liga DIN C45E. Por forma a determinar o comportamento deste material, quando solicitado, realizaram-se 5 ensaios de tração.

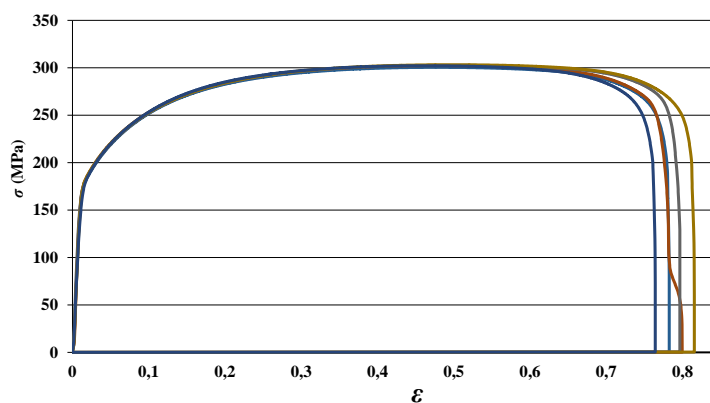


Figura 41-Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  à tração do aço DIN C45E [30]

A Figura 41 mostra as curvas tensão-deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ), onde se salienta a consistência dos resultados obtidos em termos de rigidez na zona elástica, expressa pelo módulo de Young ( $E$ ), tensão de limite elástico ( $\sigma_{\text{elast}}$ ), tensão de rotura à tração ( $\sigma_{\text{rot}}$ ) e deformação de rotura à tração ( $\epsilon_T$ ).

Os valores médios obtidos nestes ensaios e os respetivos desvios padrão são apresentados na Tabela 15

Tabela 15 - Tabela dos valores médios dos ensaios de tração do aço (DIN C45E)

	Valor Médio	Desvio Padrão
<b>Tensão de limite elástico (<math>\sigma_{\text{elast}}</math>) [MPa]</b>	<b>180,70</b>	<b><math>\pm 1,22</math></b>
<b>Tensão de rotura à tração (<math>\sigma_{\text{rot}}</math>) [MPa]</b>	<b>301,93</b>	<b>0,79</b>
<b>Deformação de rotura à tração (<math>\epsilon_T</math>) [%]</b>	<b>76,16</b>	<b>1,93</b>

Foi utilizado um valor de  $E$  de 210 GPa como valor de referência para o material em estudo.



Figura 42-Aspecto dos provetes após rotura [2]

Como pode ser verificado na Figura 42, a rotura dos substratos revelou-se similar, sendo acompanhada de estrição acentuada, resultado da ductilidade do material.

### 3.1.1.2 Adesivos

Para este estudo foram utilizados três tipos de adesivos, Araldite® AV138, caracterizado como um adesivo epóxico frágil, Araldite® 2015, classificado como um adesivo epóxico dúctil, e o Sikaforce® 7752, um adesivo de poliuretano dúctil.

### 3.1.1.2.1 Araldite® AV138

Este adesivo é classificado como um adesivo epóxico frágil, mas de elevada resistência, apropriado para unir materiais de famílias diferentes, como por exemplo metais, compósitos e polímeros [82]. Os resultados obtidos dos ensaios de tração realizados aos provetes maciços encontram-se na Figura 43.

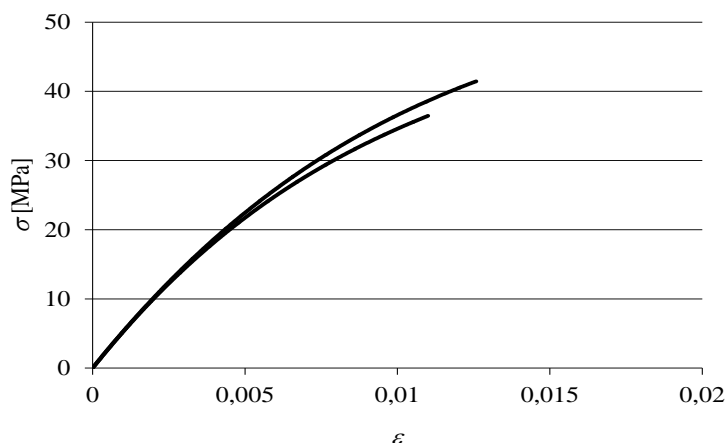


Figura 43-Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [83]

As propriedades mecânicas deste adesivo encontram-se na Tabela 16.

Tabela 16 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [6].

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, $E$ [GPa]	4,89±0,81
Coefficiente de Poisson, $\nu^b$	0,35
Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]	36,49±2,47
Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]	39,45±3,18
Deformação de rotura à tração, $\epsilon_f$ [%]	1,21±0,10
Módulo de elasticidade transversal, $G$ [GPa]	1,56±0,01
Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]	25,1±0,33
Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]	30,2±0,40
Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$ [%]	7,8±0,7
Tenacidade à tração, $G_{IC}$ [N/mm]	0,20 <sup>a</sup>
Tenacidade ao corte, $G_{IIC}$ [N/mm]	0,38 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> valores do fabricante

<sup>b</sup> valores estimados no trabalho de Neto et al. [6]

### 3.1.1.2.2 Araldite® 2015

O Araldite® 2015 é definido como um adesivo epóxico estrutural, apresentando uma ductilidade moderada e uma resistência à tração e corte inferiores ao Araldite® AV138. Porém, sendo um adesivo dúctil, proporciona a redistribuição de tensões nas regiões de concentração de esforços, geralmente nas extremidades das juntas, devido à assimetria do carregamento e ao efeito de deformação diferencial dos substratos.

Os resultados experimentais dos ensaios de tração realizados encontram-se na Figura 44.

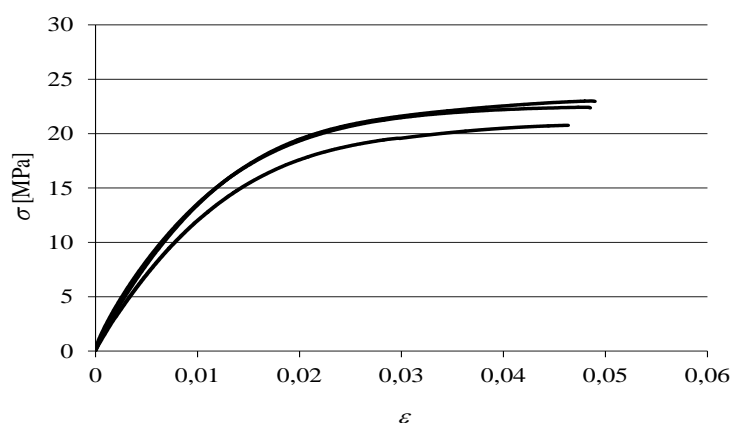


Figura 44-Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [82]

Tabela 17 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [82]

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, $E$ [GPa]	1,85±0,21
Coefficiente de Poisson, $\nu^a$	0,33
Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]	12,63±0,61
Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]	21,63±1,61
Deformação de rotura à tração, $\epsilon_f$ [%]	4,77±0,15
Módulo de elasticidade transversal, $G$ [GPa]	0,56±0,21
Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]	14,6±1,3
Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]	17,9±1,8
Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$ [%]	43,9±3,4
Tenacidade à tração, $G_{IC}$ [N/mm]	0,43±0,02
Tenacidade ao corte, $G_{IIC}$ [N/mm]	4,70±0,34

<sup>a</sup>valor do fabricante

Na Tabela 17 encontram-se as propriedades mecânicas deste adesivo. Em comparação com o Araldite® AV138, este adesivo demonstra uma deformação de rotura ao corte quase seis vezes superior, no entanto, a sua tensão de rotura ao corte e à tração é praticamente metade em relação ao Araldite® AV138.

### 3.1.1.2.3 Sikaforce® 7752

Este adesivo é dúctil, podendo ser confirmado nas curvas  $\sigma$ - $\epsilon$ , da Figura 45. É um adesivo à base de poliuretano fornecido sob a forma de 2 componentes, resina e endurecedor.

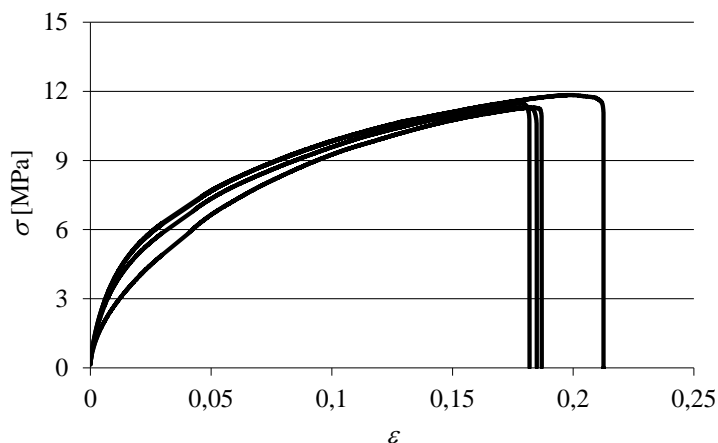


Figura 45-Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de provetes maciços de Sikaforce® 7752 [84]

Tabela 18 – Propriedades mecânicas do adesivo Sikaforce 7752® [84].

Propriedades	Sikaforce®7752
Módulo de Young, $E$ [MPa]	493,8±89,6
Coefficiente de Poisson, $\nu^a$	0,33
Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]	3,24±0,50
Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]	11,49±0,30
Deformação de rotura à tração, $\epsilon_f$ [%]	19,18±1,40
Módulo de elasticidade transversal, $G$ [GPa]	0,187±0,164
Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]	5,16±1,10
Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]	10,17±0,60
Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$ [%]	54,82,9±6,40
Tenacidade à tração, $G_{IC}$ [N/mm]	2,36±0,20
Tenacidade ao corte, $G_{IIC}$ [N/mm]	5,41±0,50

<sup>a</sup> valor do fabricante

A mistura da resina/endurecedor deve ser realizada numa razão de 100g/20g, respetivamente. Esta informação é facultada pelo fabricante na ficha técnica do produto.

Na Tabela 18 encontram-se as propriedades mecânicas deste adesivo [84]. Com base nestas propriedades, é esperado que se obtenham bons resultados em juntas com este adesivo que apresenta uma resistência razoável e uma elevada ductilidade.

### 3.1.2 Geometria das juntas

Para ilustrar a geometria da junta utilizada para o ensaio, a Figura 46 esquematiza o formato da junta T-peel, bem como o seu modo de carregamento.

As dimensões relevantes da junta são as seguintes (mm): espessura dos aderentes  $t_p=2$  mm, largura da junta  $w=25$  mm, espessura da camada de adesivo  $t_A=0,2$  mm e comprimento ligado  $L=90$  mm, que corresponde ao maior comprimento linear do aderente, raio interior de curvatura após a dobragem dos aderentes  $R=1$  mm e comprimento livre  $c=22$  mm. O centro do ponto de soldadura está posicionado pelas cotas  $a$  e  $b$ , ambas iguais a 12,5 mm.

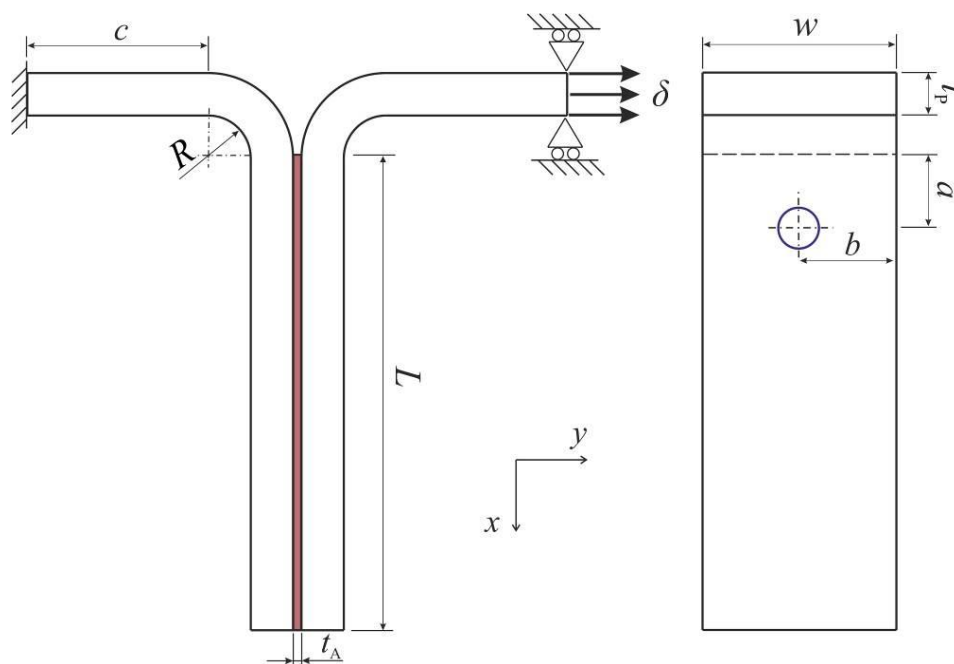


Figura 46 – Dimensões e geometria das juntas T-peel [2].

### 3.1.3 Processo de fabrico

Como mencionado anteriormente o material utilizado para os substratos foi um aço DIN C45E, na forma de chapa, já com a espessura pretendida (2 mm). As tiras para produzir os substratos foram obtidas através de corte por guilhotina, ficando já com as

dimensões finais. Em seguida as tiras foram quinadas obtendo-se como resultado final apresentado na Figura 47.



Figura 47-Provetes cortados e quinados [2]

Para garantir uma boa adesão entre os substratos e os adesivos, procedeu-se à preparação da superfície dos provetes através de um processo mecânico de granalhagem (Figura 48). Esta operação tem como finalidade remover a camada superficial de óxido e aumentar a rugosidade da superfície de ligação, de modo a aumentar a superfície de contacto entre o adesivo e o aderente. O equipamento utilizado para executar esta operação foi uma granalhadora Cidblast® modelo RT6S com granalha de alumina.



Figura 48- Granalhagem mecânica dos provetes [2]

Após a limpeza mecânica das superfícies com acetona para remover os resíduos resultantes do processo de granalhagem realizou-se a montagem dos substratos, com o

auxílio de fita adesiva e de dois fios de espessura calibrada 0,2 mm ao longo da superfície de colagem, de modo a garantir uma camada de adesivo uniforme com a espessura pretendida (Figura 49).

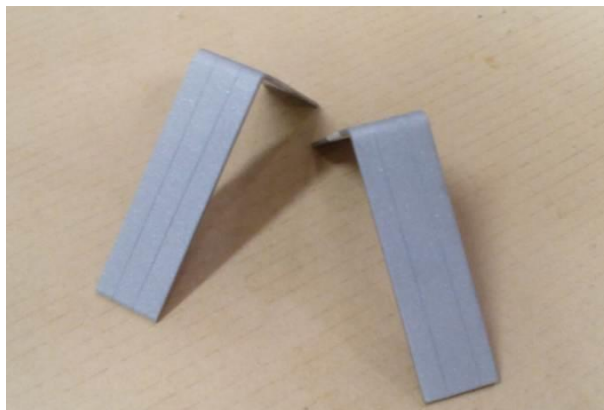


Figura 49 – Aderentes após granalhagem, limpeza das superfícies de ligação e colocação de fio de 0,2 mm de diâmetro ao longo da superfície de colagem [2]

De seguida procedeu-se à preparação dos adesivos. Durante a preparação dos adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cuja mistura é feita manualmente, a relação mássica entre resina/endurecedor é de 100/40 e 5/1, respetivamente (Figura 50). Para o Araldite® 2015, a mistura é feita automaticamente através do bico de mistura, sendo que a razão mássica dos dois componentes é de 1/1.



Figura 50- Pesagem das massas de resina e endurecedor para o adesivo Sikaforce® 7752 [2]

Após devida preparação dos adesivos, estes foram de imediato aplicados nos substratos de modo a evitar o seu endurecimento, bem como o aparecimento de vazios na camada adesiva, podendo assim garantir uma camada uniforme ao longo de toda a junta. De forma a manter os aderentes posicionados foram aplicados grampos (Figura 51) ao longo do comprimento de colagem enquanto os adesivos estavam em cura.



Figura 51-Juntas adesivas com alicates de pressão, dispostas horizontalmente sobre placa plana protegida com Teflon®[2]

De forma a garantir o correto posicionamento dos aderentes, as juntas foram colocadas em posição horizontal sobre uma chapa plana protegida com Teflon®, com o intuito de evitar a colagem da junta à chapa. O processo de cura das juntas foi realizado à temperatura ambiente.

As juntas híbridas, depois da colagem, foram submetidas a um processo de soldadura, pela técnica *weld-through* (Figura 52). Este processo de soldadura foi aplicado tanto às juntas híbridas como às juntas puramente soldadas.

O modo de preparação das juntas híbridas diferiu um pouco em relação as juntas adesivas, já que os provetes foram previamente marcados, indicando a localização dos pontos de soldadura. Posteriormente à aplicação do adesivo e fecho das juntas, estas foram colocadas num *gabarit* de forma a facilitar o manuseamento, bem como imobilizar os provetes durante a aplicação do ponto de soldadura.



Figura 52-Aplicação de ponto de soldadura nas juntas híbridas [2]

A operação de soldadura foi realizada a um máximo de 10 minutos após a aplicação do adesivo. Os pontos de soldadura foram realizados por um equipamento de soldadura CEA® NKLT-28, com um eléctrodo em forma de tronco de cone ( $\varnothing 6$  mm nas arestas de contacto) de acordo com a norma ISO 5182.

Este tipo de equipamento permite o ajuste da força de aperto do eléctrodo (até 2,2 kN), que é aplicada por um pedal. A máquina de soldadura CEA® NKLT-28 tem uma capacidade máxima de corrente de curto-circuito de 14 kA e uma potência nominal de soldadura de 25kVA. Os parâmetros introduzidos no equipamento são o tempo de aperto, que

representa o tempo (em ciclos de 50 Hz de corrente aplicada) entre o aperto das chapas a soldar e o início da soldadura, fixado em 3 ciclos, o tempo de subida, correspondente ao tempo necessário para se atingir a corrente de soldadura necessária, regulado para 5 ciclos, tempo de soldadura, correspondendo à duração do fluxo de corrente foi fixado em 35 ciclos, a corrente de soldadura, relativa à percentagem de corrente fornecida pela máquina de soldadura, ajustado para 45 % da capacidade da máquina (6,3 kA)[6].

Concluído o período de cura do adesivo (aproximadamente uma semana), procedeu-se à remoção do excesso de adesivo dos provetes com recurso a uma lima (Figura 53).



Figura 53-Remoção de excesso de adesivo depois de curado [2]

### 3.1.4 Ensaio das juntas

Terminado o fabrico dos provetes, procedeu-se à realização dos ensaios de tração dos respetivos provetes de cada um dos diferentes tipos de adesivos.



Figura 54-Máquina de ensaios Shimadzu® AG-X 100 e computador de aquisição de dados [2]

Para cada tipo de adesivo foram realizados 10 ensaios, 5 em juntas adesivas e 5 em juntas adesivas-soldadas. Os ensaios de tração foram realizados numa máquina de ensaios de tração Shimadzu® AG-X 100 (Figura 54), equipada com uma célula de carga de 100kN, à temperatura ambiente, em controlo de deslocamento (1 mm/min). Foi aplicada uma distância inicial entre maxilas de 50 mm.

### 3.1.5 Resultados obtidos

Concretizados os ensaios de tração aos provetes, foram analisados os modos de rotura de cada tipo de adesivo e as curvas  $P-\delta$  obtidas durante os ensaios. Com base nos resultados obtidos, foram realizadas comparações em relação à resistência obtida por cada um dos provetes, estudando as eventuais anomalias que poderiam ter interferido nos resultados esperados.

#### 3.1.5.1 Juntas Soldadas

Na inspeção visual realizada aos provetes, após rotura total, pode-se verificar que o rompimento da junta ocorre ao longo do comprimento do aderente, com início no contorno do ponto de soldadura (Figura 55).



Figura 55-Provetes de uma junta soldada após rotura total [2]

A partir dos resultados obtidos dos ensaios de tração, a Figura 56 mostra força-deslocamento ( $P-\delta$ ), de modo a demonstrar o comportamento de cada um dos provetes. Neste estudo não se consideraram os valores de dois dos provetes ensaiados devido à discrepância de valores.

É possível observar que os provetes apresentam um comportamento idêntico ao longo do processo de rotura. Na fase inicial verifica-se uma subida da carga sustentada com um declive acentuado até  $\approx 1000$  N a partir deste valor inicia a deformação do aderente

à flexão, o que origina uma subida com menor declive da carga sustentada. A carga máxima observada corresponde ao início da rotura do aderente na periferia do ponto de soldadura. A força máxima obtida nos ensaios considerados foi de 3598,3 N para um deslocamento de 20,1 mm, e a menor 3339,6 N com um deslocamento de 20,0mm. Após início da deformação plástica dos aderentes, na vizinhança do ponto de soldadura, a carga diminui para valores da ordem dos 2400 N. Posteriormente ocorre a rotura de um dos aderentes pela mesma zona, perlongando-se pelas duas bandas laterais do ponto de soldadura, dando origem a um novo aumento da carga sustentada até atingir um máximo local para um deslocamento de aproximadamente 33,2 mm. A este máximo local corresponde a distancia máxima dos dois caminhos de rotura, e rotura do aderente de metade do perímetro do contorno do ponto de soldadura. Quando se atinge este máximo local, a rotura já não se propaga pelo contorno do ponto de soldadura, mas apenas pelo aderente, dando origem a um arrancamento de material em forma de lágrima. Este arrancamento encontra-se associado ao patamar de carga que se segue ao máximo local, até ao rompimento total da junta. O arrancamento total da porção de aderente corresponde à rotura total da junta, originando uma diminuição da carga sustentada até zero.

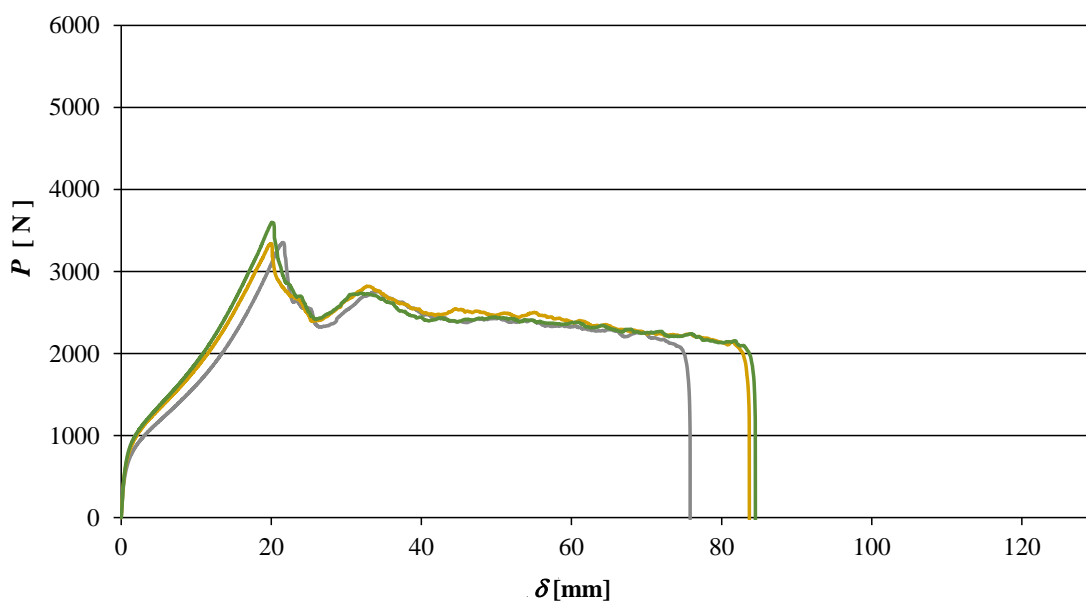


Figura 56- Curvas  $P$ - $\delta$  experimentais das juntas soldadas [2]

### 3.1.5.2 Juntas adesivas e híbridas com o Araldite® AV138

Após rotura das juntas, realizou-se uma inspeção visual à zona de fratura das juntas adesivas com o Araldite® AV138 (Figura 57).



Figura 57-Modo de rotura nas juntas adesivas com o Araldite®AV138 [2]

Nesta inspeção verificou-se que ambos os aderentes permaneceram cobertos com uma fina camada de adesivo, o que é indicativo de um modo de rotura coesivo, não se observou plastificação dos aderentes.

A Figura 58 mostra as curvas  $P-\delta$  das juntas, não se considerou um dos provetes ensaiado, vistos os valores de  $P$  serem consideravelmente menores em relação aos restantes. A causa deste desvio pode estar relacionada com uma eventual falta de adesivo na junta. Porém, na Figura 58 pode-se constatar uma boa repetibilidade dos resultados obtidos nos restantes ensaios, revelou-se um correto fabrico dos provetes.

É possível verificar um aumento da carga sustentada até ser atingida a carga máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ ). Após a carga máxima o adesivo rompeu. As curvas apresentam um comportamento linear até atingirem o valor de  $P_{m\acute{a}x}$ , a força máxima obtida nestes ensaios foi de 1256,6 N, associado a um deslocamento médio de 0,130 mm, o menor valor foi de 1080,8 N para um deslocamento de 0,107 mm.

Após o início da fenda, a carga sustentada diminui drasticamente, indicando que após o início da fenda o adesivo perde grande parte da sua resistência, quando submetido a esforços de arrancamento. Com o decorrer do ensaio, a fenda propaga-se ao longo do adesivo, simultaneamente com uma ligeira diminuição da carga sustentada até se atingir a rotura total.

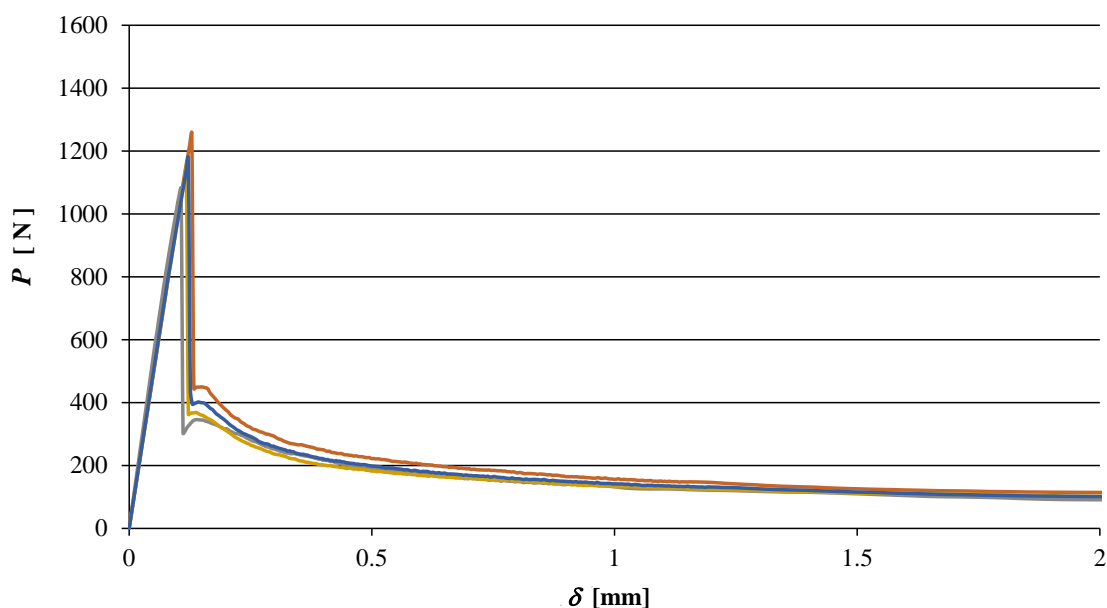


Figura 58-Curvas  $P$ - $\delta$  experimentais das juntas adesivas com o Araldite® AV138 [2]

No caso das juntas híbridas com Araldite® AV138, identificou-se uma combinação de rotura coesiva do adesivo com a rotura da junta soldada pelo destacamento do aderente pelo contorno de soldadura (Figura 59).



Figura 59-Modo de rotura nas juntas híbridas adesivas com o Araldite® AV138 [2]

A Figura 60 mostra as curvas  $P$ - $\delta$  das juntas, não foram considerados dois dos provetes, visto não apresentarem significado estatístico, atendendo aos valores de carga máxima substancialmente inferiores em relação aos restantes. A causa possível para estes resultados pode encontrar-se relacionado com uma deficiente soldadura da junta ou devido a um ligeiro desalinhamento dos provetes durante a operação de soldadura.

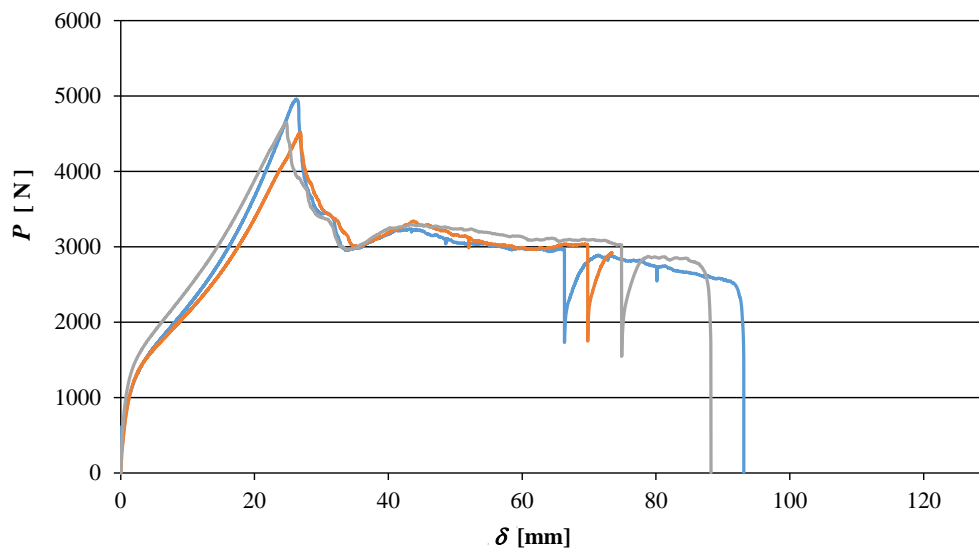


Figura 60 - Curvas  $P$ - $\delta$  experimentais das juntas híbridas com o Araldite®AV138 [2]

Na Figura 60 pode-se observar numa fase inicial uma subida linear da carga, até a um valor de  $P$  aproximadamente de 1000 N. Após esse valor, verifica-se o início da deformação dos aderentes, em que o aumento da carga se dá com menor taxa de variação relativamente à subida inicial. Quando o adesivo não consegue compensar a sua deformação, a força que lhe é aplicada atinge o valor de  $P_{\text{máx}}$  e inicia-se a rotura do aderente pelo contorno do ponto de soldadura. O valor da maior força obtida nos ensaios foi de 4955,5 N, associada a um deslocamento de 26,23 mm, enquanto o menor valor foi de 4516,3 N, com um deslocamento de 26,82 mm. Ao ser atingido o valor de  $P_{\text{máx}}$ , a força diminui até atingir um mínimo local, como verificado nos provetes apenas soldados, que corresponde ao início da propagação da rotura do aderente pelo contorno de soldadura (Figura 61).



Figura 61 - Início da rotura do aderente pelo contorno do ponto de soldadura [2]

Quando a rotura no aderente atinge aproximadamente metade do perímetro do ponto de soldadura, que é o instante em que os dois caminhos de rotura se encontram no afastamento máximo (Figura 62), a carga sustentada atinge um máximo local para aproximadamente um deslocamento de  $\delta=43,9$  mm.



Figura 62 - Afastamento máximo das zonas de rotura pelo contorno do ponto de soldadura [2]

Posteriormente, observa-se um patamar de carga que corresponde simultaneamente ao avanço da fenda do adesivo e ao progresso da rotura do ponto de soldadura através do arrancamento de material, ao longo do comprimento da junta (Figura 62).

Nesta altura, os valores de carga diminuem ligeiramente à medida que a rotura evolui. Apesar da rotura do adesivo e rompimento do aderente ocorrerem simultaneamente, a velocidade de propagação da fenda do adesivo é superior à velocidade de arrancamento do aderente. Esta diferença de velocidades de propagação dá origem a que o adesivo seja o primeiro a atingir a rotura total. A rotura total do adesivo corresponde à diminuição brusca da carga observada no patamar de carga que se observada na Figura 60, e ocorre na junta de  $P_{máx}$  mais elevado para um deslocamento de 74,9 mm. A acentuada diminuição da carga resulta da rotura do adesivo, provocando um relaxamento da rigidez da junta decorrente da rotura do adesivo. Quando se verifica o arrancamento total da porção de material em forma de lágrima, ocorre a rotura total da junta (Figura 63) e a carga diminui até zero.



Figura 63 - Rotura total do aderente por efeito de arrancamento de material [2]

### 3.1.5.3 Juntas adesivas e híbridas com o Araldite® 2015

Após rotura das juntas adesivas de Araldite® 2015, realizou-se uma inspeção visual aos provetes ensaiados onde se observou que as juntas apresentaram rotura coesiva do adesivo sem plastificação dos aderentes (Figura 64).



Figura 64 - Modo de rotura nas juntas adesivas com o Araldite® 2015 [2]

A Figura 65 mostra as curvas  $P-\delta$  das juntas adesivas com o Araldite® 2015. Na Figura 65 pode-se observar uma subida linear da carga sustentada até  $P_{máx}$ , que corresponde ao comportamento elástico do adesivo. Após este ponto, dá-se início da fenda no adesivo, e o valor da carga sustentada decresce, com uma transição mais suave em

comparação com o Araldite® AV138. Este comportamento encontra-se relacionado com o facto do Araldite® 2015 ser um adesivo mais dúctil. Após aparecimento da fenda, a junta T-peel adesiva perde grande parte da sua resistência.

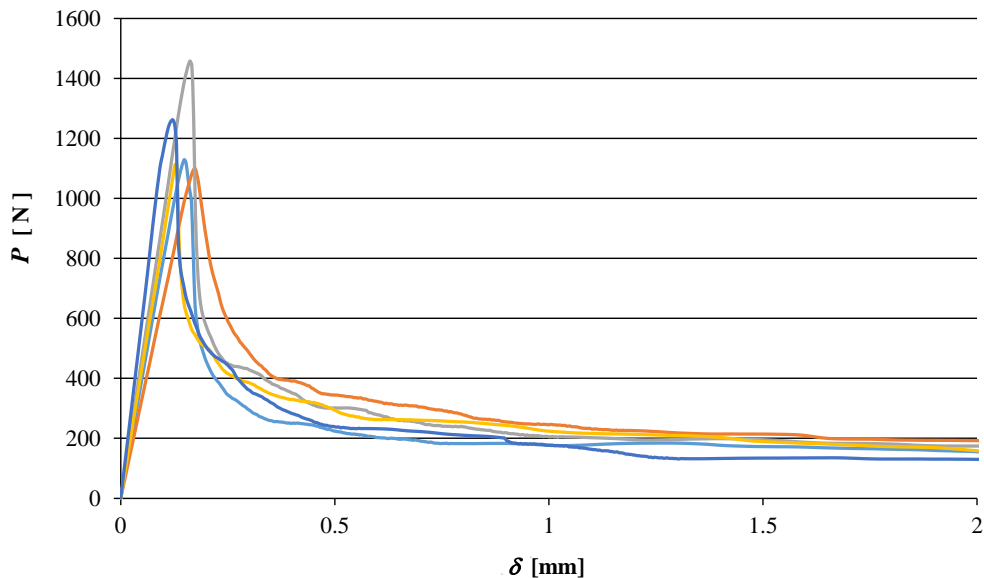


Figura 65 - Curvas  $P$ - $\delta$  experimentais das juntas adesivas com o Araldite® 2015 [2]

O valor mais elevado de força máxima registado nos ensaios foi de 1458,4 N, associado a um deslocamento de 0,162 mm, e o menor valor foi de 1099,0 N para um deslocamento de 0,174 mm. Após diminuição acentuada, depois de ser atingir  $P_{máx}$ , a carga continua a diminuir até aproximadamente  $\delta=1$  mm, estabilizando até a rotura final.

Depois da inspeção visual realizada às juntas híbridas com Araldite® 2015, verificou-se uma rotura combinada entre rotura coesiva da camada de adesivo com rotura do contorno do ponto de soldadura (Figura 66).



Figura 66 - Modo de rotura nas juntas híbridas com o Araldite® 2015 [2]

A Figura 67 mostra as curvas  $P-\delta$  das juntas, não constam dois dos provetes ensaiados, devido à discrepância de valores obtidos em relação aos restantes. A origem da causa destes desvios poderá estar relacionada com uma deficiente soldadura da junta ou com um possível desalinhamento dos provetes durante a operação de soldadura.

Na Figura 67 observa-se uma subida inicial da carga a rigidez acentuada constante, até aproximadamente um valor de 1300 N. Posteriormente inicia-se a flexão dos aderentes, originando uma subida da carga sustentada com menor taxa de crescimento relativamente à subida inicial, até ao valor de  $P_{m\acute{a}x}$ . O valor mais elevado registado nestes ensaios foi de 5031,65 N, com um deslocamento de 27,10 mm, e o menor valor foi de 4609,03 N para um deslocamento de 25,74 mm.

Depois do aparecimento da fenda no adesivo em  $P_{m\acute{a}x}$ , constata-se que o comportamento verificado é idêntico às juntas híbridas com Araldite® AV138. Como pode ser observado Figura 67, a rotura total do adesivo não acontece antes da rotura total do ponto de soldadura, como observado nas juntas híbridas com o Araldite® AV138. Este comportamento explica-se pelo facto do Araldite® 2015 apresentar um comportamento mais dúctil que o Araldite® AV138, podendo suportar maiores deformações, o que evita uma rotura prematura do adesivo relativamente ao ponto de soldadura.

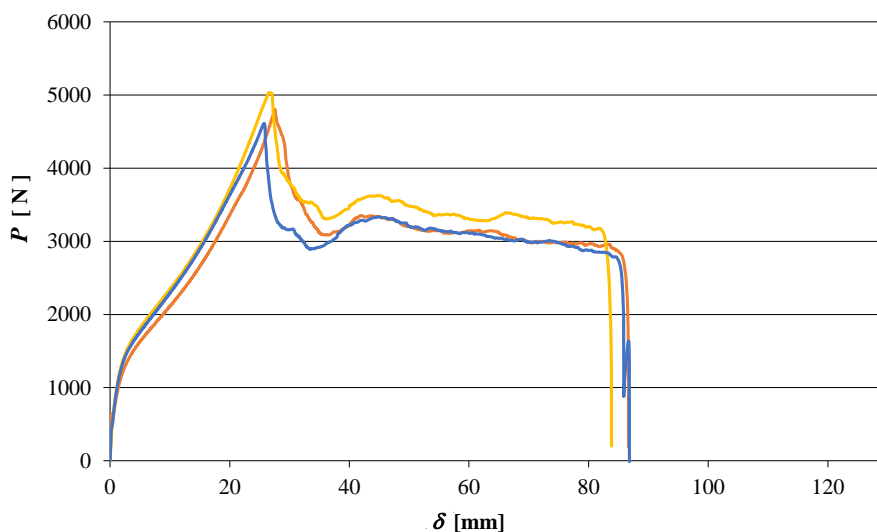


Figura 67 - Curvas  $P-\delta$  experimentais das juntas híbridas com o Araldite® 2015 [2]

#### 3.1.5.4 Juntas adesivas e híbridas Sikaforce® 7752

Na inspeção visual realizada após a rotura aos provetes colados com o adesivo Sikaforce® 7752, após rotura, foi possível de observar que estes apresentaram um modo de rotura coesivo, apesar de uma ligeira deformação plástica dos aderentes ( Figura 68).



Figura 68 - Modo de rotura nas juntas adesivas com o Sikaforce® 7752 [2]

Com os dados obtidos nos ensaios de tração realizados às juntas adesivas com o Sikaforce® 7752, construíram-se as curvas  $P-\delta$  apresentadas na Figura 69. Não se considerou um dos provetes ensaiados devido à discrepância de valores em relação aos restantes.

Como nos casos anteriormente observados, verifica-se um aumento de carga sustentada a rigidez constante até  $P_{m\acute{a}x}$ . Nestes ensaios o valor mais elevado de  $P_{m\acute{a}x}$  obtido foi de 1364,42 N, com um deslocamento de 0,18 mm, e o menor foi de 1295,09 N para um deslocamento de 0,19 mm.

Após atingir o  $P_{m\acute{a}x}$ , os provetes obtiveram o mesmo comportamento que os restantes adesivos já mencionados. Porém, é de se evidenciar o facto de estas juntas apresentarem a taxa de decréscimo da carga sustentada inferior às juntas adesivas com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Também se pode verificar que estas juntas perdem menos resistência após o início da fenda do adesivo. A partir de  $\delta = 1,5$  mm, a carga sustentada estabiliza em valores entre 500 e 600N até atingir a rotura. Este comportamento reflete a maior ductilidade do adesivo Sikaforce® 7752 em comparação com os restantes adesivos ensaiados.

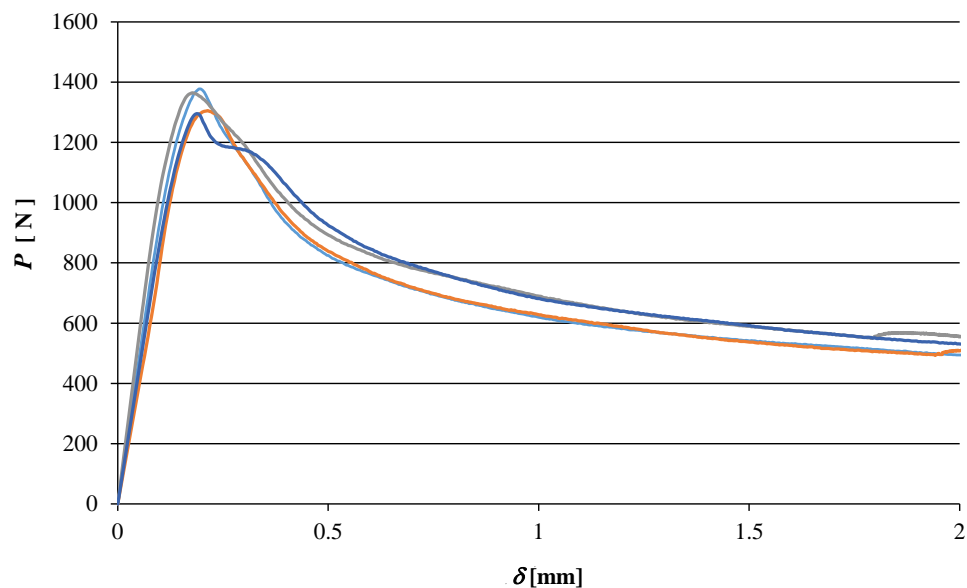


Figura 69 - Curvas  $P$ - $\delta$  experimentais das juntas adesivas com o Sikaforce® 7752 [2]

As juntas híbridas com o Sikaforce® 7752 apresentam o mesmo modo de rotura (Figura 70) que as juntas híbridas com o Araldite® AV138 e Araldite® 2015.



Figura 70 - Modo de rotura nas juntas híbridas com o Sikaforce® 7752 [2]

A Figura 71 mostra as curvas  $P$ - $\delta$  das juntas híbridas com o Sikaforce® 7752. Não constam dois dos provetes ensaiados, devido à discrepância de valores obtidos em relação aos restantes ensaiados. As causas possíveis destas variações de valores, são as já referidas para os outros provetes híbridos.

Pela análise das curvas  $P-\delta$  pode-se verificar uma subida brusca da carga sustentada até valores entre 1500 e 2000 N. Estes picos de carga intermédios encontram-se associados ao início da fenda no adesivo. De seguida a carga diminui para valores da ordem dos 1000 N, depois  $P$  volta a subir novamente, apresentando o mesmo comportamento que as juntas híbridas com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015.

O decréscimo abrupto de  $P$  verificado a seguir ao pico máximo de  $P$  encontra-se associado à rotura total do ponto de soldadura, que ocorre muito antes da rotura total do adesivo. Posteriormente à rotura do ponto de soldadura, a carga estabiliza em valores da mesma ordem de grandeza que os observados para as respetivas juntas adesivas.

Como mencionado anteriormente, este comportamento encontra-se relacionado com a ductilidade do adesivo. Dos três adesivos ensaiados, este é o que apresenta um maior ductilidade, podendo suportar maiores deformações, o que também resulta numa velocidade de propagação da fenda inferior.

Após o segundo patamar de carga, que corresponde ao processo de rotura do adesivo, verifica-se a rotura total da junta com o decréscimo da carga sustentada até zero.

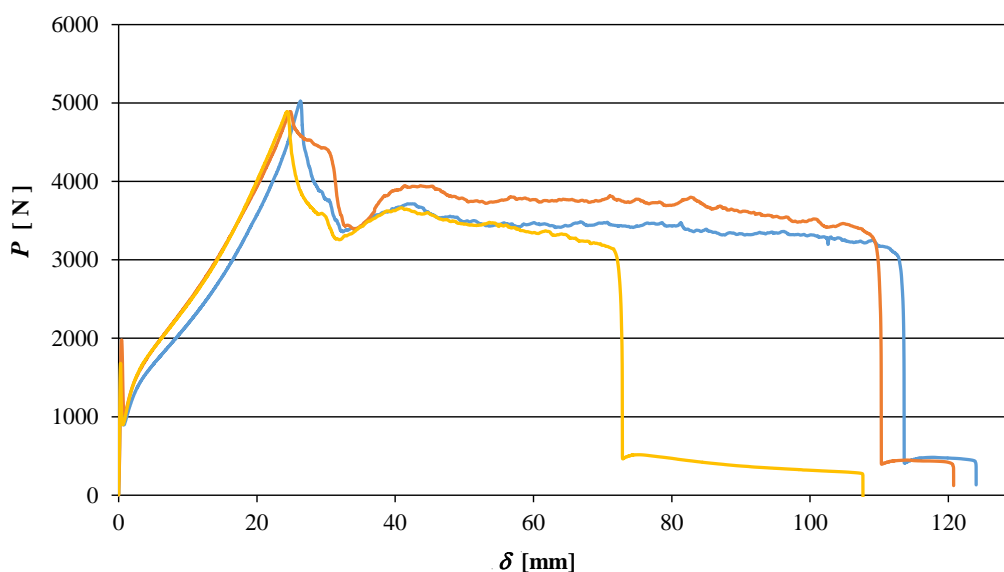


Figura 71 - Curvas  $P-\delta$  experimentais das juntas híbridas com o Sikaforce® 7752 [2]

### 3.1.6 Análise dos resultados obtidos- comparação dos valores de $P_{max}$

A Figura 72 sumaria os valores médios de  $P_{máx}$  e o respetivo desvio padrão, dos vários tipos de juntas ensaiadas. Nesta comparação é possível de se observar que as juntas híbridas apresentam uma resistência superior às juntas adesivas. Esta diferença de valores deve-se à rotura do adesivo ocorrer para valores de  $P$  inferiores aos do ponto de soldadura das juntas híbridas. Nos ensaios realizados pode-se observar que, após rotura

inicial do adesivo, a junta perde grande parte da sua rigidez inicial, o que compromete a sua função estrutural. A diminuição do  $P_{m\acute{a}x}$  verificado nas juntas adesivas em comparação com as soldadas foi de cerca de 66,1% para o Araldite® AV138 e o Sikaforce® 7752 e de 64,7 % para o Araldite® 2015.

A conjugação da camada de adesivo e o ponto de soldadura produziram um aumento do  $P_{m\acute{a}x}$  em todas as configurações de juntas híbridas em relação às juntas soldadas.

No caso de  $P_{m\acute{a}x}$  da junta híbrida com o Araldite® AV138, verifica-se um aumento percentual de 37,2% em comparação com as juntas soldadas. Nas juntas híbridas com o Araldite® 2015, o aumento foi de 40,3 %. A maior variação verificada em relação às juntas soldadas foi registada para as juntas com o Sikaforce® 7752, com aumento de 43,8%.

A conversão de uma junta adesiva numa junta híbrida através da aplicação de um ponto de soldadura produziu um aumento do valor de  $P_{m\acute{a}x}$  de cerca de 304,1% nas juntas com o Araldite® AV138, de 297,0% com o Araldite® 2015 e de 269,4% com o Sikaforce® 7752.

Em relação às propriedades mecânicas dos adesivos, verifica-se que a tensão de rotura à tração é máxima para o Araldite® AV138 e mínima para o Sikaforce® 7752. A deformação de rotura à tração, parâmetro associado à ductilidade, varia inversamente. Na Figura 72 é possível de observar que a resistência das juntas híbridas varia diretamente com o aumento da ductilidade do adesivo, apesar da sua tensão de rotura à tração diminuir. Com estas comparações, pode-se concluir que a ductilidade do adesivo tem um papel mais importante na resistência da junta do que a sua resistência. Este resultado já era espectável devido ao tipo de geometria das juntas *T-peel*, que gera a concentração de tensões de arrancamento numa área muito localizada na extremidade do adesivo, o que faz com que adesivos mais resistentes, mas frágeis apresentem resultados inferiores.

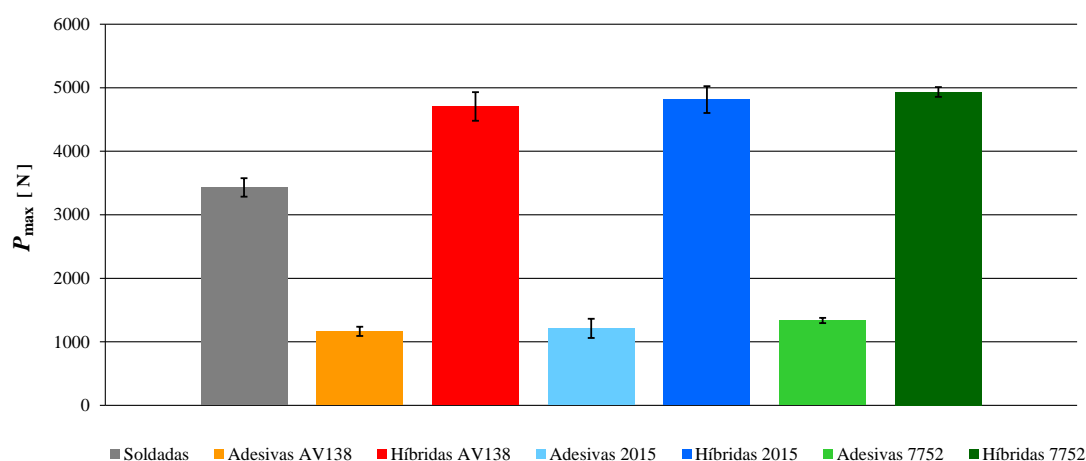


Figura 72 - Valores experimentais médios de  $P_{m\acute{a}x}$  e respetivo desvio padrão para todas as configurações de juntas estudadas [2]

## 3.2 Trabalho numérico

Neste subcapítulo é feita a previsão das juntas T-peel soldadas, adesivas e híbridas no *software* Abaqus® pelo Método de Elementos Finitos Extendido (MEFE) para a simulação do processo de rotura das juntas para assim ser possível analisar a capacidade do MEFE na previsão da resistência das juntas T-peel já referidas.

Inicialmente é efetuada as condições de análise numérica definindo as condições fronteira e refinamento da malha. Com este estudo é possível determinar a capacidade do MEFE na previsão da resistência das juntas dependendo das características de cada junta.

Para conclusão de resultados obtidos é feita uma análise de comparação dos resultados experimentais com os numéricos das diferentes juntas (adesivas e híbridas) e com os diferentes adesivos.

### 3.2.1 Condições da análise numérica

A análise numérica foi efetuada no *software* ABAQUS® pelo método MEFE. Na construção dos modelos tridimensionais (3D) foram utilizadas condições longitudinais de simetria permitindo assim modelar metade da largura da junta e metade da espessura do adesivo e ponto de soldadura no caso das juntas híbridas.

Os elementos da junta adesiva/híbrida (adesivo, aderente e ponto de soldadura) foram modelados como sólidos e o adesivo utilizou uma formulação para a simulação do início e propagação do dano (Figura 73).

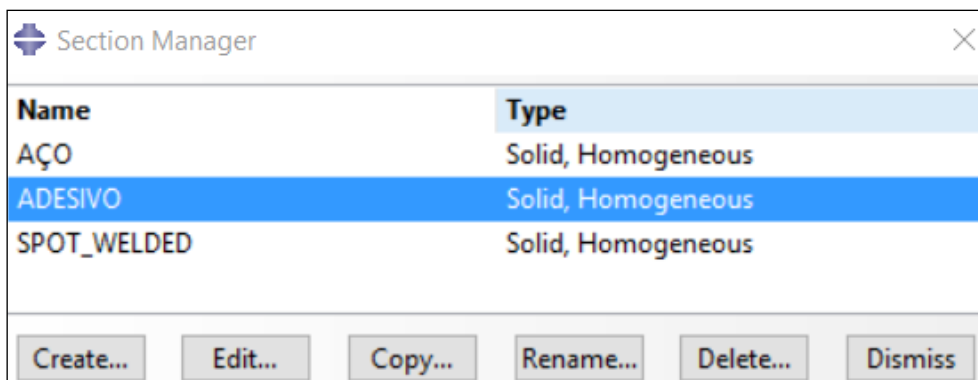


Figura 73 - Propriedades dos elementos segundo o MEFE

Em relação às condições fronteira impostas nos modelos das juntas adesivas e híbridas (Figura 74), o plano de simetria a meio da espessura do adesivo ficou encastrado, o provete foi restringido na direção da largura do provete e a extremidade livre do aderente foi restringida na direção longitudinal da junta e foi sujeita a um deslocamento de tração.

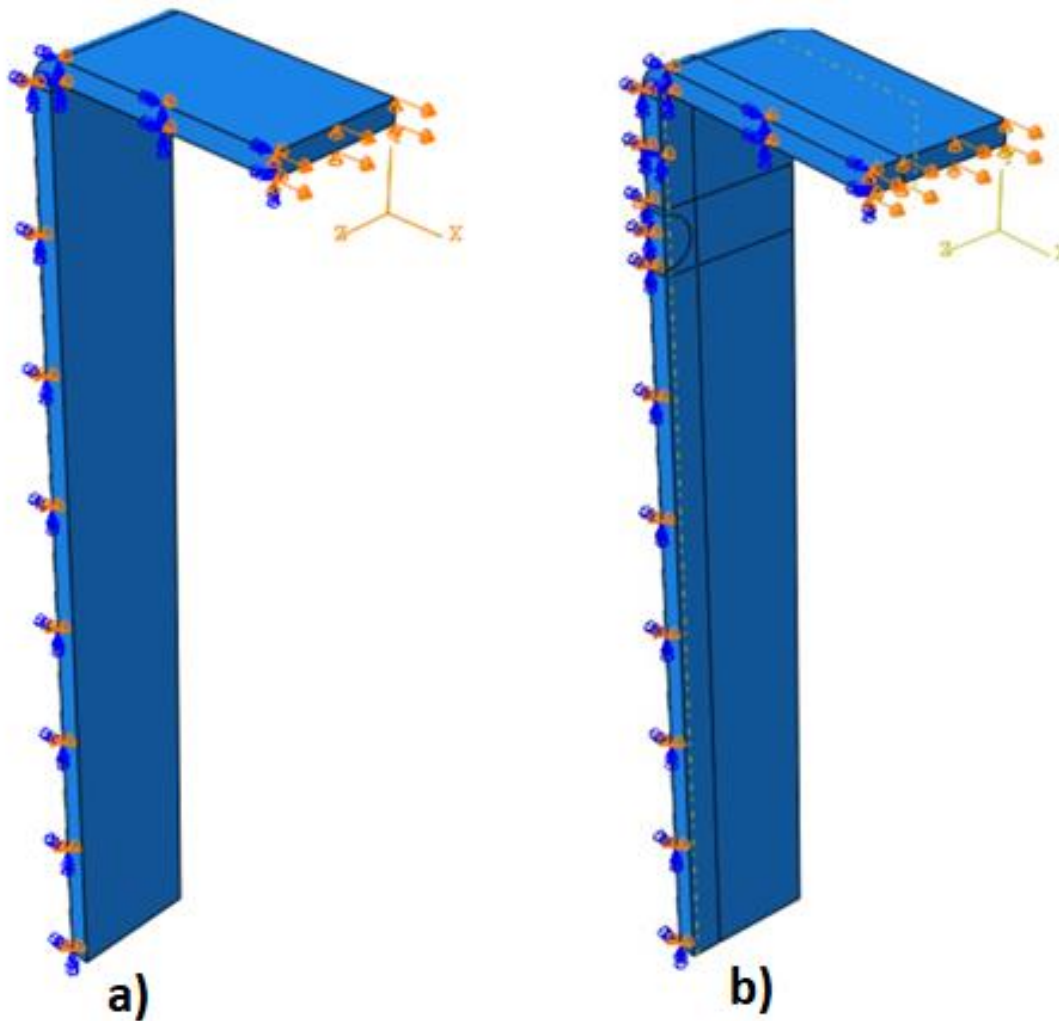


Figura 74 - Condições de fronteira impostas a) juntas adesivas e b) juntas híbridas

Para as juntas soldadas foi criado um plano rígido sobre o ponto de soldadura e ao longo de todo o comprimento da junta (Figura 75) adicionando restrição ao deslocamento horizontal e vertical, sendo que se mantiveram as restantes condições fronteira utilizadas nas outras variantes.

Para a modelação das juntas foram considerados elementos sólidos de 8 nós para diminuição de esforço computacional (C3D8 do ABAQUS®).

As malhas foram construídas com maior refinamento nas extremidades das juntas na direção da camada do adesivo.

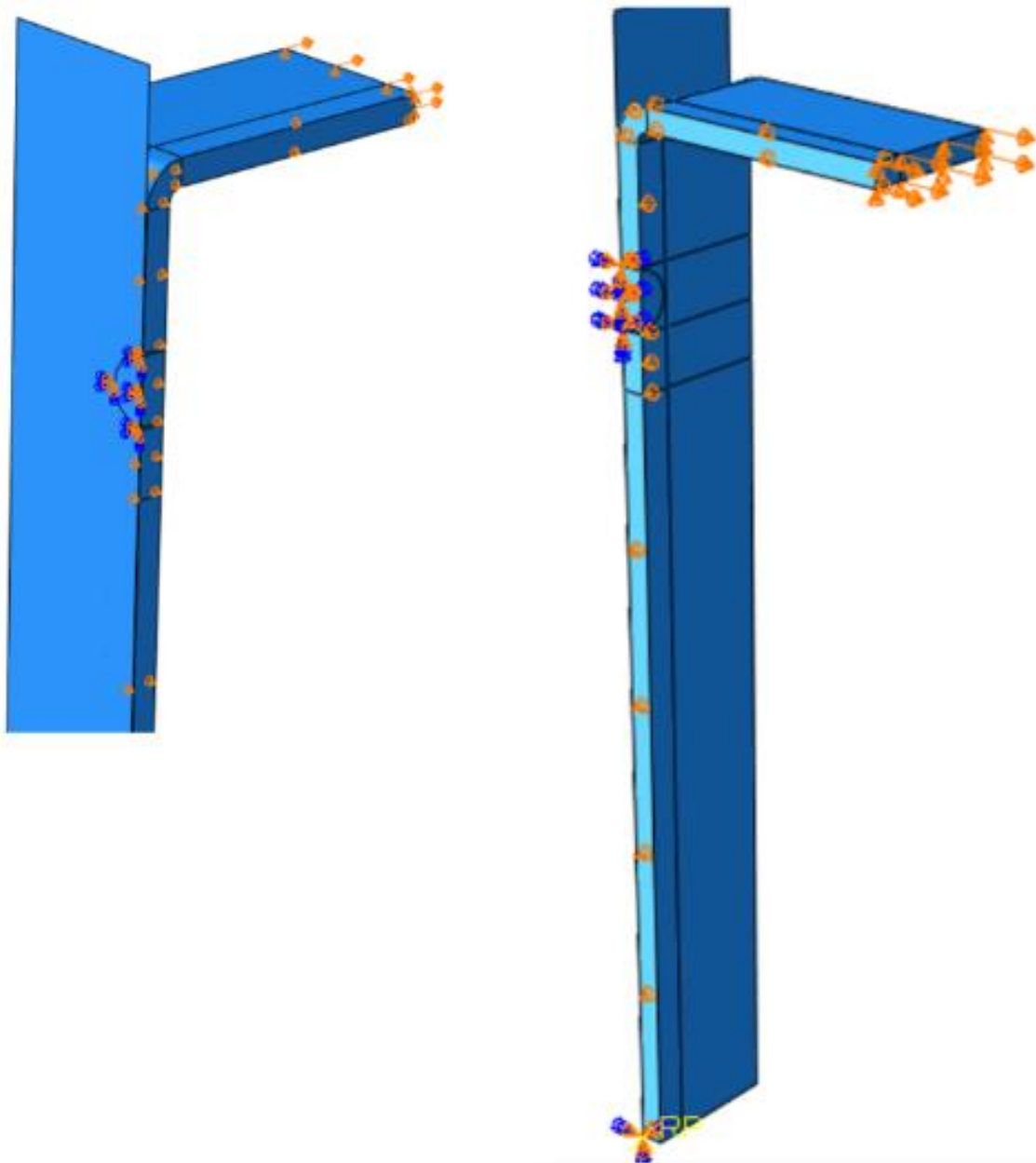


Figura 75 - Condições fronteira impostas nas juntas soldadas

A Tabela 19 apresenta o refinamento da malha para a condição 1, ou seja, para as juntas adesivas. Para a análise de resistência foi efetuado um maior refinamento na camada do adesivo e na zona do aderente na direção do adesivo, como se pode verificar pelo sentido de *bias* (grau de gradação de refinamento da malha) ilustrado na Figura 76. Assim é possível garantir um maior refinamento na proximidade da camada do adesivo porque existem maior concentração de tensões nesse local.

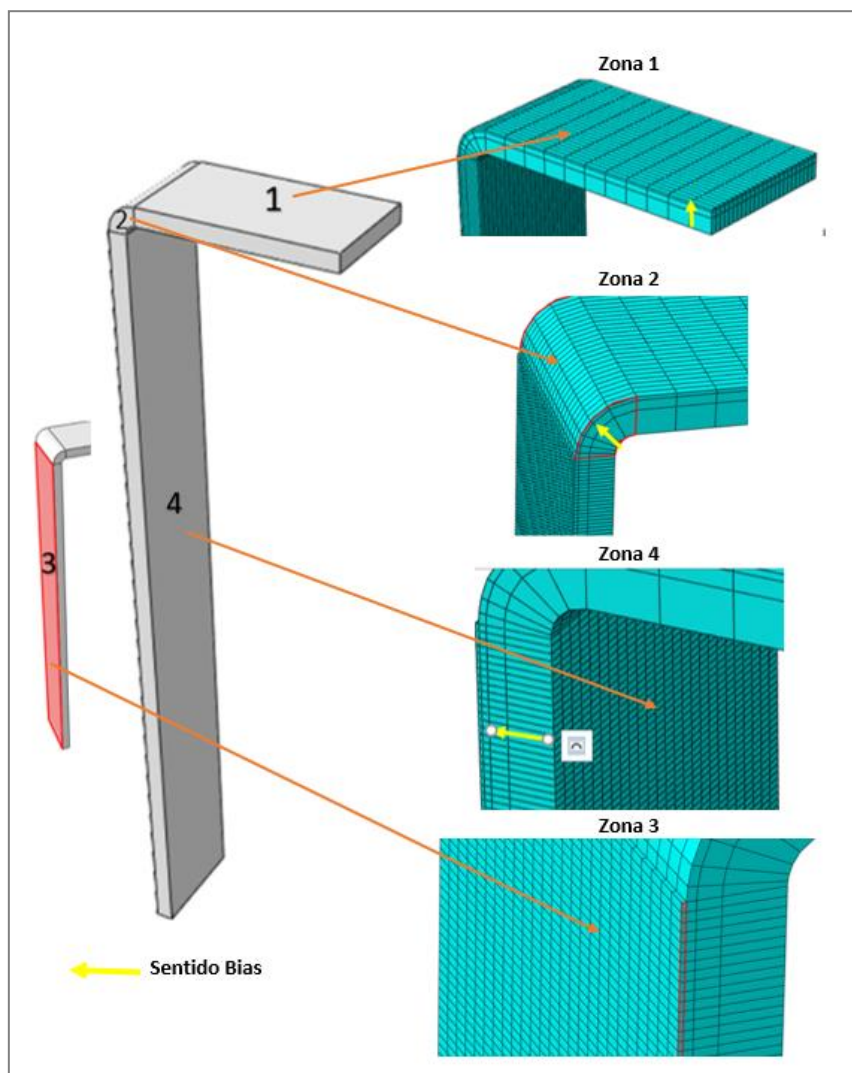


Figura 76 - Detalhes da malha de MEF para análise de resistência das juntas adesivas

Tabela 19 - Dimensões das zonas de malha, tipo de malha, refinamento, e distribuição na análise da resistência das juntas adesivas

Zona	Comprimento (mm)	Largura (m)	Espessura (mm)	Bias na espessura	Tipo de Malha	Nº de elementos	Nós
1	22	12,5	2	3	estruturada	825	1248
2	----	12,5	2	3	estruturada	450	728
3 (adesivo)	90	12,5	2	3	estruturada	33750	46904
4 (aderente)	90	12,5	2	3	estruturada	11250	23452

A Figura 77 apresenta o refinamento da malha para a condição 2, ou seja, para as juntas híbridas. A zona mais refinada da malha é no adesivo e na superfície de contacto entre o adesivo e aderente, tendo esta um comprimento de aresta de 0,2 mm, e também no ponto de soldadura, que neste caso tem um comprimento de aresta de 0,1 mm.

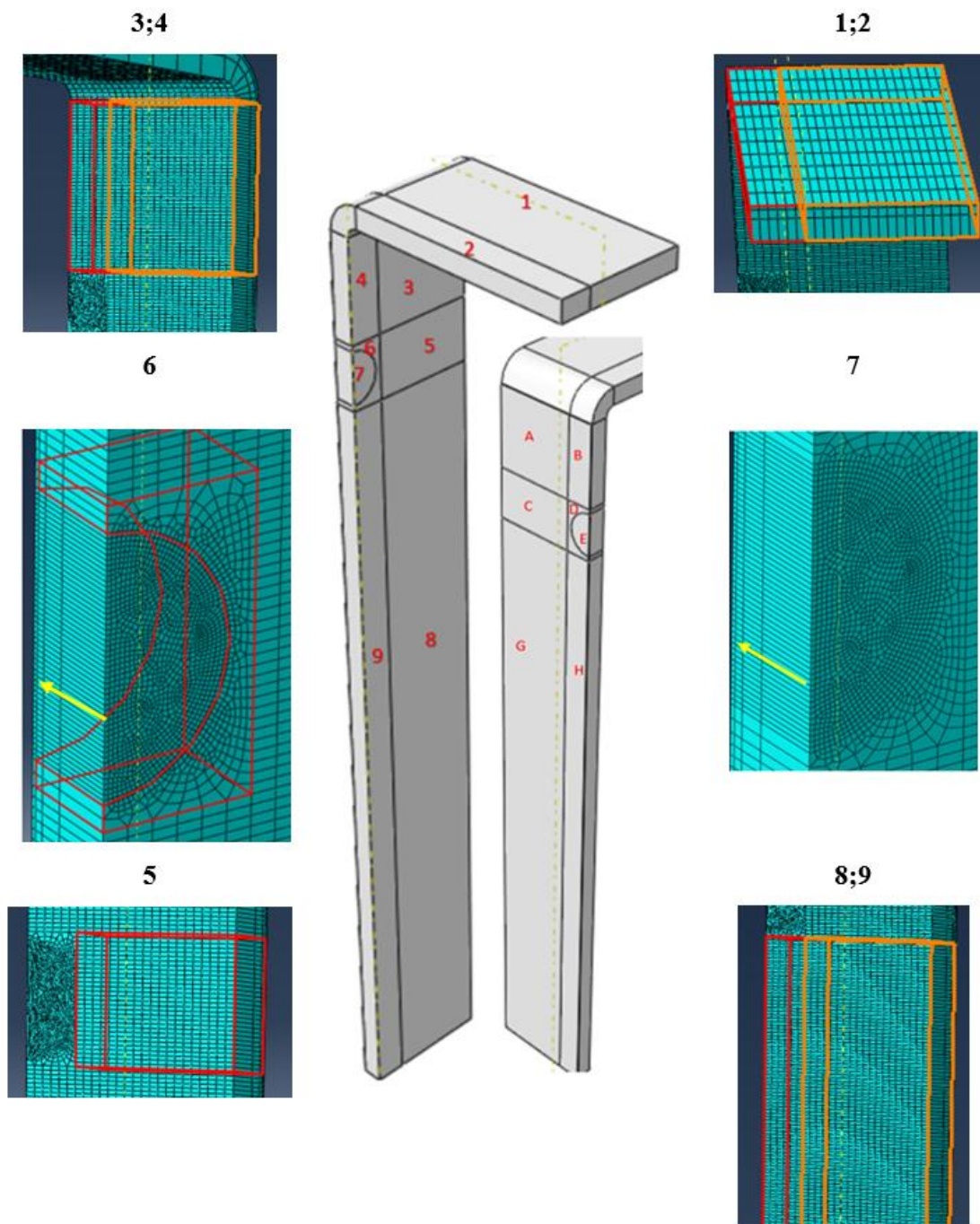


Figura 77 - Detalhes da malha de MEF para análise de resistência das juntas híbridas

A Tabela 20 apresenta as dimensões da malha das diferentes zonas da junta híbrida.

Tabela 20 - Dimensões das zonas de malha, tipo de malha, refinamento, e distribuição na análise da resistência das juntas híbridas

<b>Zona</b>	<b>Comprimento (mm)</b>	<b>Largura (m)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Bias na espessura</b>	<b>Tipo de Malha</b>	<b>Nº de elementos</b>	<b>Nós</b>
<b>1</b>	22	9,5	2	3	estruturada	627	960
<b>2</b>	22	3	2	3	estruturada	198	336
<b>3</b>	9.5	9,5	2	3	estruturada	2736	3920
<b>4</b>	9.5	3	2	3	estruturada	1372	864
<b>5</b>	6	9,5	2	3	estruturada	1710	2480
<b>6</b>	irregular	irregular	2	3	Não estruturada	1038	1640
<b>7</b>	irregular	irregular	2	3	Não estruturada	3744	5256
<b>8</b>	74,5	9,5	2	3	Estruturada	21261	29920
<b>9</b>	74,5	3	2	3	estruturada	6714	10472
<b>A</b>	9,5	9,5	0,1	1	estruturada	912	1960
<b>B</b>	9,5	3	0,1	1	estruturada	686	288
<b>C</b>	6	9,5	0,1	1	Estruturada	570	1240
<b>D</b>	irregular	irregular	0,1	1	Não estruturada	346	820
<b>E</b>	irregular	irregular	0,1	1	Não estruturada	1248	2628
<b>G</b>	74,5	9,5	0,1	1	estruturada	7087	14960
<b>H</b>	74,5	3	0,1	1	estruturada	2238	5236

### 3.2.2 Modelo de dano

A expressão fundamental do vetor de deslocamentos  $\mathbf{u}$ , incluindo o enriquecimento dos deslocamentos, é dada por [85]:

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

$N_i(\mathbf{x})$  e  $\mathbf{u}_i$  estão relacionados com a componente convencional de EF, e correspondem pela ordem respectiva às funções de interpolação e ao vetor de deslocamentos nodais. O segundo termo entre parêntesis retos,  $H(\mathbf{x}) \mathbf{a}_i$ , apenas está ativo para os nós nos quais alguma função de forma é cortada pela fenda e pode ser expresso pelo produto do vetor dos graus de liberdade nodais enriquecidos incluindo os nós mencionados,  $\mathbf{a}_i$ , com as funções de forma descontínuas associadas,  $H(\mathbf{x})$ , nas superfícies da fenda. O método é baseado no estabelecimento de nós fantasmas, que subdividem os elementos intercetados 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 completamente fixos aos nós reais até à iniciação do dano. Após o elemento ter sido intercetado 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 78). Quando um elemento fratura, cada um dos dois subelementos vai ser formado pelos nós reais (aqueles correspondentes à parte fraturada) 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 fraturado separa de acordo com uma lei de dano até à rotura. Neste ponto os nós reais e fantasmas ficam livres de se mover sem restrições, simulando assim o crescimento do dano.

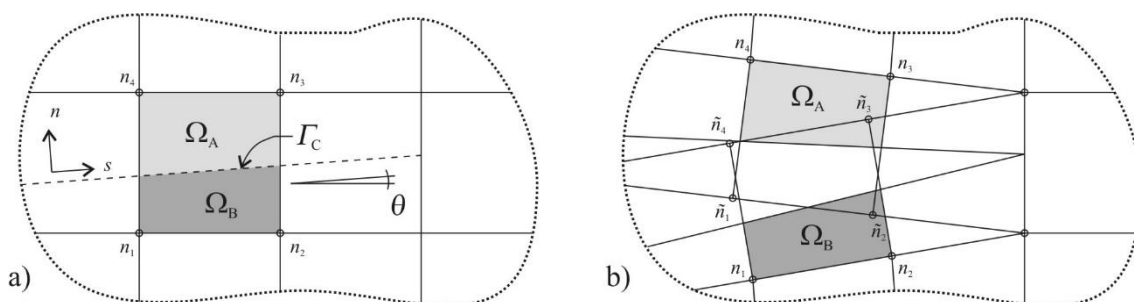


Figura 78 – Propagação do dano no MEFX usando o conceito de nós fantasmas antes (a) e depois (b) da repartição de elementos fraturados em subelementos [86]

O MEFX considera que os materiais assumem um comportamento linear elástico.

Existem dois tipos distintos de modelação de dano por MEFE:

1. Abordagem por segmentos coesivos- utiliza as leis tração-separação, seguindo um comportamento baseado num comportamento coesivo e as propriedades de dano são parte integral das propriedades do material.
2. Mecânica da fratura linear elástica (MFLE)- utiliza a técnica de fenda virtual (VCCT), as propriedades de dano são especificadas através de uma propriedade de interação atribuída ao MEFE.

Neste caso de estudo foi utilizada uma abordagem por segmentos coesivos. No software Abaqus®, no módulo MEFE, existem 3 critérios de iniciação de dano baseados na tensão e 3 critérios baseados na deformação.

### 3.2.2.1 Determinação das propriedades de dano

Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas (MAXPS) ou das deformações principais máximas (MAXPE), enquanto as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais. A iniciação do dano é assumida por um critério da mecânica dos meios contínuos, calculado a partir do estado de tensão ou de deformação em cada ponto de integração dos EF. A iniciação do dano pode ser avaliada por diferentes critérios. Os critérios MAXPS e MAXPE baseiam-se nas seguintes funções de dano, respetivamente [87]:

$$f = \left\langle \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{max}^0} \right\rangle \quad e \quad f = \left\langle \frac{\epsilon_{max}}{\epsilon_{max}^0} \right\rangle, \quad (2)$$

onde  $\sigma_{max}$  é a tensão principal máxima atual num dado ponto de integração e  $\sigma_{max}^0$  é a resistência de um material à tração. A interpretação dos parêntesis de Macaulay 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, por esta ordem, por [87]:

$$f = \max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0} \right\} \quad e \quad f = \max \left\{ \frac{\langle \epsilon_n \rangle}{\epsilon_n^0}, \frac{\epsilon_s}{\epsilon_s^0} \right\}, \quad (3)$$

onde  $t_n$  e  $t_s$  são as componentes de tensão normal e ao corte da superfície fraturada, e  $t_n^0$  e  $t_s^0$  são os respetivos valores limite. Os parâmetros referentes ao critério MAXE têm o mesmo significado, onde  $\epsilon_n$  e  $\epsilon_s$  são as componentes de deformação normal e ao corte, e  $\epsilon_n^0$  e  $\epsilon_s^0$  são os devidos valores limites. Outros dois critérios de elevada importância são o critério quadrático de tensão (QUADS) e o critério quadrático de deformação (QUADE).

Os critérios são dados, respetivamente, pelas seguintes funções [87]:

$$f = \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 \quad e \quad f = \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\}^2. \quad (4)$$

Todos os critérios referidos são satisfeitos quando o valor de  $f$  atingir a unidade. O crescimento do dano é baseado na incorporação de funções de enriquecimento na formulação convencional de EF, e que permitem modelar o salto dos deslocamentos que existe entre as faces da fenda durante a propagação do dano.

### 3.2.3 Análise de tensões na junta

A análise de tensões das juntas adesivas e híbridas fundamenta-se no estudo da distribuição de tensões de arrancamento ( $\sigma_y$ ) e de corte ( $\tau_{xy}$ ) ao longo da camada de adesivo durante a parte elástica do carregamento, e é realizada no plano médio da espessura do adesivo, que se considera representativo do estado de tensão no adesivo, embora se saiba que existem concentrações de tensões próximas da interface com os aderentes.

Estas distribuições de tensões exibem picos nas extremidades da sobreposição, que são responsáveis pelo início do dano prematuro nas juntas, pelo que e de extrema importância o seu estudo para a explicação dos resultados de resistência obtidos.

As curvas referentes às tensões estão normalizadas relativamente ao comprimento de junta ( $x/L$ ). Considera-se apenas  $0 \leq x/L \leq 0,2$ , uma vez que na restante porção do adesivo, e no início do carregamento, as tensões são praticamente nulas. Os valores de  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  estão também normalizados relativamente à tensão de arrancamento média ( $\sigma_{y \text{ avg}}$ ) para cada adesivo e para cada configuração de junta (adesiva ou híbrida). Assim os gráficos das figuras atrás referidas representam a distribuição da magnitude de tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  relativamente a  $\sigma_{y \text{ avg}}$ .

#### 3.2.3.1 Tensões de arrancamento

##### 3.2.3.1.1 Juntas adesivas

Na Figura 79 apresentam-se, para as 3 configurações de juntas adesivas, as distribuições de tensões  $\sigma_y$ , em função do comprimento de sobreposição de junta  $L$ . Na análise da Figura 79 pode-se observar que na extremidade do adesivo onde se inicia a rotura da junta ( $x/L=0$ ) existe uma concentração acentuada de tensões. Neste local, a junta adesiva com Araldite® AV138 é aquela que apresenta tensões  $\sigma_y$  mais elevadas, com uma magnitude relativa 106,35 vezes superior a  $\sigma_{y \text{ avg}}$ . Nesta zona as juntas adesivas com Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 apresentam, respetivamente, uma tensão  $\sigma_y$  mais elevada em 81,57 e 54,55 vezes que a tensão  $\sigma_{y \text{ avg}}$  observada ao longo da camada de adesivo. Imediatamente a seguir a esta zona observa-se um ligeiro aumento das tensões

$\sigma_y$  até atingir os picos máximos de tensões  $\sigma_y$ , como se pode verificar na Figura 79. Assim, nesta zona a junta colada com Araldite® AV138 continua a apresentar os valores de  $\sigma_y$  mais elevados, com uma tensão  $\sigma_y$  133,16 vezes maior do que a  $\sigma_{y\text{ avg}}$ , seguindo-se o Araldite® 2015 com 95,68 e o Sikaforce® 7752 com 60,25. Após os picos de tensão, as tensões  $\sigma_y$  decrescem substancialmente com o aumento da distância à extremidade da camada de adesivo. A taxa de decréscimo mais elevada verifica-se no Araldite® AV138, sendo que a partir  $x/L$  de 0,025 entra-se numa zona da camada de adesivo em que este apresenta tensões  $\sigma_y$  inferiores aos restantes. A seguir desta zona de decréscimo de tensões  $\sigma_y$ , observa-se uma zona de tensões compressivas. De facto, a força aplicada nos aderentes gera em cada aderente um momento flector de sentido contrário. Assim, cada aderente opõe-se à rotação do outro. Como consequência desta oposição da rotação, a partir de uma dada distância da extremidade, surgem tensões compressivas na camada de adesivo. Constata-se que o Araldite® AV138 começa a apresentar tensões  $\sigma_y$  negativas (tensões de compressão) numa zona mais próxima da extremidade do adesivo relativamente aos restantes adesivos.

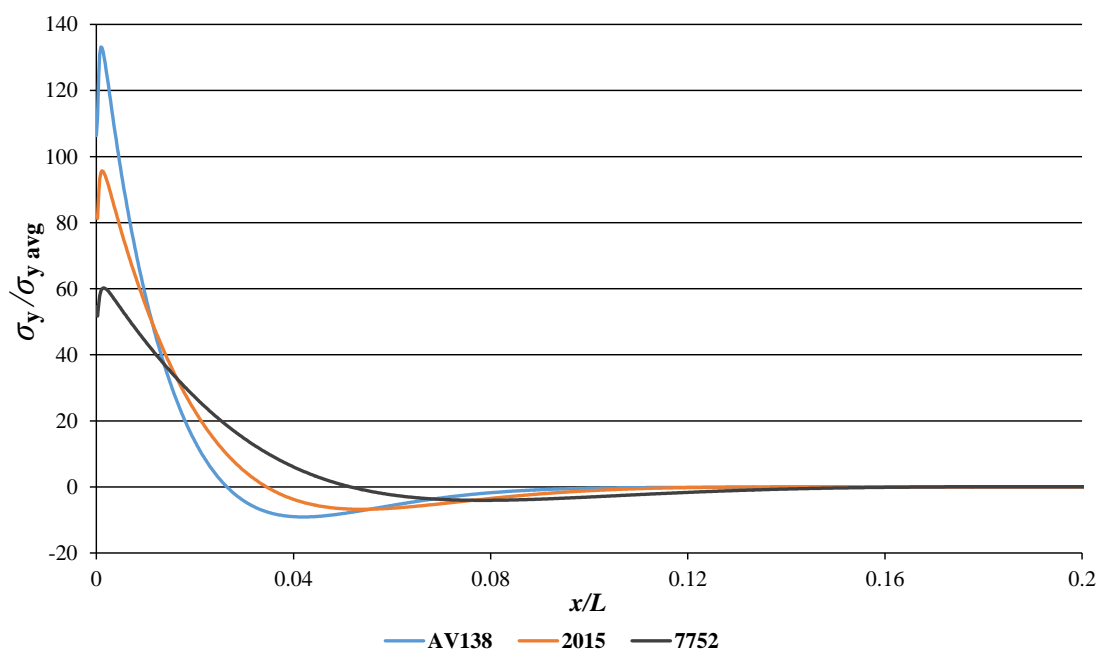


Figura 79 – Distribuição de tensões  $\sigma_y$  a meio da espessura do adesivo em função de  $x/L$  para as juntas adesivas.

O adesivo Sikaforce® 7752 é aquele onde as tensões compressivas surgem a uma maior distância da extremidade do adesivo. Quanto à magnitude das tensões compressivas, o Araldite® AV138 é aquele que apresenta o maior valor, sendo de 9,09 vezes o valor de  $\sigma_{y\text{ avg}}$ , seguindo-se o Araldite® 2015 com 6,76 e o Sikaforce® 7752 com 4,05. Após atingir o seu máximo as tensões compressivas originadas na camada de adesivo vão diminuindo suavemente de intensidade até à extremidade oposta do adesivo, atingindo o valor zero para  $x/L=1$ . O comportamento das tensões descrito atrás pode ser explicado pela rigidez

dos adesivos. Assim, sendo o Araldite® AV138 o adesivo mais rígido, este tem menor capacidade de distribuir as tensões ao longo do adesivo e, como tal, apresenta as maiores tensões  $\sigma_y$ . Pelo mesmo motivo, apresenta também as maiores tensões compressivas (benéficas à integridade do adesivo). Por sua vez, o Sikaforce® 7752 é aquele que dos três adesivos em estudo apresenta maior flexibilidade, originando menores tensões  $\sigma_y$  em ambos os picos de tração e compressão e, como tal, uma distribuição de tensões mais uniforme. O adesivo Araldite® 2015 apresenta um comportamento intermédio entre estes dois. Em resumo, pode-se afirmar que o adesivo Sikaforce® 7752, devido à sua menor rigidez, é aquele que permite uma melhor distribuição de carga.

### 3.2.3.1.2 Juntas híbridas

A Figura 80 apresenta a distribuição das tensões  $\sigma_y$  das juntas híbridas e soldada. O eixo  $y$  encontra-se truncado de tal forma que não se observam os picos para a junta soldada, para permitir uma melhor visualização das curvas. Pode-se verificar que a junta soldada apresenta na periferia do ponto de soldadura dois picos de tensões  $\sigma_y$  muito elevados. Na extremidade onde se inicia a rotura do ponto de soldadura (mais próxima de  $x/L=0$ ) estes picos são 736,63 vezes maiores que a tensão  $\sigma_{y \text{ avg}}$ . No centro do ponto de soldadura as tensões são compressivas e aproximadamente constantes e, à medida que se avança para a extremidade oposta, gera-se um pico compressivo que atinge 565,50 vezes o valor de  $\sigma_{y \text{ avg}}$ .

No que concerne às juntas híbridas, estas apresentam uma distribuição de tensões muito semelhante às respetivas juntas adesivas entre a extremidade de sobreposição ( $x/L=0$ ) até à periferia do ponto de soldadura. Assim, estas juntas apresentam também na extremidade de sobreposição ( $x/L=0$ ) uma concentração de tensões imediatamente seguida de um pico de tensões  $\sigma_y$ . A junta híbrida com o Araldite® AV138 é aquela que apresenta tensões  $\sigma_y$  mais elevadas em  $x/L=0$ , de magnitude 107,73 vezes maior que a tensão  $\sigma_{y \text{ avg}}$ , seguindo-se as juntas híbridas com o Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7752, com valores de 82,15 e 57,97, respetivamente. Os valores de pico existentes na proximidade de  $x/L=0$ , pela mesma ordem, são de 132,38, 95,31 e 64,42. Comparando estes valores com os observados para as juntas adesivas, observa-se que são praticamente idênticos. Após estes picos de tensão  $\sigma_y$ , as tensões diminuem ao longo da camada de adesivo até valores próximos de zero, sendo que na periferia no ponto de soldadura voltam a formar-se novamente picos de tensão, mas agora muito inferiores aos valores de pico de  $\sigma_y$  na proximidade de  $x/L=0$ . Comparativamente à junta soldada, as juntas híbridas apresentam picos de tensões  $\sigma_y$  na periferia do ponto de soldadura de magnitude bastante inferior. Nesta zona a junta soldada apresenta também tensões compressivas no centro do ponto de soldadura, ao contrário do que se observa para as juntas híbridas. De facto, as juntas híbridas apresentam tensões praticamente nulas sobre toda esta região. Assim, a Figura 80 evidencia que a introdução de uma camada de adesivo a uma junta soldada diminui fortemente as tensões  $\sigma_y$  na periferia do ponto

de soldadura da junta soldada. Este efeito reveste-se de particular importância, pois é na periferia do ponto de soldadura onde se inicia a rotura das juntas soldadas. A comparação das curvas referentes aos três adesivos mostra que a junta híbrida com o adesivo Araldite® AV138 é aquela que apresenta picos de tensão  $\sigma_y$  mais baixos na periferia do ponto de soldadura (magnitude normalizada de 32,82), seguida da junta híbrida com o adesivo Sikaforce® 7752 (magnitude normalizada de 35,35), e finalmente da junta híbrida com o adesivo Araldite® 2015 (magnitude normalizada de 55,84). No caso do adesivo Sikaforce® 7752, imediatamente a seguir ao pico de tração constata-se a existência de um pico de compressão com magnitude relativa de 39,57. Este comportamento é justificado pela menor rigidez deste adesivo.

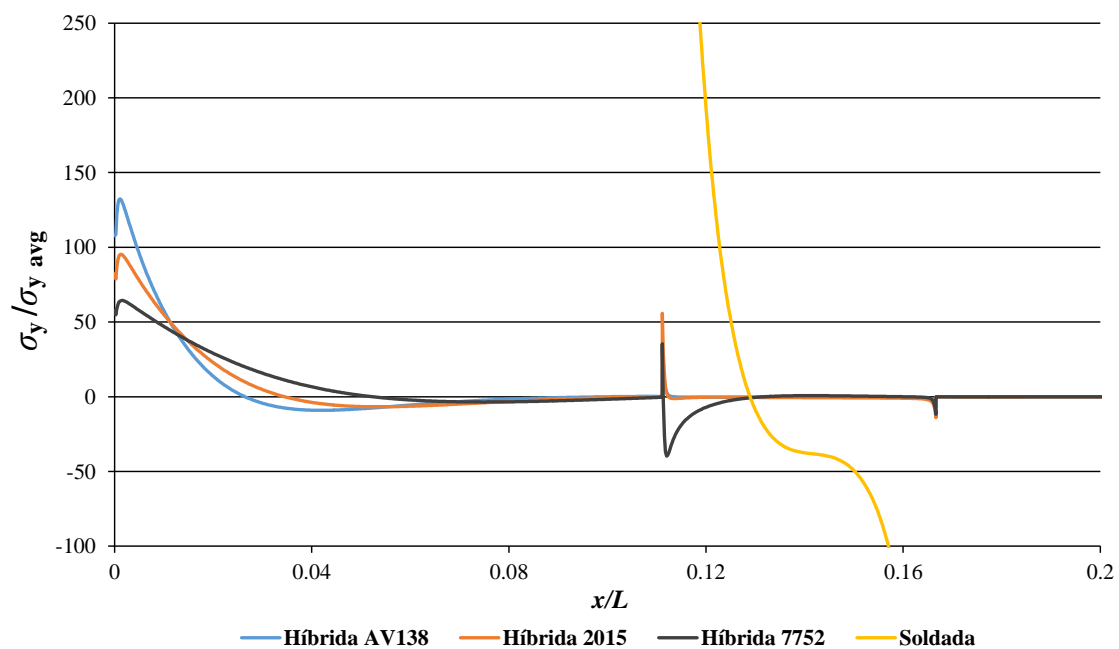


Figura 80 – Distribuição de tensões  $\sigma_y$  a meio da espessura do adesivo em função de  $x/L$  para as juntas híbridas e soldadas.

### 3.2.3.2 Tensões de corte

#### 3.2.3.2.1 Juntas adesivas

As distribuições de tensões  $\tau_{xy}$  das juntas adesivas são apresentadas na Figura 81. Observa-se um comportamento semelhante às tensões  $\sigma_y$ . De facto, na extremidade da camada de adesivo ( $x/L=0$ ) podem-se observar tensões  $\tau_{xy}$  com magnitude significativa. No entanto, os picos máximos de tensões  $\tau_{xy}$  na camada de adesivo ocorrem ligeiramente a seguir. Após esta zona, volta-se a observar um pequeno pico, mas de sentido oposto, o que significa que os planos de material tendem a deslizar em sentido contrário. Após a ocorrência destes picos de tensão, as tensões  $\tau_{xy}$  diminuem suavemente, anulando-se na extremidade oposta da camada de adesivo ( $x/L=1$ ). Apesar

da distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  ser semelhante à das tensões  $\sigma_y$ , a magnitude normalizada é bastante inferior. De facto, devido ao carregamento tipicamente de arrancamento, estas tensões são consideradas residuais e apenas existem devido à deformação de abertura dos aderentes na proximidade de  $x/L=0$ , que adiciona deformação de corte no adesivo. Esta deformação provoca uma diminuição da perpendicularidade da força aplicada em relação à camada de adesivo, que origina a existência desta componente de tensão. Devido aos valores substancialmente inferiores relativamente às tensões  $\sigma_y$ , as tensões  $\tau_{xy}$  podem ser desconsideradas para efeitos de análise das juntas. A junta que apresenta o maior pico de tensões é a junta adesiva com o Araldite® AV138, com uma tensão  $\tau_{xy}$  25,33 vezes maior que a tensão  $\sigma_{y \text{ avg}}$ , seguindo-se a junta adesiva com o Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7752 com uma tensão  $\tau_{xy}$  14,25 e 6,37 vezes superior, respetivamente. Conclui-se assim que as juntas adesivas com Sikaforce® 7752 são as que apresentam uma distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  mais uniforme. Tal como observado para as tensões  $\sigma_y$ , esta diferença está intimamente ligada à rigidez, neste caso ao corte, dos adesivos.

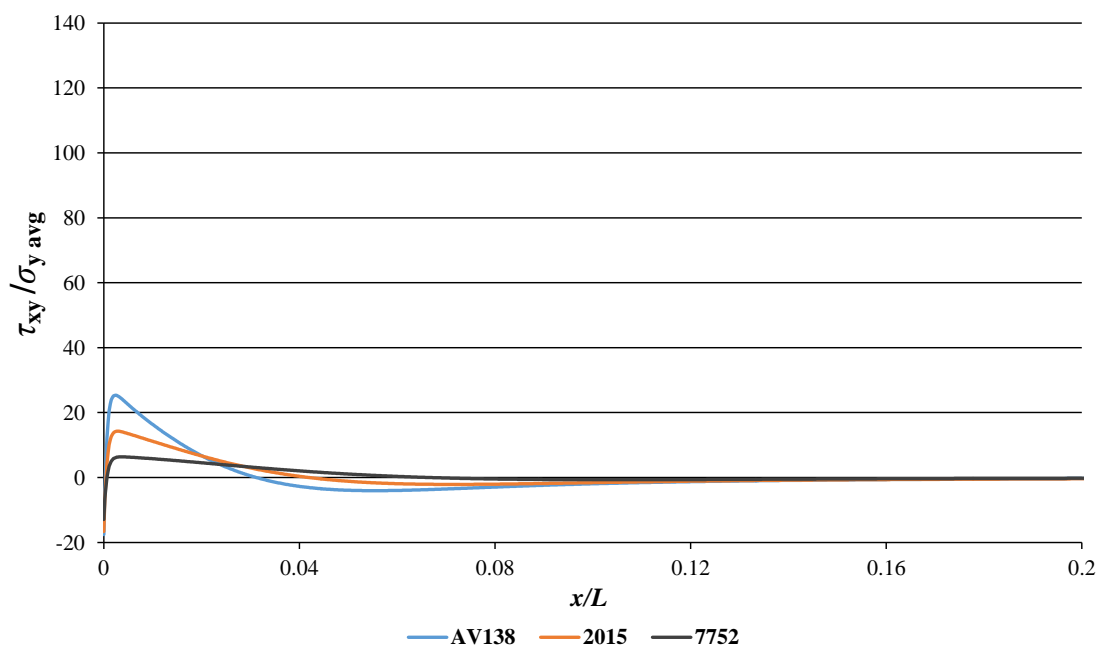


Figura 81 – Distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  a meio das juntas adesivas.

### 3.2.3.2.2 Juntas híbridas

A Figura 82 apresenta a distribuição das tensões  $\tau_{xy}$  das juntas híbridas e soldada. A curva da distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  da junta soldada permite constatar que é nas extremidades do ponto de soldadura onde ocorrem as maiores tensões  $\tau_{xy}$  (atingindo um valor normalizado de 214,35 vezes a tensão  $\sigma_{y \text{ avg}}$  na extremidade do ponto de soldadura mais próxima de  $x/L=0$ ). Na extremidade oposta do ponto de soldadura, volta novamente a ocorrer um pico de tensões, cujo valor normalizado mais elevado é de 92,58. As tensões

$\tau_{xy}$  decrescem desde as extremidades para o interior do ponto de soldadura, zona em que o corte se dá em sentido oposto. A Figura 82 permite observar que a introdução da camada de adesivo produz uma forte redução das tensões de corte no ponto de soldadura, assim como uma distribuição de tensões mais uniforme. As tensões  $\tau_{xy}$  das juntas híbridas apresentam entre  $x/L=0$  e o ponto de soldadura um comportamento muito similar às juntas adesivas, tanto na distribuição como na sua magnitude. Na zona do ponto de soldadura das juntas híbridas as tensões  $\tau_{xy}$  são praticamente nulas, exceto nas extremidades do ponto de soldadura. Mais uma vez o pico de tensões mais elevado ocorre na extremidade onde se inicia a rotura do ponto de soldadura.

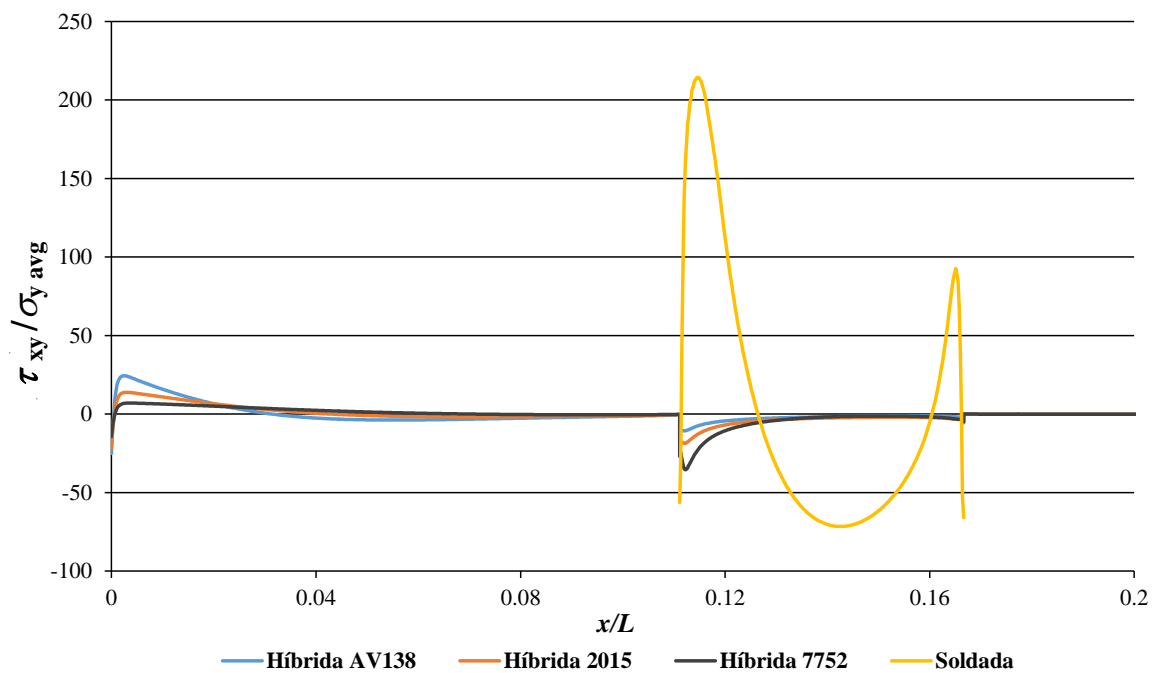


Figura 82 – Distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  a meio da espessura do adesivo em função de  $x/L$  para as juntas híbridas e soldadas.

### 3.2.4 Previsão da resistência

Neste capítulo são apresentados os resultados da modelação numérica por MEFE para a previsão da resistência das juntas adesivas, soldadas e híbridas, tendo como objetivo avaliar a capacidade do MEFE em prever a resistência.

De forma a avaliar a previsão da resistência das juntas foi realizado um estudo do efeito do critério de iniciação, que consiste na aplicação dos seis critérios de dano do MEFE, comparando estes com os resultados obtidos experimentalmente. Foi também realizado um estudo do efeito da lei de propagação, que tem como objetivo comparar a lei de propagação triangular, utilizada no estudo do efeito do critério de iniciação, com a lei de propagação exponencial, comparando estes com os resultados obtidos experimentalmente.

### 3.2.4.1 Estudo do critério de iniciação

#### 3.2.4.1.1 Juntas adesivas e soldadas

A Figura 83 mostra a comparação entre os valores de  $P_m$  obtidos experimentalmente e as respetivas previsões numéricas ( $P_{m\acute{a}x}$ ) dos diferentes critérios de dano do MEFE para as juntas soldadas.

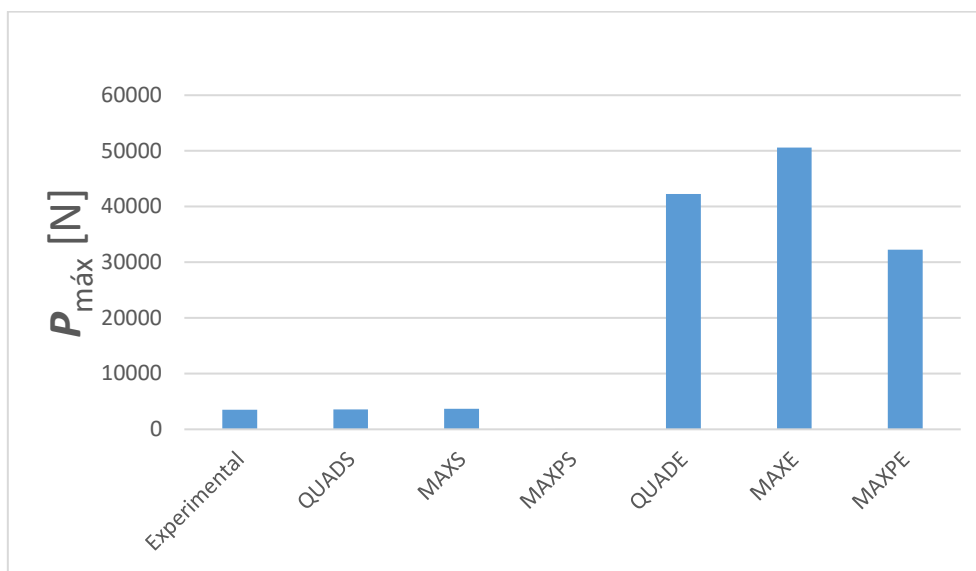


Figura 83 - Valores experimentais médios de  $P_m$  e valores de  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos numericamente das juntas soldadas

Os resultados obtidos indicam que o comportamento é semelhante às previsões obtidas para as juntas adesivas embora com maiores valores de  $P_{m\acute{a}x}$ , devido à resistência do ponto de soldadura ao corte. Os critérios de dano mais adequados foram o QUADS e MAXS. O QUADS tem uma variação percentual de 2,67%, e para o critério MAXS a variação percentual foi de 4,93%. O critério mais inadequado é o MAXPS, apresentando uma variação percentual máxima de -97.7%. Devido ao seu valor ser significativamente baixo, este não é visível na Figura 83, sendo esta diferença devido à modelação considerar que a força máxima é considerada com a primeira fenda, o que não é a realidade num caso prático.

A previsão segundo os três critérios de dano baseados nas deformações (QUADE, MAXE e MAXPE) apresentou valores relativamente aproximados entre eles, como se observar na Figura 83, mas bastante elevados relativamente aos valores de  $P_m$  experimentais. Tendo como base os resultados experimentais, registou-se uma variação percentual máxima de 1106,6%, 1344,8% e 821,5% para os critérios QUADE, MAXE e MAXPE, respetivamente.

A Figura 84 mostra a comparação entre os valores de  $P_m$  obtidos experimentalmente e as respetivas previsões numéricas dos diferentes critérios de dano do MEFE para o adesivo Araldite® AV138.

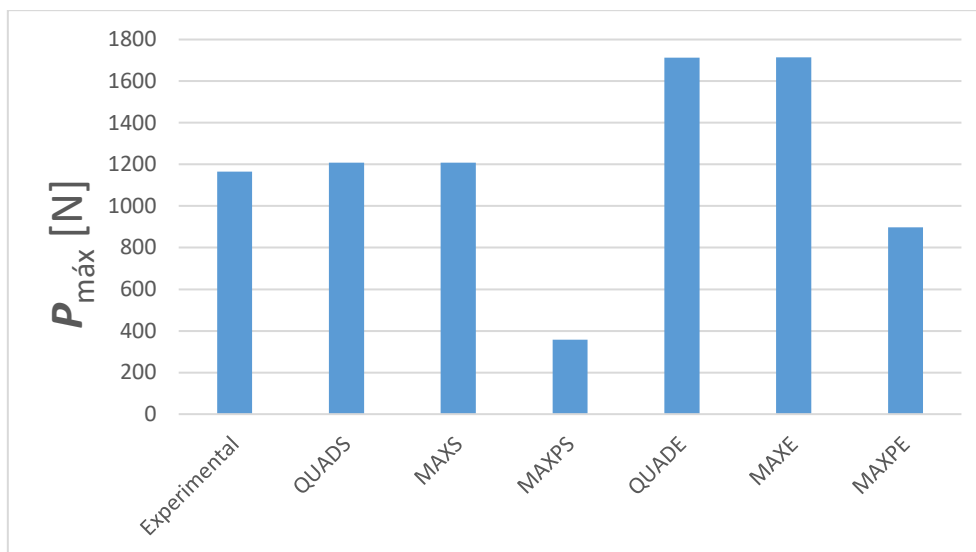


Figura 84 - Valores experimentais médios de  $P_m$  e valores de  $P_{máx}$  obtidos numericamente com o adesivo Araldite® AV138

Os resultados de QUADS e MAXS são novamente os mais aproximados comparativamente aos valores obtidos experimentalmente, apresentando valores ligeiramente superiores aos valores experimentais. Tendo como referência os valores obtidos experimentalmente, o critério QUADS apresenta uma variação percentual de 3,79%, e para o critério MAXS a variação percentual foi de 3,82%. O critério MAXPS apresentou uma elevada variação percentual, de -69,27%, demonstrando assim ser um critério bastante desajustado.

Para os critérios baseados nas tensões QUADE, MAXE e MAXPE, os resultados obtidos numericamente são muito superiores face ao valor  $P_m$  experimental. Os valores de variação percentual máxima foram de 47,08% para QUADE, 47,15% para MAXE e -22,95% para MAXPE.

A Figura 85 apresenta um gráfico comparativo entre os valores experimentais médios  $P_m$  e os valores de  $P_{máx}$  obtidos numericamente para as juntas que utilizaram o adesivo Araldite® 2015.

Os resultados obtidos numericamente mostraram que os critérios baseados em deformações sobestimaram em larga medida os valores experimentais de  $P_{máx}$ , o que mostra que estes não são adequados na previsão da resistência pelo MEFE. As variações percentuais relativamente aos valores experimentais médios são muito elevadas, 107,6% para o critério QUADE, 107,7% para o critério MAXPE, 56,8% para o critério MAXPE.

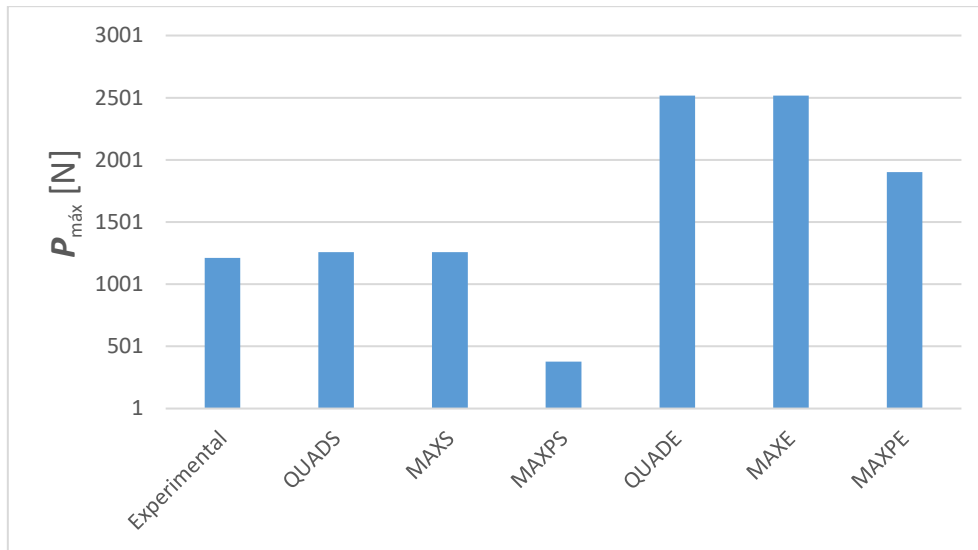


Figura 85 - Valores experimentais médios de  $P_m$  e valores de  $P_{máx}$  obtidos numericamente com o adesivo Araldite® 2015

Por sua vez, os critérios baseados nas tensões QUADS e MAXS apresentam valores de  $P_{máx}$  aproximados dos valores experimentais, apresentando uma diferença percentual de 3,90% e 3,92%, respectivamente. O critério MAXPS apresenta uma diferença de -68,8%.

A Figura 86 mostra a comparação entre os valores de  $P_m$  obtidos experimentalmente e as respectivas previsões numéricas dos diferentes critérios de dano por MEF para o adesivo Sikaforce®7752.

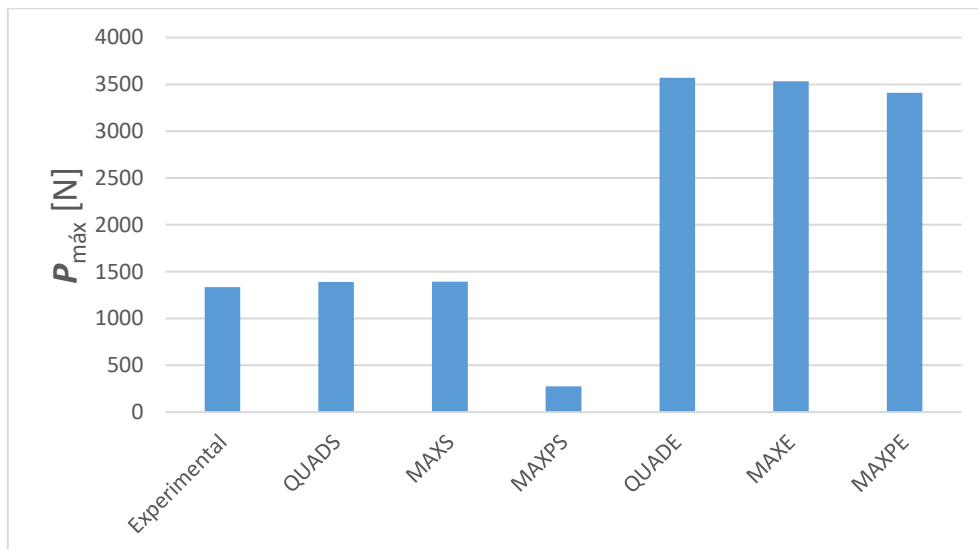


Figura 86 - Valores experimentais médios de  $P_m$  e valores de  $P_{máx}$  obtidos numericamente com o adesivo Sikaforce®7752

Os resultados obtidos indicam que o comportamento é semelhante às previsões obtidas com o adesivo Araldite® 2015, embora com maiores valores de  $P_m$ , o que indica que o

Sikaforce®7752 proporciona juntas adesivas mais resistentes. Tal como no Araldite® 2015 os critérios de dano mais próximos do comportamento experimental foram o QUADS e MAXS. O QUADS tem uma variação percentual de 4,13%, e para o critério MAXS a variação percentual foi de 4,17%. O critério mais inadequado continua a ser o MAXPS apresentando uma variação percentual máxima de -79.43%.

A previsão segundo os três critérios de dano baseados nas deformações (QUADE, MAXE e MAXPE) apresentou valores relativamente aproximados entre eles, como se observar na Figura 86, sendo superiores relativamente aos valores de  $P_m$  experimentais. Tendo como base os resultados experimentais, registou-se uma variação percentual máxima de 167,44%, 164,49% e 155,23% para os critérios QUADE, MAXE e MAXPE, respetivamente.

#### 3.2.4.1.2 Juntas híbridas

As juntas híbridas mostram uma melhoria na resistência relativamente às juntas adesivas, sendo esta resistência atribuída à transferência de esforços maior por corte na zona do ponto de soldadura devido à rigidez mais elevada comparativamente com o adesivo.

A Figura 87 apresenta a comparação entre os valores de  $P_m$  obtidos experimentalmente e as respetivas previsões numéricas dos diferentes critérios de dano obtidos pelo MEFE para as juntas híbridas com o adesivo Araldite® AV138.

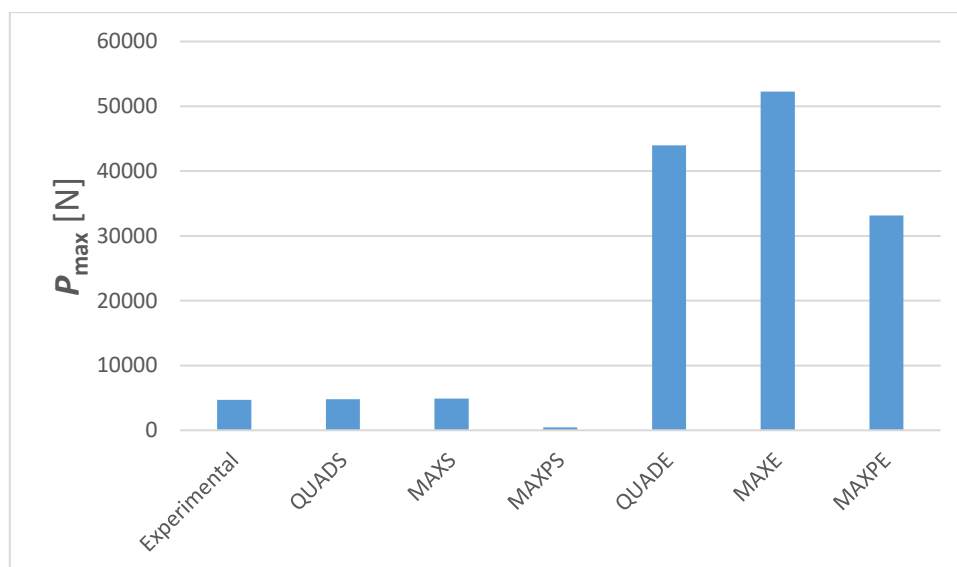


Figura 87 - Valores experimentais médios de  $P_m$  e valores de  $P_{m\max}$  obtidos numericamente com o adesivo Araldite® AV138

A previsão segundo os três critérios baseados nas tensões registou-se uma variação percentual máxima em relação aos valores de  $P_m$  experimental de 2,05%, 3,74% e -90,73% para os critérios QUADS, MAXS e MAXPS, respetivamente.

Os critérios baseados na deformação, QUADE, MAXE e MAXPE, sobrestimaram novamente os valores de  $P_m$  experimental. Os valores de variação percentual máxima foram 833,92%, 1011,11% e 604,44% para os critérios QUADE, MAXE e MAXPE, respetivamente.

A Figura 88 mostra a comparação entre os valores de  $P_m$  obtidos experimentalmente e as respetivas previsões numéricas dos diferentes critérios de dano obtidos pelo MEFE para as juntas híbridas com o adesivo Araldite® 2015.

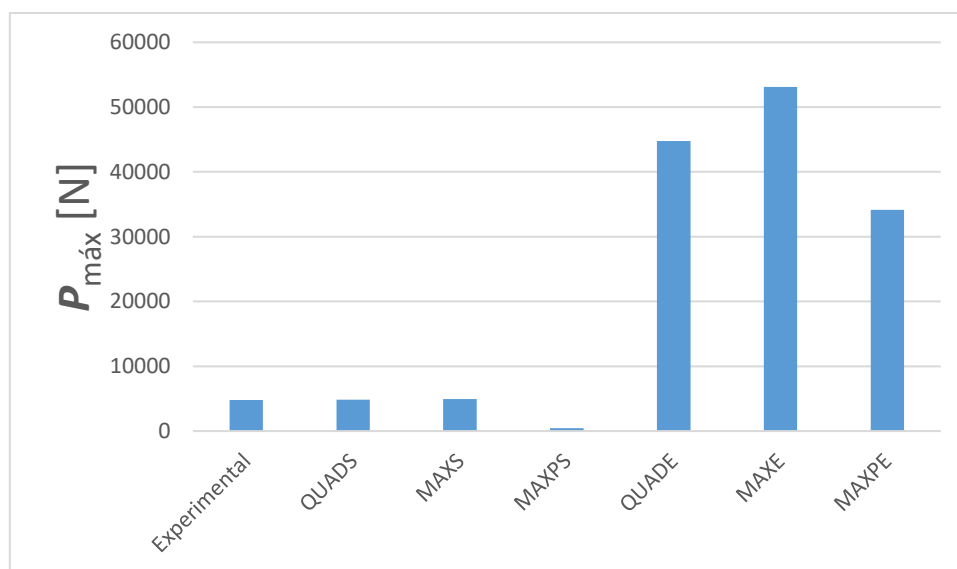


Figura 88 - Valores experimentais médios de  $P_m$  e valores de  $P_{m\max}$  obtidos numericamente com o adesivo Araldite® 2015

Os resultados de QUADS e MAXS continuam a ser os mais aproximados comparativamente aos valores obtidos experimentalmente, apresentando valores ligeiramente superiores aos valores experimentais. Tendo como referência os valores obtidos experimentalmente, o critério QUADS apresenta uma variação percentual de 1,27%, enquanto para o critério MAXS a variação percentual foi de 2,78%. O critério MAXPS apresentou novamente uma elevada variação percentual de -90,5%, continuando assim a ser um critério bastante desajustado.

A previsão segundo os três critérios de dano baseados nas deformações (QUADE, MAXE e MAXPE) apresentou valores relativamente aproximados entre eles, como se observar na Figura 88, mas bastante elevados relativamente aos valores de  $P_m$  experimentais. Tendo como base os resultados experimentais, registou-se uma variação percentual máxima de 832,5%, 1027,4% e 611,4% para os critérios QUADE, MAXE e MAXPE, respetivamente.

A Figura 89 apresenta a comparação entre os valores de  $P_m$  obtidos experimentalmente e as respetivas previsões numéricas dos diferentes critérios de dano do MEFE para as juntas híbridas com o adesivo Sikaforce® 7752.

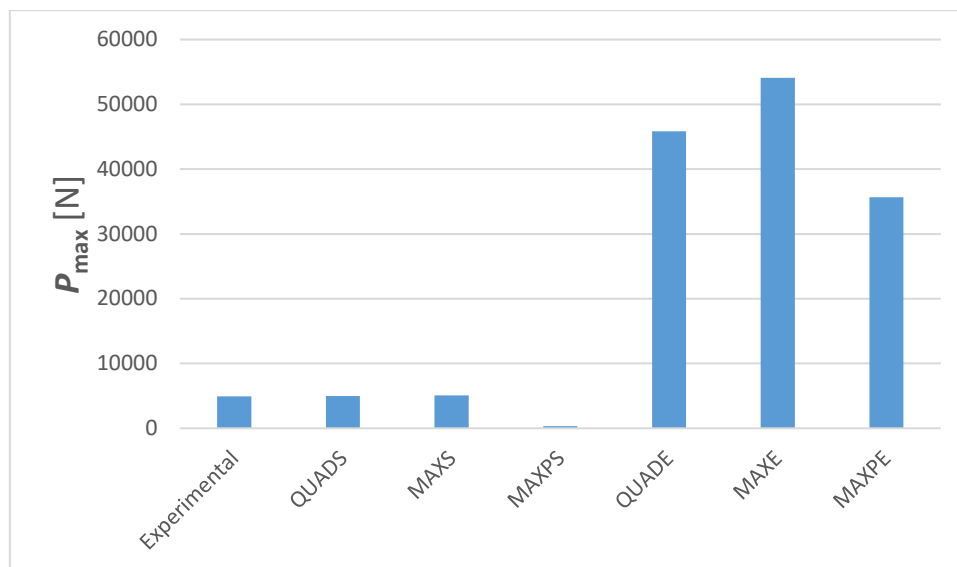


Figura 89 - Valores experimentais médios de  $P_m$  e valores de  $P_{\max}$  obtidos numericamente com o adesivo Sikaforce®7752

Os valores de  $P_{\max}$  dos critérios QUADS e MAXS são os mais aproximados aos valores obtidos experimentalmente e são ligeiramente superiores ao limite máximo do intervalo dos valores experimentais. Para o critério QUADS a variação percentual foi de 1,03%, já para o critério MAXS foi registada a variação percentual de 2,64%. O critério baseado nas tensões, MAXPS, demonstrou uma variação percentual máxima de -92,86%, continuando a ser desajustado. Os critérios baseados na deformação, QUADE, MAXE e MAXPE, sobrestimaram novamente os valores de  $P_m$ . Os valores de variação percentual máxima foram 828,53%, 996,75%, e 622,86% para os critérios QUADE, MAXE e MAXPE, respetivamente.

#### 3.2.4.2 Estudo critério de propagação

No estudo do critério de propagação foi utilizada a variável de dano QUADS uma vez que este critério mostrou ser o mais preciso. Para validação dos resultados, estes valores são também comparados com os valores experimentais.

Na lei de propagação triangular é utilizado o parâmetro *Power* que assume os valores 0,5, 1 e 2 enquanto, aplicando a lei de propagação exponencial, o parâmetro *Power* assume o valor de 1.

##### 3.2.4.2.1 Juntas adesivas e soldadas

A Figura 90 apresenta os valores obtidos numericamente com os diferentes critérios de propagação para as juntas soldadas.

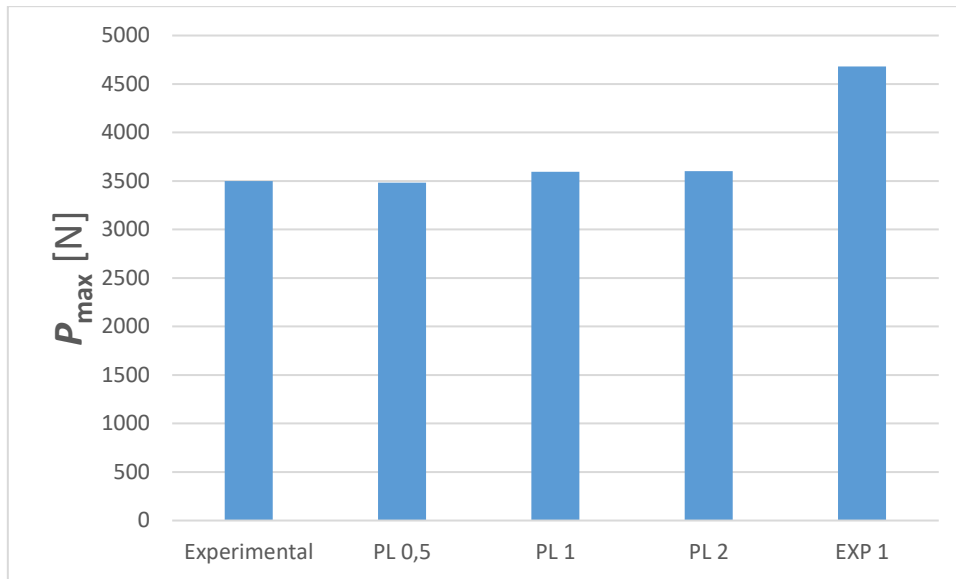


Figura 90 - Variação de  $P_{\max}$  para os diferentes critérios de propagação para juntas soldadas

Os resultados obtidos através lei de propagação triangular indicam que, para o parâmetro 1 (PL1), os resultados são próximos dos obtidos experimentalmente, cuja diferença máxima obtida foi de aproximadamente 2,67%. Para parâmetro 0,5 (PL0,5) a diferença em relação aos resultados experimentais é de -0,45%. Esta diferença é inferior porque, para o parâmetro 0,5, a rotura ocorre prematuramente, dado que esta acontece com valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  mais baixos. Quando se altera o parâmetro para 2 observa-se um comportamento oposto, sendo a diferença percentual de 2,93%. De facto, para esta situação, os valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  na rotura tomam valores superiores, o que resulta na diferença obtida.

Os resultados obtidos através da lei de propagação exponencial ( $Power=1$ ) sobrestimam de forma acentuada os valores de  $P_m$ . Foi registada uma variação percentual máxima de 33,68%. Esta variação indica que esta lei de propagação não é adequada neste caso específico.

A Figura 91 apresenta os valores obtidos numericamente com os diferentes critérios de propagação para o adesivo Araldite® AV138. Conclui-se que para a lei de propagação triangular com o parâmetro 1 (PL1), os resultados são próximos dos obtidos experimentalmente, com uma diferença máxima de aproximadamente 3,79%. Quando se altera para o parâmetro 0,5 (PL0,5) a diferença em relação aos resultados experimentais é de 2,83%. Esta diferença é inferior dado que nesta simulação o software utiliza valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  mais baixos. Quando se altera o parâmetro para 2 observa-se um comportamento oposto, sendo a diferença percentual de 3,81%. De facto, para esta situação, os valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  na rotura tomam valores superiores, o que resulta na diferença obtida.

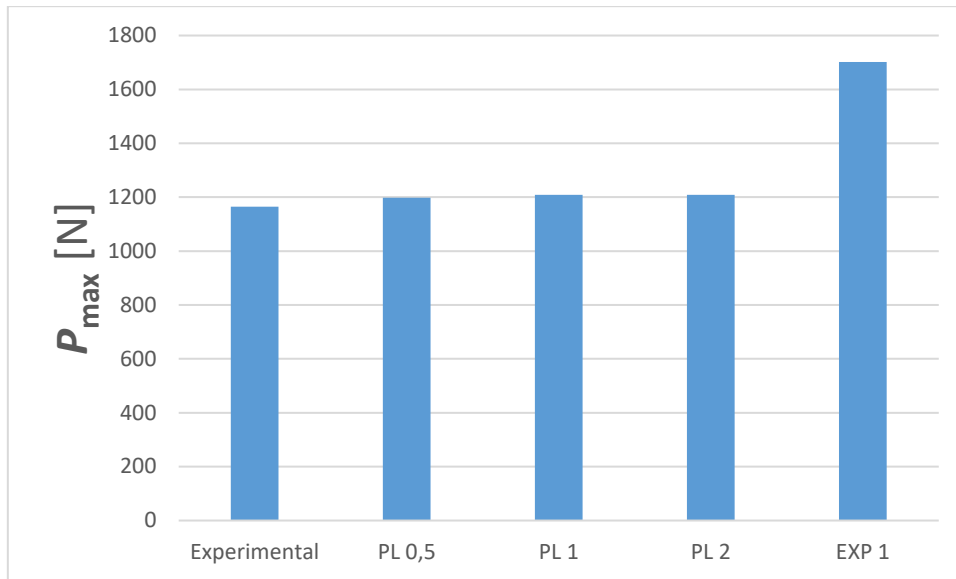


Figura 91 - Variação de  $P_{max}$  para os diferentes critérios de propagação para o adesivo Araldite® AV138

Os resultados obtidos através da lei de propagação exponencial ( $Power=1$ ) sobrestimam de forma acentuada os valores de  $P_m$ . Foi registada uma variação percentual máxima de 46,1%, esta variação indica que esta lei de propagação não é assertiva neste caso específico.

Na Figura 92 são apresentados os valores obtidos numericamente com os diferentes critérios de propagação para o adesivo Araldite® 2015.

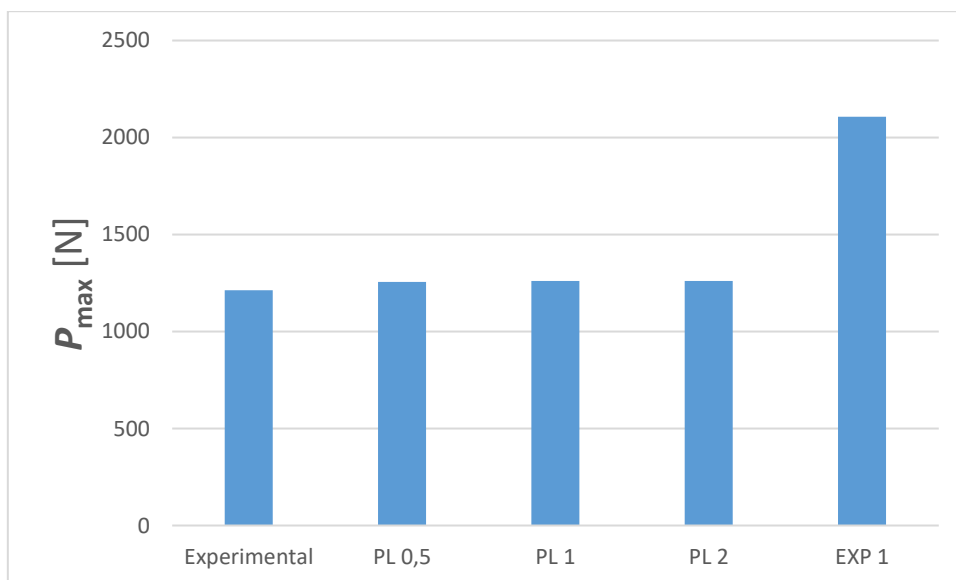


Figura 92 - Variação de  $P_{max}$  para os diferentes critérios de propagação para o adesivo Araldite® 2015

Os resultados com a lei de propagação triangular para o parâmetro 1 (PL1), são próximos dos obtidos experimentalmente, sendo a diferença máxima obtida de aproximadamente 3,90%. Quando se opta pelo parâmetro 0,5 (PL0,5) a diferença em

relação aos resultados experimentais é de 3,5%, esta diferença está mais próxima do valor experimental porque o software reduz os valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  provocando uma rotura mais precoce. Quando se altera o parâmetro para 2 observa-se um comportamento oposto, sendo a diferença percentual de 3,91% porque os valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  na rotura tomam valores superiores, o que resulta na diferença obtida.

Quando se altera para a lei de propagação exponencial ( $Power=1$ ) esta sobrestima de forma acentuada os valores de  $P_m$  sendo a sua variação percentual máxima de 73,72%. Esta variação indica que esta lei de propagação não é adequada neste caso específico.

Na Figura 93 são apresentados os valores obtidos numericamente com os diferentes critérios de propagação para o adesivo Sikaforce®7752.

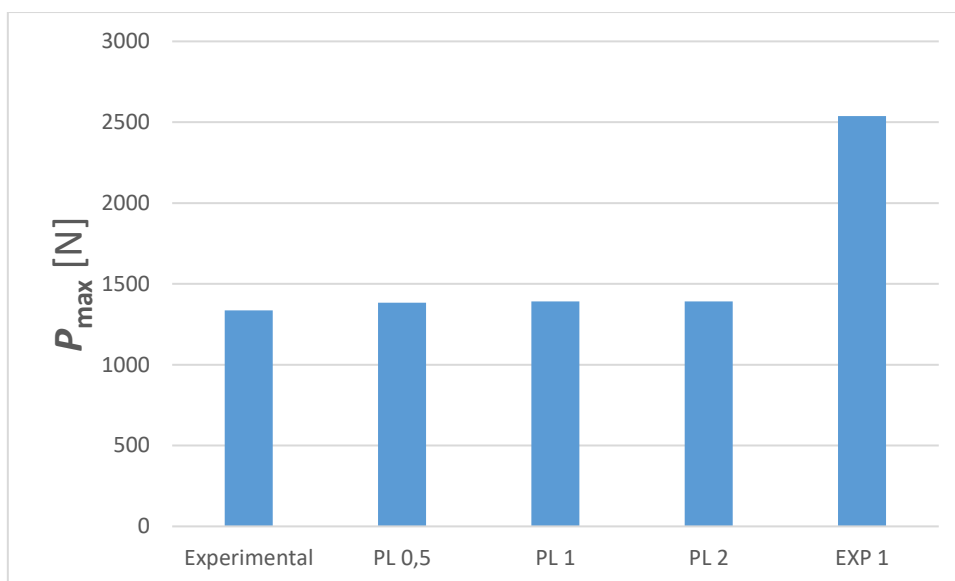


Figura 93 - Variação de  $P_{máx}$  para os diferentes critérios de propagação para o adesivo Sikaforce®7752

Os resultados obtidos através lei de propagação triangular indicam que, para o parâmetro 1 (PL1), os resultados são próximos dos obtidos experimentalmente, cuja diferença máxima obtida foi de aproximadamente 4,13%. Para parâmetro 0,5 (PL0,5) a diferença em relação aos resultados experimentais é de 6,62%. Esta diferença é inferior porque, para o parâmetro 0,5, a rotura ocorre prematuramente, dado que esta acontece com valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  mais baixos. Quando se altera o parâmetro para 2 observa-se um comportamento oposto, sendo a diferença percentual de 4,14%. De facto, para esta situação, os valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  na rotura tomam valores superiores, o que resulta na diferença obtida.

Os resultados obtidos através da lei de propagação exponencial ( $Power=1$ ) sobrestimam novamente de forma acentuada os valores de  $P_m$ . Foi registada uma variação percentual máxima de 89,97%. Esta variação indica que esta lei de propagação continua a não ser adequada.

### 3.2.4.2.2 Juntas híbridas

As juntas híbridas apresentam uma gama de valores  $P_{\max}$  superiores aos das adesivas, contudo os comportamentos dos critérios de propagação são idênticos aos das juntas adesivas.

Na Figura 94 são apresentados os valores obtidos para os diferentes valores do parâmetro do critério de propagação para o adesivo Araldite® 2015.

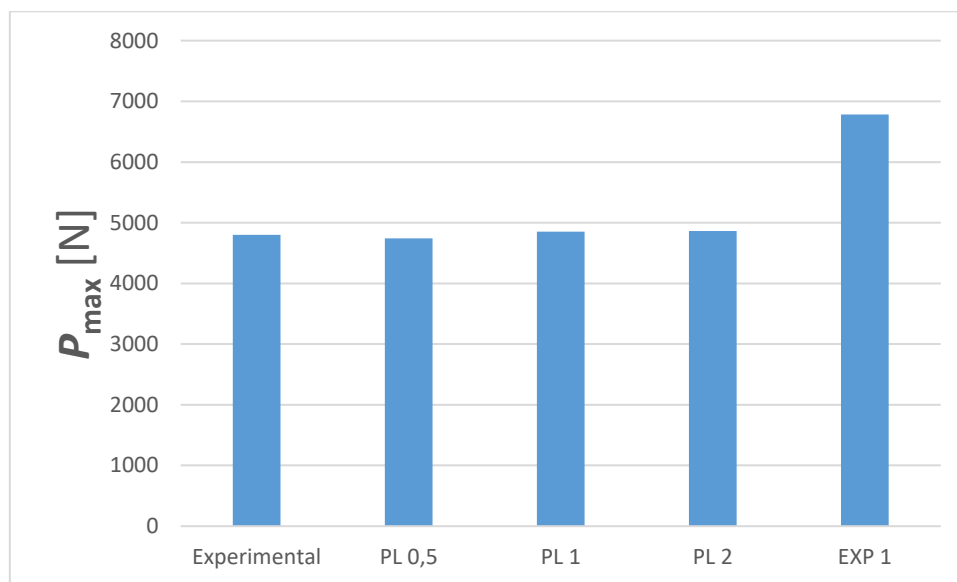


Figura 94 - Variação de  $P_{\max}$  para os diferentes critérios de propagação para o adesivo Araldite® 2015

Para este adesivo observa-se que, para um parâmetro de 1, a diferença máxima obtida foi de 1,13% em relação aos resultados experimentais. Para um parâmetro igual a 0,5 a diferença máxima foi de -1,25%. Para um parâmetro de 2 a diferença máxima de  $P_{\max}$  foi de 1,32%. Desta forma, conclui-se que para este adesivo a diferença dos valores de *Power Law* não é significativa, tendo em conta que a diferença máxima obtida foi inferior a 2% independentemente do valor do parâmetro em estudo

Através da lei de propagação exponencial com  $Power=1$  foi registada uma variação percentual máxima de 41,38%.

Relativamente ao adesivo Sikaforce®7752, na Figura 95 são apresentados os resultados obtidos para os diferentes parâmetros e critérios de propagação. Observa-se que para um parâmetro de 1 a diferença máxima obtida foi de 1,03% em relação aos resultados experimentais. Para um parâmetro igual a 0,5 a diferença máxima foi de -1,32%. Para um parâmetro de 2 a diferença máxima de  $P_{\max}$  foi de 1,22%. Desta forma, conclui-se que para este adesivo a diferença dos valores de *Power Law* continua a não ser significativa, porque a diferença máxima obtida foi inferior a 2% independentemente do valor do parâmetro em estudo.

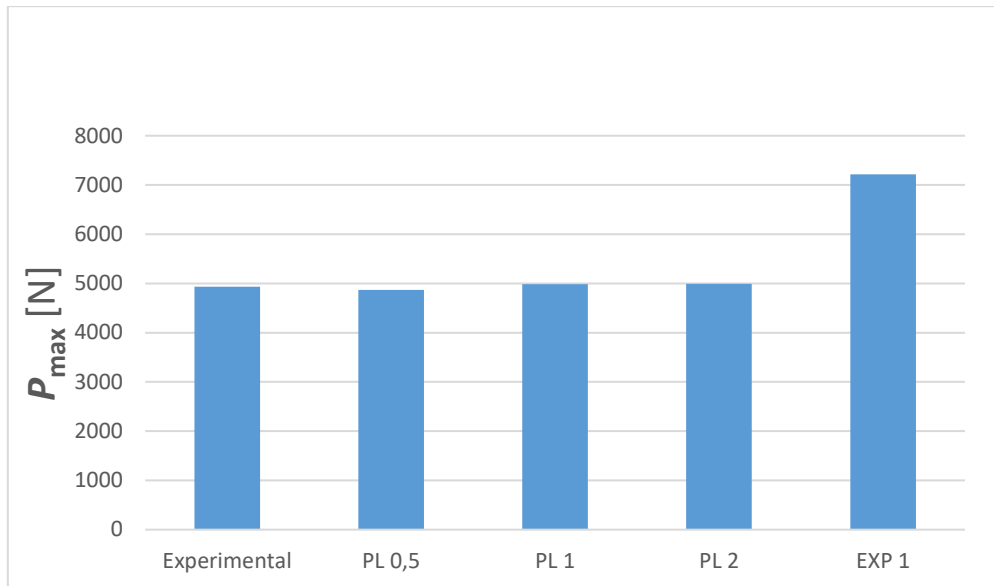


Figura 95 - Variação de  $P_{\max}$  para os diferentes critérios de propagação para o adesivo Sikaforce®7752

Através da lei de propagação exponencial com  $Power=1$  foi registada uma variação percentual máxima de 46,27%.

Na Figura 96 são apresentados os valores obtidos para os diferentes valores do parâmetro do critério de propagação para o adesivo Araldite® AV138.

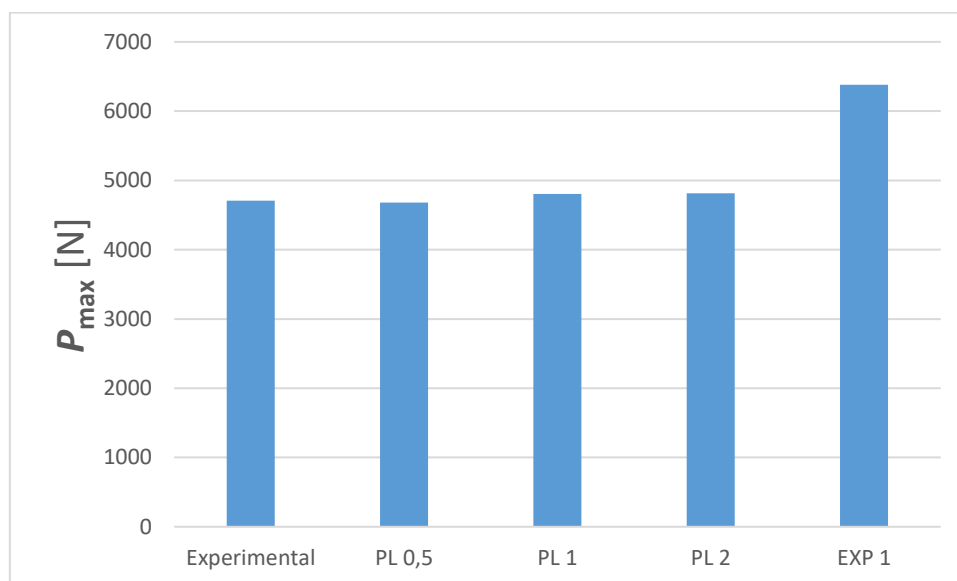


Figura 96 - Variação de  $P_{\max}$  para os diferentes critérios de propagação para o adesivo Araldite® AV138

Observa-se que para o parâmetro de 1 a diferença máxima obtida foi de 2,1% em relação aos resultados experimentais. Para um parâmetro igual a 0,5 a diferença máxima foi de -0,52%. Para um parâmetro de 2 a diferença máxima de  $P_{\max}$  foi de 2,25%. Desta forma, conclui-se que a diferença de valores com a alteração do valor do parâmetro não diverge muito do valor  $P_m$  obtido experimentalmente.

Através da lei de propagação exponencial com  $Power= 1$  foi registada uma variação percentual máxima de 35,58%.

### 3.2.5 Estudo da energia dissipada

O crescimento do dano é governado pelo trabalho da separação das superfícies de fratura devido à energia dissipada pelos elementos contínuos. A Figura 97 apresenta a energia dissipada dos ensaios experimentais e numéricos com o critério de iniciação QUADS no qual assume diferentes valores no critério de iniciação.

Pela análise da Figura 97 verifica-se que os valores de energia dissipada numéricos não estão muito próximos dos valores experimentais, contudo é importante referenciar que, nas juntas híbridas, os valores de energia dissipada obtidos nos ensaios numéricos são os que estão mais aproximados face aos valores experimentais.

A causa dos valores de energia experimentais serem mais elevados que o valores obtidos numericamente está relacionada com as folgas da máquina de ensaios, que provocam um maior deslocamento até ocorrer a rotura dos provetes.

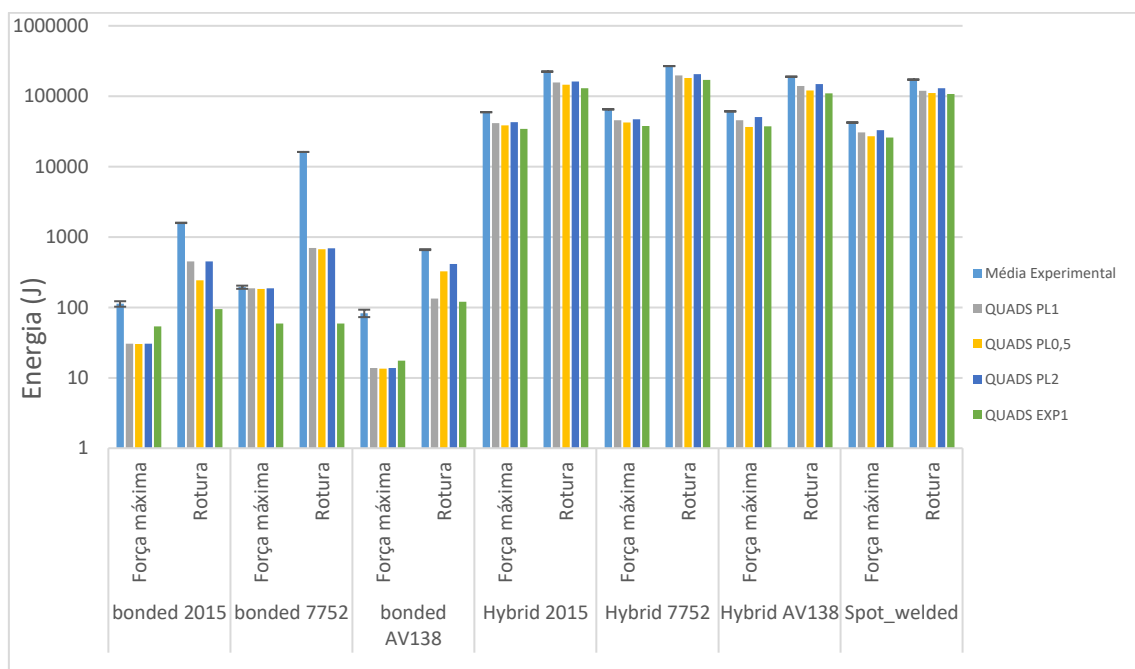


Figura 97 - Energia dissipada dos ensaios experimentais e numéricos com critério de iniciação QUADS que assume diferentes critérios de propagação

Na Tabela 21 são apresentadas as percentagens de desvio entre os valores de energia dissipada numérica e experimental, quando no ensaio é atingida a força máxima e a rotura nas juntas soldadas.

Tabela 21 - Percentagens de desvio entre os valores de energia dissipada numérica e experimental de juntas soldadas

<b>Junta soldada</b>		
	<b>Força máxima</b>	<b>Rotura</b>
QUADS PL 0,5	-36,32%	-35,89%
QUADS PL 1	-27,69%	-31,00%
QUADS PL 2	-22,28%	-24,40%
QUADS EXP 1	-38,50%	-37,60%
<b>Desvio padrão experimental</b>	<b>±16,68%</b>	<b>±12,6%</b>

Pela análise é possível concluir que os valores de energia dissipada calculados a partir dos valores  $P-\delta$  numéricos até atingir a força máxima ou até à rotura estão fora dos valores admissíveis de percentagem do desvio experimental, que é  $\pm 16,68\%$  e  $\pm 12,6\%$ , respetivamente. Neste caso particular, a energia dissipada dos ensaios numéricos foi significativamente inferior à experimental. Esta diferença de valores poderá ser justificada pelas folgas que as máquinas de ensaios têm, aumentando assim o deslocamento no gráfico  $P-\delta$  experimental, visto que o ponto de soldadura tem pouca ductilidade numericamente o deslocamento é reduzido até à rotura.

Na Tabela 22 são apresentadas as percentagens de desvio entre os valores de energia dissipada numérica e experimental, quando no ensaio é atingida a força máxima e a rotura nas juntas adesivas e híbridas com o adesivo Araldite® AV138.

Tabela 22 - Percentagens de desvio entre os valores de energia dissipada numérica e experimental para juntas adesivas e híbridas com o adesivo Araldite® AV138

	<b>Junta adesiva Araldite® AV138</b>		<b>Junta híbrida Araldite® AV138</b>	
	<b>Força máxima</b>	<b>Rotura</b>	<b>Força máxima</b>	<b>Rotura</b>
QUADS PL 0,5	-83,67%	-50,98%	-40,00%	-36,59%
QUADS PL 1	-83,45%	-79,80%	-25,00%	-26,67%
QUADS PL 2	-83,44%	-37,14%	-16,90%	-21,30%
QUADS EXP 1	-78,94%	-81,83%	-38,59%	-42,00%
<b>Desvio padrão experimental</b>	<b>±32,1%</b>	<b>±14,55%</b>	<b>±20,1%</b>	<b>±57,9%</b>

Verifica-se que os valores de energia dissipada calculados a partir dos valores  $P-\delta$  numéricos até atingir a força máxima ou até à rotura estão de uma maneira geral fora dos valores admissíveis de percentagem do desvio experimental, que é de  $\pm 32,1$  e  $\pm 14,55\%$ , respetivamente, para as juntas adesivas. Isto deve-se ao facto de o adesivo Araldite® AV138 ser considerado um adesivo frágil, o que provoca nos ensaios numéricos um baixo deslocamento obtidos pelo gráfico  $P-\delta$ . Também poderá ser justificado pelas folgas existentes na máquina de ensaios que reproduz deslocamentos exagerados nos gráficos  $P-\delta$  obtidos experimentalmente.

No caso das juntas híbridas, o valor de desvio experimental é  $\pm 20,1\%$  e  $\pm 57,9\%$  para força máxima e rotura, respetivamente. Verifica-se que a energia dissipada nos ensaios numéricos está dentro dos valores admissíveis, à exceção do valor de  $-25,00\%$ , que corresponde ao critério de dano triangular com parâmetro  $Power= 1$  e de  $38,59\%$ , que corresponde ao critério de dano Exponencial.

Na Tabela 23 são apresentadas as percentagens de desvio entre os valores de energia dissipada numérica e experimental, quando no ensaio é atingida a força máxima e a rotura nas juntas adesivas e híbridas com o adesivo Araldite® 2015.

Tabela 23 - Percentagens de desvio entre os valores de energia dissipada numérica e experimental para juntas adesivas e híbridas com o adesivo Araldite® 2015

	Junta adesiva Araldite® 2015		Junta Híbrida Araldite® 2015	
	Força máxima	Rotura	Força máxima	Rotura
QUADS PL 0,5	-73,04%	-84,70%	-35,00%	-22,20%
QUADS PL 1	-72,94%	-71,58%	-30,00%	-16,22%
QUADS PL 2	-72,94%	-71,56%	-28,00%	-28,00%
QUADS EXP 1	-52,38%	-94,02%	-42,00%	-42,00%
<b>Desvio padrão experimental</b>	<b><math>\pm 18,9\%</math></b>	<b><math>\pm 18,7\%</math></b>	<b><math>\pm 31,25\%</math></b>	<b><math>\pm 16,81\%</math></b>

Por comparação, verifica-se que os valores de energia dissipada calculados a partir dos valores  $P-\delta$  numéricos até atingir a força máxima ou até à rotura estão fora dos valores admissíveis de percentagem do desvio experimental, que são de  $\pm 18,9$  e  $\pm 18,7\%$ , respetivamente

Relativamente às juntas híbridas, a percentagem de desvio experimental foi de  $\pm 31,25\%$  e  $\pm 16,81\%$  para força máxima e rotura, respetivamente. Quase todos os valores de energia dissipada calculados a partir dos gráficos  $P-\delta$  numéricos estão acima do desvio experimental, à exceção da junta híbrida quando utiliza o parâmetro  $Power= 1$ .

A divergência de valores de energia dissipada calculada entre os ensaios numéricos e experimentais está associada ao facto de o adesivo Araldite® 2015 ser considerado um adesivo ainda um pouco frágil e é importante considerar as folgas da máquina.

Na Tabela 24 Tabela 23 são apresentadas as percentagens de desvio entre os valores de energia dissipada numérica e experimental, quando no ensaio é atingida a força máxima e a rotura nas juntas adesivas e híbridas com o adesivo Sikaforce® 7752.

Tabela 24 - Percentagens de desvio entre os valores de energia dissipada numérica e experimental para juntas adesivas e híbridas com o adesivo Sikaforce® 7752

	Junta adesiva Sikaforce® 7752		Junta Híbrida Sikaforce® 7752	
	Força máxima	Rotura	Força máxima	Rotura
QUADS PL 0,5	-5,83%	-95,85%	-35,00%	-0,324
QUADS PL 1	-3,97%	-95,68%	-30,00%	-26,50%
QUADS PL 2	-3,96%	-95,72%	-28,00%	-23,00%
QUADS EXP 1	-69,60%	-99,64%	-42,00%	-36,50%
<b>Desvio padrão experimental</b>	<b>±21,3</b>	<b>±14,1</b>	<b>±19,4</b>	<b>±41,45</b>

Pela análise da Tabela 24 verifica-se que, nas juntas adesivas, a energia dissipada calculada a partir dos ensaios numéricos até atingir a força máxima está dentro dos valores admissíveis, à exceção de quando se opta pelo critério de propagação exponencial. Quando é calculada a energia dissipada até à rotura os valores de energia obtidos dos ensaios numéricos já não se aproximam dos valores experimentais apresentando uma significativa diferença.

No que concerne às juntas híbridas, os resultados mais aproximados de energia dissipada numérica comparativamente com a experimental surgem quando se calcula a mesma até à rotura do provete, importa referir que, o valor de percentagem de rotura com o critério de iniciação QUADS com parâmetro  $Power= 0,5$  é bastante baixo porque o modelo numérico atingiu bastante rápido a rotura com pouco deslocamento.

A causa divergência de valores de energia dissipada dos ensaios numéricos e experimentais continua a estar associadas às folgas da máquina de ensaios. Sendo que neste caso específico a diferença é menor devido à maior ductilidade do adesivo.

# CONCLUSÕES



## 4 CONCLUSÕES

A realização desta dissertação teve como principal objetivo a previsão numérica da resistência de juntas adesivas e híbridas utilizando o MEF com o auxílio do *software* Abaqus®. Os valores obtidos numericamente foram avaliados por comparação com os valores experimentais obtidos por Almeida [2] para validação da técnica numérica.

Foram considerados 3 adesivos, o Araldite® AV138, que é considerado um adesivo frágil, o Sikaforce® 7752 considerado um adesivo dúctil e finalmente o Araldite® 2015, que apresenta um comportamento intermédio por comparação com os anteriores.

A análise numérica para previsão da resistência dividiu-se em 3 particularidades:

- Estudo do critério de iniciação;
- Estudo do critério de propagação;
- Estudo da energia dissipada.

No estudo do critério de iniciação foram considerados os diferentes critérios de iniciação de dano já referidos nesta dissertação para os 3 tipos de adesivos e para as diferentes variantes de juntas (soldadas, adesivas e híbridas), de forma a validar qual o mais adequado. A validação foi feita comparando o  $P_m$  experimental com o  $P_{m\max}$  dos diferentes critérios de iniciação para cada adesivo.

Os resultados foram muito semelhantes quer nas juntas soldadas, adesivas e híbridas, no qual se destacaram o critério QUADS e MAXS, nos quais se obtiveram resultados muito próximos dos experimentais. A Tabela 25 indica o resumo das diferenças percentuais face aos resultados experimentais.

Tabela 25 - percentagem de erro dos critérios QUADS e MAXS por comparação com os resultados experimentais

	Junta soldada	adesiva Araldite® AV138	adesiva Araldite® 2015	adesiva Sikaforce® 7752	Híbrida Araldite® AV138	Híbrida Araldite® 2015	Híbrida Sikaforce® 7752
<b>QUADS</b>	2,67%	3,79%	3,90%	4,13%	2,05%	1,27%	1,03%
<b>MAXS</b>	4,93%	3,82%	3,92%	4,17%	3,74%	2,78%	2,64%

Apesar da diferença entre eles ser reduzida o critério QUADS é o mais adequado para a simulação numérica. O Critério MAXPS que apresentou valores muito abaixo do experimental e a causa está relacionada, como já foi referido na dissertação, com a

consideração de que a força máxima ocorre com a primeira fenda, o que não é a realidade num caso prático. No que concerne aos critérios baseados nas deformações, estes apresentaram valores muitos acima dos experimentalmente obtidos em todas as variantes de juntas (soldadas, adesivas e híbridas) e para os 3 tipos de adesivos, que sendo assim para este caso prático não são adequados para simulação numérica.

No estudo do critério de propagação foi possível concluir que a lei de propagação triangular é a que apresenta melhores resultados, quer nas juntas soldadas quer nos diferentes adesivos, no qual se destaca o parâmetro  $Power=0,5$ . O parâmetro  $Power=0,5$  provoca uma rotura mais precoce em comparação com  $Power=1$  e  $Power=2$ , pelo que para este estudo é o mais indicado pela apresentação de melhores resultados. Contudo, a influência do parâmetro do critério energético de propagação do dano nos três valores testados (0,5; 1 e 2) é bastante reduzida, já que as respetivas simulações apresentam previsões idênticas de  $P_m$ .

No estudo da energia dissipada foi possível verificar que existe uma discrepância de valores numéricos e experimentais. Uma das causas é a folga mecânica da máquina de ensaios que provoca um aumento da energia dissipada experimental relativamente à calculada a partir dos ensaios numéricos. Também foi possível concluir que a ductilidade do adesivo influencia a energia dissipada, de tal forma que quanto mais dúctil for o adesivo maior será a energia dissipada porque existe um aumento do limite plástico do adesivo.

Em suma, após a análise destes casos de estudo, foi possível concluir que o MEFE torna-se adequado para simulação numérica quando se opta pelo critérios de iniciação QUADS e MAXS através da lei triangular, sendo possível optar pelos parâmetros do critério energético de propagação (0,5; 1 e 2), no entanto o  $Power 0,5$  é o mais adequado.

Como sugestões de trabalhos futuros que possam complementar o estudo realizado nesta dissertação, sugerem-se os seguintes:

- Avaliação da influência da espessura do adesivo;
- Avaliação da influência do comprimento de ligação;
- Utilização de substratos de materiais diferentes;
- Aplicação da lei de propagação trapezoidal;
- Validação do MEFX para outras geometrias de junta.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES  
DE INFORMAÇÃO**



## 5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Carneiro, M.A.d.S., *Estudo experimental e numérico de juntas adesivas em T com aderentes de alumínio*, in *Engenharia Mecânica*. 2016, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
2. Almeida, F., *Estudo e otimização de juntas do tipo Tpeel soldadas, adesivas e híbridas*. 2015, ISEP.
3. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, and M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. 2007, Porto: Publindústria. 358.
4. Pocius, A.V., *Adhesion and Adhesives Technology, An Introduction*. 2nd Edition ed. 2002: Hanser Gardner Publications.
5. Brandão, A., et al., *Adesivos em automóveis - Que adesivos se utilizam em automóveis e qual a sua função?* 2010, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
6. Neto, J.A.B.P., R.D.S.G. Campilho, and L.F.M. da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2012. **37**: p. 96-101.
7. Ribeiro, N.F.Q.R., *Efeito de Alterações Geométricas na Resistência de Juntas de Sobreposição*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2012, Instituto Superior de Engenharia Mecânica. p. 6.
8. *Adequação das formulações de adesivos híbridos para montagens estruturais*. [cited 2018 12/12]; Available from: <http://blogadhesivoindustrial.com/wp-content/uploads/2017/07/adesivos-hibridos-para-montagens-industriais.png>.
9. Carbas, R.J.C., *Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi*. 2008, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
10. Adams, R.D., *Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications*. illustrated, reprint ed. 2005: Taylor & Francis, 2005.
11. Smith, W.F., *Princípios de ciência e engenharia de materiais*. 3ª edição ed. 1998: McGraw-Hill.
12. SIKA, *Automotive Realizing Visions*, SIKA, Editor. 2018.
13. Almeida, S.A.C., *Análise computacional de juntas adesivas simples e duplas em materiais compósitos*, in *Engenharia Mecânica*. 2012, ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
14. Marchezin, E., L.C. Pardini, and V.A. Guimarães, *Avaliação do comportamento em fadiga de juntas estruturais de ligas de Al2024T3 coladas com adesivo epóxi*. *Matéria* (Rio de Janeiro), 2012. **17**: p. 889-900.
15. Sina Ebnesajjad, A.H.L., *Adhesives Technology Handbook*. 3rd Edition ed. 2014: William Andrew.
16. Petrie, E.M., *Handbook of Adhesives and Sealants*. 1ª edição ed. 1999.

17. Hartshorn, S.R., *Structural Adhesives: Chemistry and Technology*. 2012: Springer US.
18. da Silva, L.F.M. and R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. Vol. Springer Science & Business Media. 2012.
19. LOCTITE, *Structural Bonding Adhesives Selector Guide*.
20. Taib, A.A., et al., *Bonded joints with composite adherends. Part I. Effect of specimen configuration, adhesive thickness, spew fillet and adherend stiffness on fracture*, in *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2006 (226-236).
21. Mahdi, S., et al., *A Comparison of Oven-cured and Induction-cured Adhesively Bonded Composite Joints*. *Journal of Composite Materials*, 2003. **37**: p. 519-542.
22. Adams, R.D., J. Comyn, and W.C. Wake, *Structural Adhesive Joints in Engineering*. 1997: Springer.
23. Steiner, D.P. *Adhesive Failure & Epoxy Failure*. 2011 [cited 2017 11/11]; Available from: <http://theadhesivesexpert.com/adhesives-failure-epoxy-failure/>.
24. Banea, M.D. and L.F.M. da Silva, *Adhesively bonded joints in composite materials: An overview*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2009. **223**(1): p. 1-18.
25. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos in Departamento de engenharia mecânica e gestão industrial 2007*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
26. Habenicht, G., *References*, in *Applied Adhesive Bonding*. 2008, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. p. 145-147.
27. Gauthier, M.M., *Sorting out structural adhesives, Advanced Materials & Processes*. ASM International, 1990.
28. Pocius, A.V., *Adhesion and Adhesives Technology*, in *Adhesion and Adhesives Technology (Third Edition)*. 2012, Hanser. p. I-XVI.
29. 3m. *Choosing and Using a Structural Adhesive*. Available from: <http://multimedia.3m.com/mws/media/7956930/choosing-and-using-a-structural-adhesive-white-paper.pdf>.
30. Marques, G.P., *Influência do tipo de adesivo em juntas híbridas soldadas-adesivas*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
31. Batalha, C., et al., *Adesivos Estruturais - Que adesivos se utilizam nos aviões e qual a sua função*. 2010/2011, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto
32. Loctite, *Loctite FT 220* 2018.
33. Chaves, F.J.P., *Application of adhesive bonding in PVC windows* 2005, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
34. Esteves, J.S.L., *Estudo do comportamento de adesivos estruturais*. 1990, FEUP.
35. Silva, F.J.G., *Tecnologia da Soldadura*. 2ª edição ed. 2016.
36. Santos, J.F.O. and L. Quintino, *Processos de soldadura*. 1993: Instituto de Soldadura e Qualidade.
37. Valenciani, V.C., *Ligações em Estruturas de Aço* 1997, Departamento de Engenharia de Estruturas- São Carlos.
38. Kelly, G., *Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints*. *Composite Structures*, 2006.

39. A., G., S. G., and P. M., *Injection bolts to repair old bridges*. 2000, Netherlands Delft University of Technology.
40. Goland, M., *The stresses in cemented joints*. J. appl. Mech., 1944. **17**: p. 66.
41. Hart-Smith, L.J., *ADHESIVE-BONDED DOUBLE-LAP JOINTS*. 1973, NASA.
42. Volkersen, O., *Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten*. Luftfahrtforschung, 1938. **15**: p. 41-47.
43. Hart-Smith, L.J., *Chapter 19 - The design of adhesively bonded joints A2 - Dillard, D.A*, in *Adhesion Science and Engineering*, A.V. Pocius and M. Chaudhury, Editors. 2002, Elsevier Science B.V.: Amsterdam. p. 725-777.
44. Silva, L.F.M., R. F. T. Lima, and R. M. S. Teixeira, *Development of a Computer Program for the Design of Adhesive Joints*. Vol. 85. 2009. 889-918.
45. Ikegami, K., et al., *Strength of adhesively bonded scarf joints between glass fibre-reinforced plastics and metals*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1990. **10**(3): p. 199-206.
46. da Silva, L.F.M., et al., *Analytical models of adhesively bonded joints—Part I: Literature survey*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(3): p. 319-330.
47. Campilho, R.D.S.G., *Método de Elementos Finitos - Ferramentas para Análise Estrutural*. 2012 PUBLINDUSTRIA.
48. Hart-Smith, L.J., *Stress analysis: a continuum mechanics approach, in Developments in Adhesives 2*. 1981: Applied Science Publishers.
49. Harris, J.A. and R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
50. X. Zhao , R.D.A.L.F.M.d.S., *Single Lap Joints with Rounded Adherend Corners: Experimental Results and Strength Prediction*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011: p. p. 837-856.
51. Fernlund, G. and J.K. Spelt, *Failure load prediction*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991.
52. Ji, G., et al., *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(18-19).
53. BARENBLATT, G.I., *The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture*. Advances in Applied Mechanics, 1962.
54. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960.
55. Y. Hua, A.D.C., M.A. Wahab, I.A. Ashcroft, *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(6).
56. Z. Chen, R.D.A., Lucas F. M. da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. Engineering Fracture Mechanics, 2011. **78**(6).
57. Shenoy, V., et al., *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.

58. Medinas, M.T.L.F., *An Extended Finite Element Method (XFEM) approach to hydraulic fractures: Modelling of oriented perforations*. 2015, Instituto Superior Tecnico de Lisboa.
59. Campilho, R.D.S.G., et al., *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5).
60. Campilho, R.D.S.G., et al., *Optimization study of hybrid spot-welded/bonded single-lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 86-95.
61. Kim, K., et al., *Failure mode and strength of uni-directional composite single lap bonded joints with different bonding methods*. Composite Structures, 2006. **72**(4): p. 477-485.
62. Lee, Y., et al., *Failure load evaluation and prediction of hybrid composite double lap joints*. Composite Structures, 2010. **92**(12): p. 2916-2926.
63. HART-SMITH, L.J., *Design methodology for bonded-bolted composite joint*. 1982, AFWALTR- 81-3154,; Douglas Aircraft Company.
64. Hart-Smith, L.J., *Bonded-bolted composite joints*. Journal of Aircraft, 1985. **22**(11): p. 993-1000.
65. Chang, B., Y. Shi, and S. Dong, *Studies on a computational model and the stress field characteristics of weld-bonded joints for a car body steel sheet*. Journal of Materials Processing Technology, 2000. **100**(1): p. 171-178.
66. Darwish, S.M.H. and A. Ghanya, *Critical assessment of weld-bonded technologies*. Journal of Materials Processing Technology, 2000. **105**(3): p. 221-229.
67. Association, E.A., *EAA Aluminium Automotive Manual - Hybrid joining techniques*.
68. Al-Samhan, A. and S.M.H. Darwish, *Strength prediction of weld-bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2003. **23**(1): p. 23-28.
69. Santos, I.O., et al., *Weld bonding of stainless steel*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004. **44**(14): p. 1431-1439.
70. Graham, D.P., et al., *A Hybrid Joining Scheme for High Strength Multimaterial Joints* 18th International Conference On Composite Materials.
71. Darwish, S.M. and A. Al-Samhan, *Design rationale of weld-bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2004. **24**(5): p. 367-377.
72. Campilho, R.D.S.G., et al., *Optimization study of hybrid spot-welded/bonded single-lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 86-95.
73. Chang, B., Y. Shi, and L. Lu, *Studies on the stress distribution and fatigue behavior of weld-bonded lap shear joints*. Journal of Materials Processing Technology, 2001. **108**(3): p. 307-313.
74. Samaei, M., M. Zehsaz, and T.N. Chakherlou, *Experimental and numerical study of fatigue crack growth of aluminum alloy 2024-T3 single lap simple bolted and hybrid (adhesive/bolted) joints*. Engineering Failure Analysis, 2016. **59**: p. 253-268.
75. Di Franco, G. and B. Zuccarello, *Analysis and optimization of hybrid double lap aluminum-GFRP joints*. Composite Structures, 2014. **116**: p. 682-693.

76. Yadav, P.D. and P.M.M.J. Patil, *A Parametric Study of Hybrid (Adhesive and Bolted) Single Lap Joints*. International Journal of Engineering Research & Technology, 2014
77. Sadowski, T. and E. Zarzeka-Raczkowska, *Hybrid Adhesive Bonded and Riveted Joints – Influence of Rivet Geometrical Layout on Strength of Joints / Połączenia Hybrydowe Klejowo-Nitowe - Wpływ Geometrii Rozmieszczenia Nitów Na Wytrzymałość Połączeń*, in *Archives of Metallurgy and Materials*. 2012. p. 1127.
78. Moroni, F. and A. Pirondi, *Technology of Rivet: Adhesive Joints*, in *Hybrid Adhesive Joints*, L.F.M. da Silva, A. Pirondi, and A. Öchsner, Editors. 2011, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 79-108.
79. Gómez, S., J. Oñoro, and J. Pecharrómán, *A simple mechanical model of a structural hybrid adhesive/riveted single lap joint*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007. **27**(4).
80. Geiss, P.L., et al., *Hybrid Joining With Pressure Sensitive Adhesives*. 2008, University of Kaiserslautern, Faculty Mechanical and Process Engineering, Workgroup Materials and Surface Technologies, Kaiserslautern, Germany.
81. Pereira, P.H.R., et al., *Influencia dos parametros geometricos da junta de Clinching na resistencia ao desbotoamento entre as chapas*. 2013, Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Minas Gerais.
82. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
83. Moreira, R.D.F., *Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido com reforços exteriores para aumento da resistência*, in *Engenharia Mecânica*. 2013, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
84. Faneco, T.M.S., *Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*, in *Engenharia Mecânica*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
85. da Silva, L.F.M. and R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints*, in *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2012, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 1-93.
86. Campilho, R.D.S.G., et al., *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
87. *Abaqus® Documentation*. 2013, Dassault Systèmes: Vélizy-Villacoublay.