



## Estudo e otimização de juntas do tipo T-peel soldadas, adesivas e híbridas

FERNANDO JORGE DA SILVA DE ALMEIDA

Outubro de 2015

# Estudo e otimização de juntas do tipo T-peel soldadas, adesivas e híbridas

Fernando Jorge Silva Almeida

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



13 de outubro de 2015



Relatório da Unidade Curricular de Dissertação/Projeto/Estágio do 2º ano do Mestrado em  
Engenharia Mecânica – Ramo Construções Mecânicas

Candidato: Fernando Jorge Silva Almeida, N°1020898, 1020898@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, RDS@isep.ipp.pt

Coorientação Científica: Francisco José Gomes da Silva, FGS@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica  
Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



13 de outubro de 2015



À minha mãe, pai e irmão...



## *Agradecimentos*

Os meus agradecimentos ao orientador científico do presente trabalho, Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, pelo incansável apoio que dedicou ao longo de toda a sua execução, pelo seu enorme profissionalismo e pela motivação que me incutiu. Ao Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva pelo apoio prestado durante a execução do trabalho.

À minha família, pelo apoio e compreensão.

A todos que de alguma forma contribuíram para que eu conseguisse chegar aqui.



## *Resumo*

A necessidade de utilizar métodos de ligação que melhor satisfaçam as necessidades de projeto tem causado a crescente utilização das juntas adesivas, em detrimento dos métodos tradicionais tais como a soldadura, ligações aparafusadas e rebitadas. A sua utilização em diversas aplicações industriais justifica-se pela redução de peso, redução de concentrações de tensões, isolamento acústico e melhor resistência à corrosão. Contudo, também apresentam desvantagens, como a necessidade de preparação das juntas, a fraca resistência a esforços de arrancamento e a complexidade da previsão da sua resistência. As juntas híbridas são obtidas por combinação de uma técnica tradicional com uma ligação adesiva. As juntas híbridas adesivas-soldadas obtêm-se através da combinação da ligação adesiva com a ligação soldada, sendo a soldadura de resistência por pontos a técnica de soldadura mais usada no fabrico deste tipo de juntas. A sinergia entre ligação adesiva e soldadura por pontos oferece vantagens competitivas em relação às ligações adesivas, tais como superior resistência e rigidez, e maior resistência ao arrancamento e à fadiga.

No presente trabalho é apresentado um estudo experimental e numérico de juntas T-peel soldadas, adesivas e híbridas (adesivas-soldadas) solicitadas ao arrancamento. Considerou-se o adesivo frágil Araldite® AV138 e os adesivos dúcteis Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 e aderentes de aço (C45E). Foi realizada uma análise dos valores experimentais e efetuada uma comparação destes valores com os resultados obtidos pelo Método de Elementos Finitos (MEF) no *software* ABAQUS®, que incluiu uma análise de tensões na camada de adesivo e previsão do comportamento das juntas por MDC. Observou-se que, dos três adesivos em estudo, o adesivo Sikaforce® 7752 é o que apresenta o melhor desempenho na ligação de juntas T-peel. A boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos permitiu validar a utilização de MDC para previsão da resistência de juntas T-peel adesivas e híbridas. Assim, o presente trabalho representa uma base para posterior aplicação no projeto deste tipo de ligação, com as vantagens decorrentes na redução do tempo de projeto e maior facilidade de otimização.

### ***Palavras-Chave***

Junta em T, Junta híbrida, Adesivo, Elementos Finitos, Modelos de Dano Coesivo.



## *Abstract*

The need of joining methods that best meet the design requirements has led to the increased use of adhesive joints at the expense of the traditional methods such as welding, fastening and riveting. Their use in various industrial applications is justified by the weight reduction, reduction of stress concentrations, acoustic insulation and improved corrosion resistance. However, they also present disadvantages, such as the need of joint preparation, the poor resistance to peel loads and the complexity in the strength prediction. Hybrid joints are obtained by combining a traditional technique with adhesive bonding. Hybrid weld-bonded joints are obtained by combining adhesive bonding with a welded joint, being spot-welding the most widely used welding technique in the manufacture of such joints. The synergy between adhesive bonding and spot-welding provides competitive advantages over adhesive bonding, such as superior strength and stiffness, and higher resistance to peeling and fatigue.

In the present work, an experimental and numerical study of T-peel welded, adhesive and hybrid (adhesive-welded) joints is presented under peeling loads. The brittle adhesive Araldite<sup>®</sup> AV138 and the ductile adhesives Araldite<sup>®</sup> 2015 and Sikaforce<sup>®</sup> 7752 were considered between steel substrates (C45E). An analysis of the experimental values and a comparison of these values with Finite Element Method (FEM) results in the ABAQUS<sup>®</sup> software was carried out, which included a stress analysis in the adhesive layer and joint strength prediction by Cohesive Zone Models (CZM). It was found that, between the three adhesives studied, the Sikaforce<sup>®</sup> 7752 adhesive is the one with the best performance in bonding T-peel joints. The good agreement between the experimental and numerical results enabled the validation of CZM to predict the strength of adhesive and hybrid T-peel joints. The present work is a basis for further application in the design of this type of joints, with the benefits in reducing the design time and ease of optimization.

### *Keywords*

T-peel joint, Hybrid joint, Adhesive, Finite Elements, Cohesive Zone Models.



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>VII</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>IX</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XV</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XIX</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>XXI</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....	2
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
2.1 TÉCNICAS DE UNIÃO ENTRE COMPONENTES .....	5
2.1.1 <i>Ligações adesivas</i> .....	5
2.1.1.1 Vantagens e inconvenientes .....	6
2.1.1.2 Tipos de esforços mais comuns .....	8
2.1.1.3 Modos de rotura .....	11
2.1.2 <i>Ligações soldadas</i> .....	12
2.1.2.1 Soldadura de Resistência por Pontos .....	14
2.1.3 <i>Ligações aparafusadas</i> .....	17
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS ADESIVOS .....	18
2.2.1 <i>Caraterização dos adesivos estruturais</i> .....	20
2.2.2 <i>Tipos de adesivos estruturais</i> .....	21
2.3 TÉCNICAS DE PREVISÃO EM JUNTAS ADESIVAS .....	25
2.3.1 <i>Métodos analíticos</i> .....	25
2.3.1.1 Critérios de rotura .....	30
2.3.2 <i>Métodos numéricos</i> .....	32
2.3.2.1 Mecânica dos Meios Contínuos .....	35
2.3.2.2 Mecânica da Fratura .....	36
2.3.2.3 Modelos de dano Coesivo .....	38
2.3.2.3.1 Modelo de dano triangular .....	42
2.4 JUNTAS HÍBRIDAS .....	44
2.4.1 <i>Juntas adesivas-soldadas</i> .....	45
2.4.1.1 Sobreposição simples .....	48
2.4.1.2 T-peel .....	49

2.4.2	<i>Juntas adesivas-aparafusadas</i> .....	50
2.4.3	<i>Juntas adesivas-rebitadas</i> .....	51
2.4.4	<i>Outros tipos de juntas híbridas</i> .....	52
<b>3</b>	<b>TRABALHO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>55</b>
3.1	MATERIAIS .....	55
3.1.1	<i>Aderentes</i> .....	55
3.1.2	<i>Adesivos</i> .....	56
3.1.2.1	<i>Adesivo Araldite® AV138</i> .....	56
3.1.2.2	<i>Adesivo Araldite® 2015</i> .....	57
3.1.2.3	<i>Adesivo Sikaforce® 7752</i> .....	58
3.2	GEOMETRIAS ESTUDADAS .....	60
3.2.1	<i>Dimensões e configurações de juntas</i> .....	60
3.2.2	<i>Fabrico dos provetes</i> .....	60
3.3	CONDIÇÕES DE ENSAIO.....	64
3.4	RESULTADOS DAS JUNTAS .....	65
3.4.1	<i>Juntas soldadas</i> .....	65
3.4.2	<i>Juntas coladas e híbridas com o Araldite® AV138</i> .....	67
3.4.3	<i>Juntas coladas e híbridas com o Araldite® 2015</i> .....	72
3.4.4	<i>Juntas coladas e híbridas com o Sikaforce® 7752</i> .....	75
3.4.5	<i>Comparação dos valores de <math>P_{max}</math></i> .....	78
<b>4</b>	<b>TRABALHO NUMÉRICO</b> .....	<b>81</b>
4.1	CONDIÇÕES DA ANÁLISE NUMÉRICA.....	81
4.2	MODELO DE DANO COESIVO .....	90
4.2.1	<i>Modelo de dano triangular</i> .....	91
4.2.2	<i>Determinação das propriedades coesivas</i> .....	92
4.3	ANÁLISE DE TENSÕES .....	95
4.3.1	<i>Juntas coladas</i> .....	95
4.3.2	<i>Juntas híbridas</i> .....	98
4.4	RESULTADOS DAS JUNTAS .....	101
4.4.1	<i>Juntas soldadas</i> .....	101
4.4.2	<i>Juntas coladas com Araldite® AV138</i> .....	102
4.4.3	<i>Juntas coladas com Araldite® 2015</i> .....	104
4.4.4	<i>Juntas coladas com Sikaforce® 7752</i> .....	105
4.4.5	<i>Comparação dos valores de <math>P_{max}</math></i> .....	107
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>111</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>115</b>

## *Índice de Figuras*

Figura 1 – Distribuição de tensões em juntas: a) soldadas, b) rebatadas e c) adesivas (Pinto 2007)..	7
Figura 2 – Esforços de tração (a) e compressão (b), distribuição da tensão de tração e compressão (c) (Pinto 2007).....	9
Figura 3 – Esforços de corte (a) e distribuição da tensão de corte (b) (Pinto 2007). ....	10
Figura 4 – Efeito do comprimento e da largura de sobreposição na resistência ao corte (da Silva et al. 2007).....	10
Figura 5 – Esforços de clivagem (a) e arrancamento (b), distribuição da tensão de clivagem e compressão (c) (Pinto 2007). ....	11
Figura 6 – Modos de rotura em juntas adesivas. ....	12
Figura 7 – Classificação dos processos de soldadura por fusão (Santos e Quintino 1993a). ....	13
Figura 8 – Diagrama de funcionamento de soldadura por pontos (Khan e Pandey 2013). ....	16
Figura 9 – Modos de rotura de uma junta aparafusada de sobreposição simples quando submetida a forças de tração: (a) rotura da secção transversal resistente, (b) rotura por rasgamento da peça, (c) rotura por corte do parafuso, (d) rotura por esmagamento da peça. ....	17
Figura 10 – Junta de sobreposição simples segundo a análise linear elástica (da Silva et al. 2009a). ....	26
Figura 11 – Distribuição das tensões de corte no modelo de Volkersen (da Silva et al. 2009a). ....	26
Figura 12 – Alinhamento das forças aplicadas devido à rotação da junta.....	27
Figura 13 – Modelo de Goland e Reissner (da Silva et al. 2009a). ....	27
Figura 14 – Distribuição do momento fletor considerado para cálculo do fator $K$ no modelo de: (a) Hart-Smith e (b) Goland e Reissner (van Ingen e Vlot 1993). ....	28
Figura 15 – Modelo elasto-plástico de Hart-Smith (Rodríguez et al. 2011). ....	28
Figura 16 – Efeito de Poisson tridimensional (efeito anti-clástico) numa junta de sobreposição simples (da Silva et al. 2009a). ....	30
Figura 17 – Três diferentes modos de propagação de uma fenda (Zeng 2015). ....	37
Figura 18 – Zona de processo de fratura à frente da ponta da fenda (a) e zona coesiva equivalente (b). ....	39
Figura 19 – Representação esquemática da zona do processo de dano numa junta adesiva e a correspondente lei de tração-separação bi-linear. ....	40
Figura 20 – Aplicação de elementos coesivos em conjunto com elementos de volume (contínuos) (Kregting 2005). ....	41
Figura 21 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura com espessura nula: aproximação local (a) e para a modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (da Silva e Campilho 2012b). ....	42
Figura 22 – Lei coesiva triangular (Chen 2013). ....	43

Figura 23 – Juntas híbridas adesivas-soldadas na carroçaria de um automóvel (Bartczak et al. 2013). .....	46
Figura 24 – Técnicas de fabrico de juntas adesivas-soldadas: (a) <i>weld-through</i> e (b) <i>flow-in</i> (da Silva et al. 2011).....	47
Figura 25 – Junta de sobreposição simples adesiva-soldada (da Silva et al. 2011).....	48
Figura 26 – Representação esquemática de uma junta T-peel adesiva-soldada. ....	49
Figura 27 – Junta adesiva aparafusada em estrutura de automóvel (E.A.A 2015). ....	51
Figura 28 – Representação esquemática de uma junta híbrida adesiva-aparafusada com a técnica parafuso/fêmea (Fu e Mallick 2001). ....	51
Figura 29 – Junta híbrida de sobreposição simples adesiva-rebitada (Sadowski et al. 2011). ....	52
Figura 30 – Secção longitudinal de uma junta híbrida adesiva-cravada (Balawender et al. 2011)..	52
Figura 31 – Curvas $\sigma$ - $\varepsilon$ à tração do aço DIN C45E (Marques 2014).....	55
Figura 32 – Rotura similar nos 5 provetes de aço DIN C45E submetidos ao ensaio de tração. ....	56
Figura 33 – Curvas $\sigma$ - $\varepsilon$ de provetes maciços do adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138 (Moreira 2013). ....	57
Figura 34 – Curvas $\sigma$ - $\varepsilon$ de provetes maciços do adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015.....	58
Figura 35 – Curvas $\sigma$ - $\varepsilon$ de provetes maciços de Sikaforce <sup>®</sup> 7752. ....	59
Figura 36 – Dimensões e geometria das juntas T-peel.....	60
Figura 37 – Provetes cortados e quinados. ....	61
Figura 38 – Granalhagem mecânica dos provetes. ....	61
Figura 39 – Aderentes após granalhagem, limpeza das superfícies de ligação e colocação de fio de 0,2 mm de diâmetro ao longo da superfície de colagem. ....	62
Figura 40 – Pesagem das massas de resina e endurecedor para o adesivo Sikaforce <sup>®</sup> 7752.....	62
Figura 41 – Juntas adesivas com alicates de pressão dispostas horizontalmente sobre placa plana protegida com Teflon <sup>®</sup> . ....	63
Figura 42 – Aplicação de ponto de soldadura nas juntas híbridas.....	63
Figura 43 – Remoção de excesso de adesivo depois de curado. ....	64
Figura 44 – Máquina de ensaios Shimadzu <sup>®</sup> AG-X 100 e computador de aquisição de dados. ....	65
Figura 45 – Provetes de uma junta soldada após rotura total. ....	66
Figura 46 – Curvas $P$ - $\delta$ experimentais das juntas soldadas. ....	67
Figura 47 – Modo de rotura nas juntas coladas com o Araldite <sup>®</sup> AV138. ....	67
Figura 48 – Curvas $P$ - $\delta$ experimentais das juntas adesivas coladas com o Araldite <sup>®</sup> AV138.....	68
Figura 49 – Modo de rotura nas juntas híbridas coladas com o Araldite <sup>®</sup> AV138. ....	69
Figura 50 – Curvas $P$ - $\delta$ experimentais das juntas híbridas com o Araldite <sup>®</sup> AV138. ....	69
Figura 51 – Início do rompimento do aderente pelo contorno do ponto de soldadura. ....	70
Figura 52 – Afastamento máximo das zonas de rompimento pelo contorno do ponto de soldadura. .....	71
Figura 53 – Rompimento total do aderente por efeito de arrancamento de material. ....	72
Figura 54 – Modo de rotura nas juntas coladas com o Araldite <sup>®</sup> 2015. ....	72
Figura 55 – Curvas $P$ - $\delta$ experimentais das juntas adesivas com o Araldite <sup>®</sup> 2015. ....	73

Figura 56 – Modo de rotura nas juntas híbridas com o Araldite® 2015. ....	74
Figura 57 – Curvas $P-\delta$ experimentais das juntas híbridas com o Araldite® 2015. ....	75
Figura 58 – Modo de rotura nas juntas coladas com o Sikaforce® 7752. ....	75
Figura 59 – Curvas $P-\delta$ experimentais das juntas adesivas com o Sikaforce® 7752. ....	76
Figura 60 – Modo de rotura nas juntas híbridas com o Sikaforce® 7752. ....	77
Figura 61 – Curvas $P-\delta$ experimentais das juntas híbridas com o Sikaforce® 7752. ....	78
Figura 62 – Valores experimentais médios de $P_{\max}$ e respetivo desvio padrão para todas as configurações de juntas estudadas. ....	79
Figura 63 – Condições fronteira impostas nas juntas adesivas e híbridas. ....	82
Figura 64 – Condições fronteira impostas nas juntas soldadas. ....	83
Figura 65 – Detalhes da malha de MEF para a análise de resistência das juntas adesivas. ....	84
Figura 66 – Detalhes da malha de MEF para análise de tensões das juntas adesivas. ....	85
Figura 67 – Detalhes da malha de MEF para as análise de resistência das juntas híbridas. ....	87
Figura 68 – Detalhes da malha de MEF para as análise de tensões das juntas híbridas. ....	89
Figura 69 – Lei coesiva triangular em modo puro e modo misto (Khoramishad et al. 2010). ....	91
Figura 70 – Distribuição de tensões $\sigma_y$ a meio da espessura do adesivo em função de $x/L$ para as juntas adesivas. ....	97
Figura 71 – Distribuição de tensões $\tau_{xy}$ a meio da espessura do adesivo em função de $x/L$ para as juntas adesivas. ....	98
Figura 72 – Distribuição de tensões $\sigma_y$ a meio da espessura do adesivo em função de $x/L$ para as juntas híbridas e soldadas. ....	100
Figura 73 – Distribuição de tensões $\tau_{xy}$ a meio da espessura do adesivo em função de $x/L$ para as juntas híbridas e soldadas. ....	101
Figura 74 – Comparação da curva obtida numericamente com as curvas experimentais para juntas soldadas. ....	102
Figura 75 – Comparação da curva obtida numericamente com as curvas experimentais para juntas adesivas com o Araldite® AV138. ....	103
Figura 76 – Comparação da curva obtida numericamente com as curvas experimentais para juntas híbridas com o Araldite® AV138. ....	104
Figura 77 – Comparação da curva obtida numericamente com as curvas experimentais para juntas adesivas com o Araldite® 2015. ....	105
Figura 78 – Comparação da curva obtida numericamente com as curvas experimentais para juntas híbridas com o Araldite® 2015. ....	105
Figura 79 – Comparação da curva obtida numericamente com as curvas experimentais para juntas adesivas com o Sikaforce® 7752. ....	106
Figura 80 – Comparação da curva obtida numericamente com as curvas experimentais para juntas híbridas com o Sikaforce® 7752. ....	107
Figura 81 – Valores experimentais médios de $P_{\max}$ com respetivo desvio padrão (a cheio) e valores de $P_{\max}$ obtidos numericamente (com fundo branco). ....	108



## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens das ligações soldadas. ....	14
Tabela 2 – Classificação dos processos de soldadura por resistência (Santos e Quintino 1993b). ..	15
Tabela 3 – Vantagens e desvantagens do processo de soldadura de resistência por pontos (Santos e Quintino 1993b). ....	16
Tabela 4 – Classificação dos adesivos segundo o seu desempenho (de Moura et al. 2009b). ....	19
Tabela 5 – Propriedades típicas dos adesivos estruturais (Pinto 2007).....	21
Tabela 6 – Resumo das considerações mais significativas nas teorias de diversos autores (van Ingen e Vlot 1993).....	29
Tabela 7 – Critérios de rotura testados por da Silva et al. (2009b) em vários modelos analíticos ( $\tau$ - tensão de corte, $\tau_r$ - rotura ao corte, $\sigma$ - tensão de arrancamento ( <i>peel</i> ), $\sigma_r$ - tensão de rotura, $\gamma$ - deformação ao corte, $\gamma_p$ - deformação plástica ao corte, $\varepsilon_e$ - deformação de von Misses equivalente, $\varepsilon_r$ - deformação de rotura à tração, GY ( <i>global yielding</i> ou cedência global no adesivo) (da Silva et al. 2009b). ....	32
Tabela 8 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 (Neto et al. 2012). ....	57
Tabela 9 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 (Campilho et al. 2013). ....	58
Tabela 10 – Propriedades mecânicas do adesivo Sikaforce 7752® (Faneco 2014). ....	59
Tabela 11 – Dimensões das zonas de malha, tipo de malha, refinamento e distribuição dos elementos na análise da resistência das juntas adesivas. ....	84
Tabela 12 – Dimensões das zonas de malha, tipo de malha, refinamento e distribuição dos elementos na análise de tensões das juntas adesivas. ....	86
Tabela 13 – Dimensões das zonas de malha, tipo de malha, refinamento e distribuição dos elementos na análise da resistência das juntas híbridas. ....	88
Tabela 14 – Dimensões das zonas de malha, tipo de malha, refinamento e distribuição dos elementos na análise de tensões das juntas híbridas. ....	90
Tabela 15 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo de Araldite® 2015 com uma espessura de 0,2 mm. ....	93
Tabela 16 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com uma espessura de 0,2 mm. ....	94
Tabela 17 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7752 com uma espessura de 0,2 mm. ....	95



## *Nomenclatura*

### Caracteres Romanos

$\bar{p}$  – Tensão por unidade de largura

$a$  – Distância do centro do ponto de soldadura à extremidade da junta segundo  $xx$

$b$  – Distância do centro do ponto de soldadura à extremidade da junta segundo  $yy$

$c$  – Comprimento livre

$E$  – Módulo de Young

$F, P$  – Força

$G$  – Módulo de corte

$G_c$  – Tenacidade à fratura, energia crítica coesiva

$G_{IC}$  – Tenacidade à tração,

$G_{IIC}$  – Tenacidade ao corte

$K$  – Fator de correção do momento fletor, rigidez coesiva inicial

$K'$  – Fator de correção do esforço transversal

$K^\delta$  – Resistência coesiva atual

$L, l$  – Comprimento de sobreposição

$L_t$  – Comprimento entre amarras

$M$  – Momento fletor

$M$  – Momento fletor

$P_{\max}$  – Força máxima

$R$  – Raio de curvatura

$t$  – Tensão, resistência atual

$t^0$  – Resistência coesiva

$t_A$  – Espessura do adesivo

$t_A$  – Espessura do adesivo

$T_g$  – Temperatura de transição vítrea

$t_m^0$  – Resistência máxima em modo misto

$t_n$  – Componente de tensão normal

$t_n^0$  – Resistência máxima em tração

$t_s$  – Componente de tensão ao corte

$t_s$  – Espessura do aderente

$t_s$  – Espessura do substrato

$t_s^0$  – Resistência máxima em corte

$V$  – Esforço transversal

#### Caracteres Gregos

$\nu$  – Coeficiente de Poisson

$\delta$  – Separação, Deslocamento

$\delta^0$  – Separação na resistência máxima

$\delta^f$  – Separação completa

$\delta_m^f$  – Deslocamento de rotura em modo misto

$\varepsilon$  – Deformação

$\varepsilon_r$  – Deformação de rotura, Deformação de rotura á tração

$\sigma$  – Tensão

$\varepsilon_e$  – Deformação de von Misses equivalente

$\varepsilon_r$  – Deformação de rotura à tração

$\gamma$  – Deformação ao corte

$\gamma_p$  – Deformação plástica ao corte

$\sigma_{\text{elast}}$  – Tensão de limite elástico

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

$\sigma_{\text{rot}}$  – Tensão de rotura, Tensão de rotura à tração

$\sigma_{y \text{ avg}}$  – Tensões de arrancamento média

$\sigma_y$  – Tensão de arrancamento (*peel*)

$\tau_{\text{avg}}$  – Tensão de corte média

$\tau_r$  – Rotura ao corte

$\tau_{xy}, \tau$  – Tensão de corte

#### Abreviaturas

2D – Duas dimensões

3D – Três dimensões

ASTM – *American Society of Testing and Materials*

CZM – *Cohesive Zone Models*

DCB – *Double-Cantilever Beam*

ENF – *End-Notched Flexure*

FEM – *Finite Element Method*

GY – *Global yielding*

MDC – *Modelo de Dano Coesivo*

MEF – *Método de Elementos Finitos*

PRF – *Plástico reforçado com fibras*

RSW – *Resistance spot welding*

TAST – *Thick adherend shear test*

UV – *Ultra Violeta*

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

A ligação entre componentes é geralmente feita por uniões mecânicas, soldadas ou adesivas. A ligação com adesivos é uma técnica de ligação que se encontra em crescimento para estruturas com elevado grau de exigência ao nível da segurança (indústria aeronáutica, aeroespacial, automóvel, entre outras). Entre as suas vantagens destacam-se a distribuição de tensões mais uniforme (aumento da área de contacto), uma vez que não são necessários furos ou superfícies soldadas. O aumento da resistência, o melhor comportamento à fadiga, a redução de peso, resistência à corrosão são outras vantagens que este tipo de junta oferece comparativamente às uniões tradicionais. Contudo, a concentração de tensões nas extremidades da junta devido à deformação diferencial dos aderentes na zona da sobreposição, e também os desalinhamentos de esforços, apresentam-se como as principais desvantagens das juntas adesivas. A técnica de ligação híbrida combina a ligação adesiva com outras técnicas de união (aparafusadas, rebitadas e soldadas), permitindo combinar sinergicamente as vantagens individuais de cada ligação. Esta técnica tem sido considerada para melhorar a resistência das juntas quando estas estão sujeitas a esforços estáticos ou à fadiga. Considerando as juntas adesivas-soldadas, o aumento da resistência mecânica tornou possível a diminuição do comprimento de sobreposição ( $L$ ) das juntas, enquanto outras vantagens são o isolamento acústico, absorção de vibrações e também uma melhor transmissão de esforços na zona interna da ligação. A ideia é que, quando o adesivo falhar, a ligação soldada poderia manter a ligação intacta por um período adicional de tempo de forma a evitar uma falha catastrófica. As juntas adesivas T-peel possuem uma geometria que as torna vulneráveis a esforços de tração, uma vez que geram na junta adesiva esforços de arrancamento. Este tipo de juntas em termos construtivos permite ligar elementos topo a topo, que é uma configuração que ocorre com bastante frequência na indústria. Assim, ao

transformar uma junta T-peel adesiva numa junta T-peel híbrida pela adição de um ponto de soldadura, a sua resistência ao arrancamento vai aumentar drasticamente. Existem na literatura poucos estudos acerca do comportamento mecânico destas juntas. Apesar de estas envolverem alguma complexidade, é de extrema importância o estudo da previsão da sua resistência. A existência de métodos numéricos capazes de prever a resistência das juntas com elevada precisão pode levar a uma poupança de recursos e de tempo na análise da resistência destas e na seleção do adesivo mais adequado para uma dada aplicação.

## **1.2 Objetivos**

Este trabalho teve como principal objetivo o estudo comparativo entre as técnicas de união convencionais por adesivos ou soldadura por pontos, e a técnica de união adesiva-soldada, em juntas com configuração T-peel. Pretende-se também compreender a influência do ponto de soldadura assim como o tipo de adesivo na resistência da ligação. Numericamente, é averiguada a capacidade dos MDC em conjunto com o Método de Elementos Finitos (MEF) na previsão de resistência destas juntas. Para o estudo da influência do tipo de adesivo, foram selecionados para o efeito os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. Foi feita uma comparação de resultados a partir das curvas  $P-\delta$ , modos de rotura e resistência das juntas. Os resultados experimentais foram comparados com análises numéricas detalhadas pelo MEF em conjunto com MDC. Foi ainda realizada uma análise das tensões de arrancamento e de corte na camada adesiva e analisadas as variações e a influência destas na resistência das juntas. No estudo por MDC, os modelos basearam-se numa relação linear entre tensões e deslocamentos de forma a simular o comportamento elástico do material até à resistência máxima e subsequentemente degradação das propriedades dos materiais até à rotura. Com a realização destas análises vai ser possível estimar capacidade desta técnica para avaliar o desempenho das juntas adesivas e juntas T-peel adesivas-soldadas sem ter a necessidade de realizar ensaios experimentais para 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**

Neste primeiro capítulo é enquadrado o tema abordado nesta dissertação, são definidos os objetivos do trabalho e também descrita a estrutura e tópicos abordados nesta dissertação.

No capítulo 2 aborda-se os conceitos fundamentais sobre os temas abordados no contexto das ligações adesivas, a sua evolução histórica, as suas propriedades, os tipos de esforços mais comuns a que estão sujeitas e vantagens e desvantagens das juntas adesivas. São discutidos os tipos de adesivos, diferentes formas de os classificar, os esforços mais comuns e os modos de rotura de uma ligação adesiva. São apresentadas outras técnicas de ligações de componentes e a suas vantagens e desvantagens. Caracterizam-se ainda as técnicas mais comuns de análise da resistência para juntas adesivas assim como os mais importantes critérios de rotura usados nas mesmas. São apresentadas também as mais importantes técnicas de ligações híbridas usadas na atualidade e assim como as suas propriedades e resistência.

No capítulo 3, relativa à parte experimental realizada, apresentam-se as propriedades dos materiais (aderentes e adesivos) relevantes para a análise numérica. As referidas propriedades são referentes a trabalhos anteriores, com exceção do aço usado como material dos aderentes. É também feita uma abordagem sobre as configurações de junta a testar, bem como todo o procedimento realizado para o fabrico das mesmas. São definidas as condições de ensaio utilizadas para a realização dos ensaios à tração dos provetes e também os parâmetros na máquina de soldadura por pontos para o fabrico das juntas híbridas. De seguida apresentam-se os modos de rotura das juntas com as várias configurações de ligação, explicando com mais detalhe todo o processo envolvente. Referem-se também as curvas  $P-\delta$  para todas as configurações, incluindo os três adesivos. Realizou-se uma comparação entre a resistência máxima obtida para as juntas adesivas, soldadas e híbridas, discutindo a influência das propriedades do adesivo para as várias configurações e a relação entre a resistência observada e o processo de rotura das mesmas. Na parte final do capítulo apresenta-se uma análise comparativa da resistência obtida experimentalmente de todas as configurações de junta em estudo.

No capítulo 4, referente ao trabalho numérico levado a cabo, é efetuada uma abordagem das condições de análise numérica impostas no *software* ABAQUS® para o método MDC e realizada uma análise de tensões de corte e de arrancamento das juntas. Esta análise de tensões permitirá uma discussão mais aprofundada dos comportamentos de resistência obtidos para as várias configurações de junta, bem como para os 3 adesivos. No final deste capítulo apresenta-se uma análise comparativa da resistência obtida experimentalmente e numericamente de todas as configurações de junta estudadas.

No último capítulo, o capítulo 5, são apresentadas as conclusões retiradas de todo o trabalho e é feita referência a possíveis trabalhos futuros.

# 2 Revisão Bibliográfica

## 2.1 Técnicas de união entre componentes

### 2.1.1 Ligações adesivas

Olhando retrospectivamente para a história da adesão é difícil estabelecer quando ou onde tudo começou, uma vez que é impossível saber quando a colagem foi utilizada pela primeira vez. Todavia, uma das primeiras técnicas usadas para construir artefactos foi obviamente a ligação adesiva. Foram encontradas algumas ferramentas da era Neandertal com resíduos de uma substância adesiva, obtida da resina de bétula, nas Montanhas Harz em Koenigsau na Alemanha, datadas de há 80.000 anos (Adams 2005). Os papiros, folhas de material vegetal que possibilitaram o desenvolvimento da escrita no antigo Egito, eram raízes amassadas e distribuídas em camadas aplicadas de material adesivo. Este adesivo possibilitava a união das diversas camadas, aumentando a sua durabilidade, permitindo que fossem marcadas, escritas e desenhadas com tintas especiais e enroladas para uso futuro. Ainda existem hoje em dia papiros em perfeitas condições, garantindo a transmissão de informações por muitos séculos (Pizzi e Mittal 2003). Os adesivos naturais foram desenvolvidos e utilizados de diversas formas em diversas culturas. Porém, o grande avanço deu-se a partir da Segunda Grande Guerra Mundial para atender às necessidades geradas pela falta dos materiais tradicionais. A indústria aeronáutica tem sido a principal responsável pelo desenvolvimento de juntas adesivas estruturais, mas nem sempre com resultados positivos.

No início do século XX foram desenvolvidas aeronaves utilizando adesivos baseados em caseína, que é um material polimérico natural (derivado do leite). Estes adesivos naturais funcionavam bem exceto quando submetidos a ambientes húmidos (da Silva et al. 2007). Após absorção de água, estes adesivos perdiam resistência mecânica e exalavam odores desagradáveis. No entanto, esses odores permitiram aos engenheiros da época detetar quando o adesivo estava deteriorado, o que constituiu uma forma primitiva de controlo não destrutivo

da qualidade da ligação. O problema da fraca durabilidade dos adesivos baseados em produtos naturais foi ultrapassado pela introdução de adesivos sintéticos poliméricos nos anos 40 do século XX. Por exemplo, na Segunda Guerra Mundial o famoso caça britânico Mosquito usava uma resina de ureia-formaldeído para colar a sua estrutura de madeira. Este tipo de adesivo era no entanto muito frágil e fraturava com facilidade. O problema da fragilidade dos primeiros adesivos usados foi ultrapassado também nos anos 40 por de Bruyne (1957) e seus colegas, que modificaram a química dos adesivos adicionando polímeros com uma boa tenacidade. Dá-se como exemplo a combinação de polivinilo formal com resol fenólico. Esta invenção representou um desenvolvimento muito importante na tecnologia dos adesivos e permitiu a ligação de materiais metálicos e de madeira com muito sucesso. Foi assim possível projetar a fuselagem metálica dos aviões com baixo peso e uma boa rigidez e resistência (da Silva et al. 2007). Os trabalhos pioneiros de engenheiros britânicos nos anos 40 e 50 deram origem a que hoje todos os aviões usem adesivos na sua estrutura. Os adesivos atuais são todos baseados em polímeros sintéticos tais como os fenólicos, os epóxidos, os acrílicos e os uretanos (da Silva et al. 2007).

A indústria aeronáutica permitiu desenvolver substancialmente as ligações adesivas e hoje a sua aplicação noutras indústrias é cada vez mais comum e diversificada. A indústria automóvel é um bom exemplo desta generalização. A preocupação em reduzir o peso do automóvel para reduzir os consumos e aumentar as velocidades obrigou à utilização de materiais mais leves, como o alumínio ou plástico reforçado com fibras. Sendo estes materiais difíceis de ligar pelos métodos tradicionais de ligação, os adesivos podem constituir-se como o método preferido de ligação. Com a tendência cada vez mais acentuada da substituição dos materiais metálicos em aplicações estruturais por materiais compósitos, o sucesso destes novos materiais está também dependente do desenvolvimento tecnológico e conhecimento do comportamento das ligações adesivas.

#### **2.1.1.1 Vantagens e inconvenientes**

A ligação adesiva, vulgarmente designada por colagem, ocupa um papel relevante no domínio dos processos de ligação, pois apresenta uma série de vantagens quando comparada com outros métodos tradicionais de ligação tais como a soldadura, aparafusamento, rebiteagem e outras ligações mecânicas.

O adesivo teoricamente distribui as cargas e tensões sobre a área total da união, ao contrário de concentrá-las apenas nalguns pontos, resultando numa distribuição mais uniforme de

cargas estáticas e dinâmicas. Desta forma, a montagem com adesivos é mais resistente à flexão do que, por exemplo, a montagem com rebites (Adams 2005). A Figura 1 compara as distribuições de tensões numa junta rebitada, soldada e adesiva.

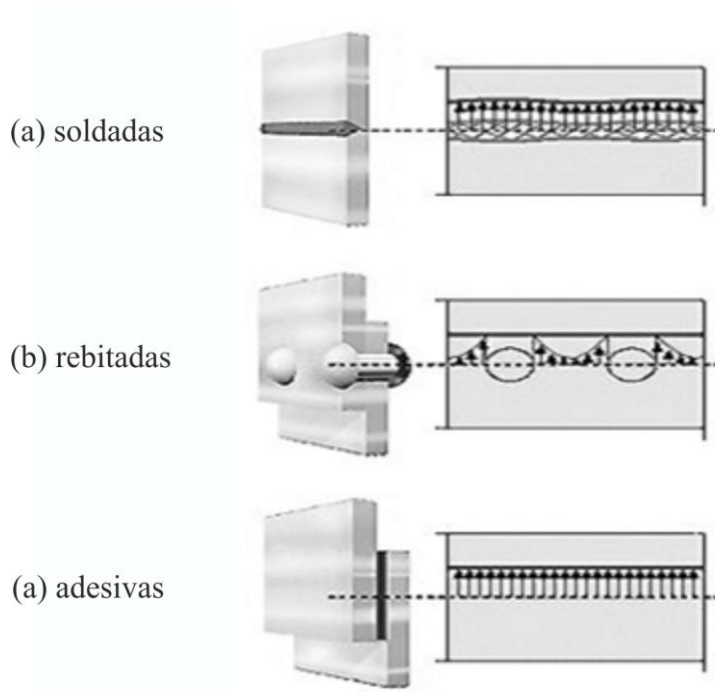


Figura 1 – Distribuição de tensões em juntas: a) soldadas, b) rebitadas e c) adesivas (Pinto 2007).

Nas juntas rebitadas ou aparafusadas, as concentrações de tensões que ocorrem na proximidade dos furos quando a montagem está sobre carga podem levar à rotura prematura do material. As propriedades viscoelásticas do adesivo aumentam o amortecimento de vibrações, o que permite que as tensões sejam parcialmente absorvidas e assim melhorar a resistência à fadiga dos componentes ligados (Ebnesajjad e Landrock 2014). Na ligação adesiva não há alterações estruturais das propriedades dos aderentes porque, ao contrário da soldadura, não há o uso de elevadas temperaturas. As ligações adesivas permitem ao projetista selecionar e combinar um maior número de materiais, de modo que a combinação das suas propriedades seja utilizada para a obtenção do melhor resultado possível. Este tipo de ligação permite também uma menor alteração aos contornos da ligação, o que resulta numa melhor aerodinâmica das superfícies externas e melhor aparência do produto (Adams 2005). Devido à capacidade de unir materiais distintos (por exemplo, metais com compósitos), as ligações adesivas permitem obter estruturas mais leves e rígidas. Devido à ausência de componentes mecânicos de ligação, as juntas adesivas têm melhores propriedades de resistência à corrosão. Permitem também unir eficientemente materiais de espessuras finas e o fabrico de formas

complexas. Outro aspeto importante é a capacidade de poder funcionar simultaneamente como elemento ligante e vedante.

Apesar das suas vantagens, existem algumas desvantagens na utilização dos adesivos e, para as minimizar, é necessário um projeto da ligação que elimine ao máximo as forças de arrancamento (principal inimigo das ligações adesivas), clivagem e impacto. Quando um dos dois materiais não é rígido, a ligação pode estar sujeita a forças de arrancamento e quando os dois materiais são rígidos, a ligação pode estar sujeita a forças de clivagem (Petrie 1999). Assim, é importante usar geometrias que evitem tensões localizadas e que garantam uma distribuição o mais uniforme possível de tensões de forma a minimizar os esforços de arrancamento e clivagem. Podem ocorrer também tensões residuais resultantes dos diferentes coeficientes de expansão térmica do aderente e adesivo. Uma das principais limitações da generalidade das ligações adesivas reside nos pré-tratamentos, por vezes complexos, morosos e dispendiosos, que são necessários realizar para garantir uma boa adesão e durabilidade da ligação. As ligações adesivas apresentam também resistência limitada a condições extremas, tais como o calor e a humidade, devido à natureza polimérica do adesivo (da Silva et al. 2007). A ligação não é normalmente realizada instantaneamente, o que obriga à utilização de ferramentas de fixação para manter as peças em posição, podendo esta ser uma grande desvantagem económica. As ligações adesivas não podem ser separadas posteriormente, de tal forma que qualquer alteração da estrutura requer a destruição da ligação, aumentando também desta forma os custos. Outro aspecto importante que importa referir relaciona-se com os problemas de toxicidade e inflamabilidade que as ligações adesivas podem apresentar, quer durante o processo de fabrico quer em funcionamento. Um dos grandes problemas que inviabiliza a utilização mais frequente de adesivos estruturais é o facto de não haver um critério de dimensionamento universal que permita projetar qualquer estrutura. Existem muitos critérios, mas que funcionam bem apenas em determinadas situações (da Silva e Campilho 2012b).

#### **2.1.1.2 Tipos de esforços mais comuns**

Os tipos de esforços que podem estar presentes numa junta adesiva são:

- Tração;
- Compressão;
- Corte;

- Clivagem;
- Arrancamento (*peel*).
- Esforços de tração e compressão

Os esforços de tração atuam perpendicularmente ao plano da junta, dando origem a tensões normais que se distribuem uniformemente através do comprimento de colagem (Figura 2 (a)). Contudo, em juntas coladas a distribuição destas tensões não é uniforme (Figura 2 (c)), porque aparecem picos de tensões de clivagem ou de arrancamento nas extremidades da zona de sobreposição. Os esforços de compressão tendem a comprimir um aderente contra o outro (Figura 2 (a)). Neste caso, a distribuição da tensão pelo adesivo é constante, tal como acontece para a tração (Figura 2 (c)). De facto, uma junta em compressão pura praticamente não precisa de adesivo (Petrie 1999).

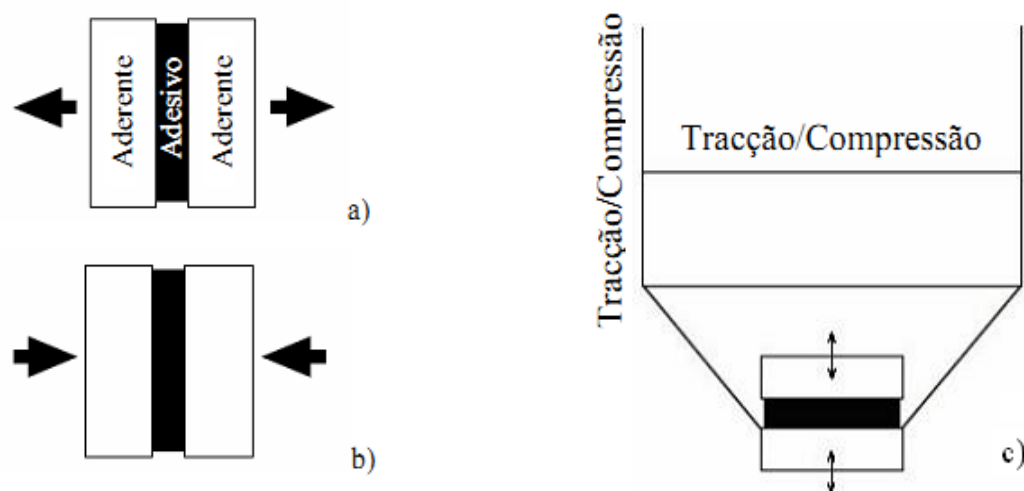


Figura 2 – Esforços de tração (a) e compressão (b), distribuição da tensão de tração e compressão (c) (Pinto 2007).

- Esforços de corte

As solicitações de corte provocam o escorregamento entre os dois aderentes (Figura 3 (a)). A distribuição da tensão de corte no caso de uma junta de sobreposição simples encontra-se na Figura 3 (b). Note-se que as extremidades da junta estão sujeitas a um maior nível de tensões relativamente à parte central da ligação (da Silva e Adams 2007, Taib et al. 2006). Este comportamento deve-se ao efeito de deformação diferencial de cada um dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição, uma vez que cada aderente se deforma

longitudinalmente a uma taxa crescente desde a sua extremidade livre até à extremidade oposta da sobreposição (Adams et al. 1997, Mahdi et al. 2003, Volkersen 1938). Este efeito torna-se mais marcante com o aumento do comprimento de sobreposição (Czarnocki e Piekarski 1986, Reis et al. 2005). Por este motivo, a largura da sobreposição é mais importante do que o seu comprimento. De facto, tal como mostra a Figura 4, um aumento da largura da ligação torna a junta mais resistente, porque aumenta a área em cada um dos extremos da zona de sobreposição, que corresponde aos locais onde o nível de tensões é mais elevado. Contudo, um aumento do comprimento de sobreposição provoca um aumento da resistência da junta mas a uma taxa decrescente, devido ao efeito mais acentuado de deformação diferencial dos aderentes (Adams et al. 1997).

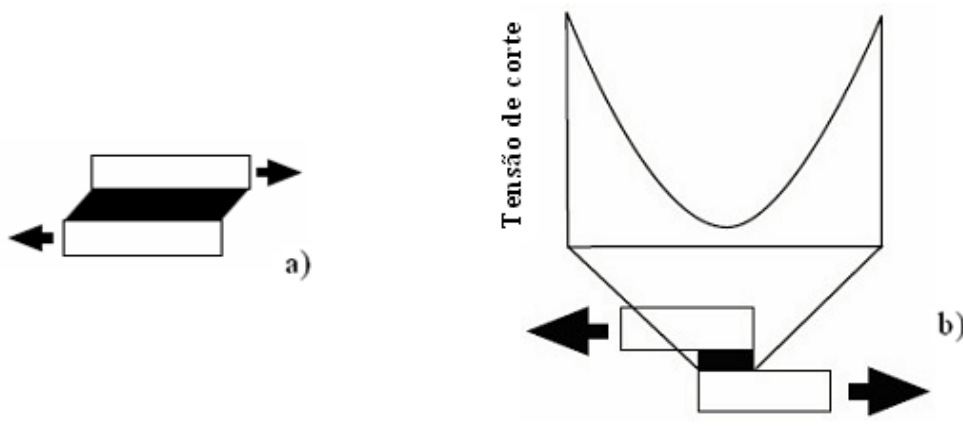


Figura 3 – Esforços de corte (a) e distribuição da tensão de corte (b) (Pinto 2007).

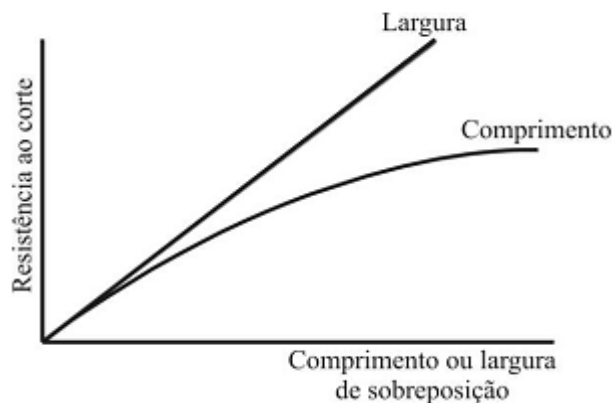


Figura 4 – Efeito do comprimento e da largura de sobreposição na resistência ao corte (da Silva et al. 2007)

- Esforços de clivagem e arrancamento (*peel*)

A clivagem é uma sollicitação que ocorre quando forças na extremidade de uma junta rígida atuam de modo a separar os aderentes. É provocada por forças trativas aplicadas na extremidade do aderente e perpendicularmente ao plano da junta (Figura 5 (a)). Neste caso, existe uma forte concentração de tensões na extremidade da junta que está sujeita às forças de clivagem (Figura 5 (c)).

Os esforços de arrancamento são um caso bastante idêntico à clivagem. No entanto, no caso do arrancamento, um ou os dois aderentes são bastante flexíveis e podem deformar plasticamente por ação das forças aplicada (Figura 5 (b)), o que leva à concentração das forças trativas numa zona muito mais localizada numa das extremidades da ligação (Figura 5 (c)).

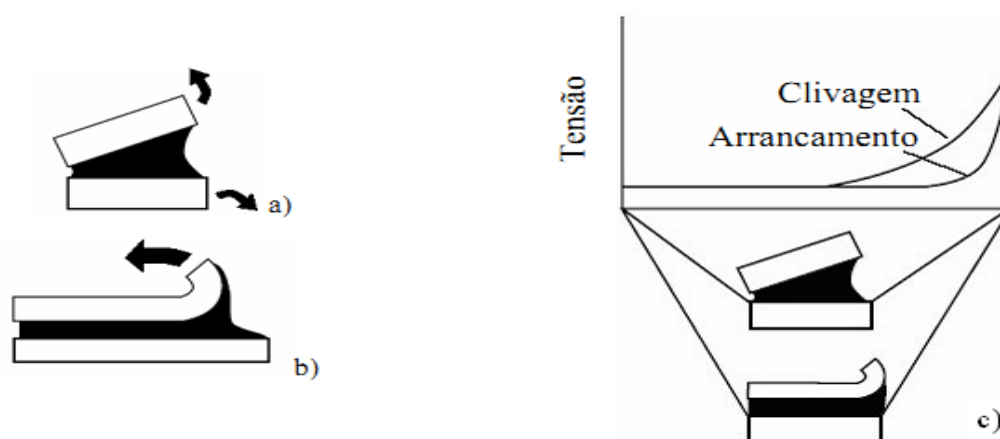


Figura 5 – Esforços de clivagem (a) e arrancamento (b), distribuição da tensão de clivagem e compressão (c) (Pinto 2007).

Os esforços de clivagem e arrancamento devem, sempre que possível, ser evitados em juntas adesivas, devendo-se utilizar configurações que suportem maioritariamente esforços de corte (Das et al. 2008, Osnes e Andersen 2003).

### 2.1.1.3 Modos de rotura

A norma ASTM (D5573-99) classifica os modos de rotura em juntas de plástico reforçado com fibras (PRF). Esta norma prevê sete modos de rotura. Contudo, os mais frequentes são os que se apresentam na Figura 6.

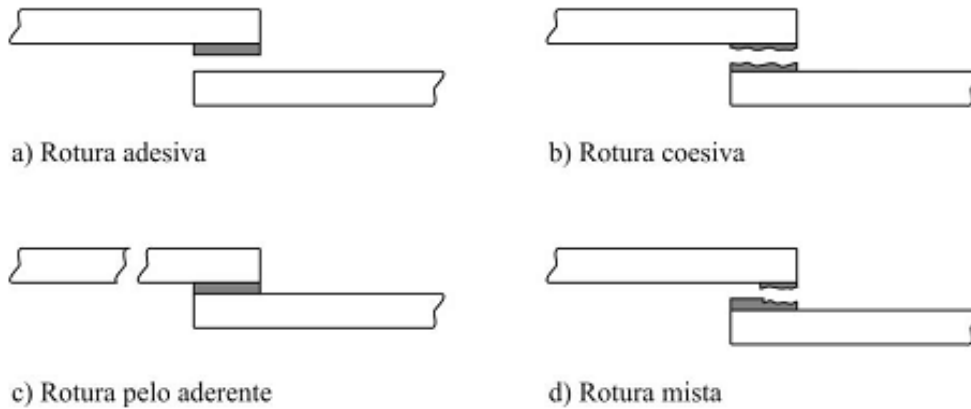


Figura 6 – Modos de rotura em juntas adesivas.

A rotura coesiva ocorre quando a ligação entre o adesivo e o aderente é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo. Neste caso, as superfícies de rotura estão ambas cobertas por adesivo. Também pode ocorrer rotura coesiva do aderente, mas este modo de rotura é geralmente conhecido como rotura do aderente. A rotura adesiva ocorre na interface entre o adesivo e um dos aderentes. Após rotura, verifica-se que a superfície de um dos aderentes não apresenta resíduos de adesivo. A superfície de rotura do outro aderente apresenta-se coberta de adesivo. Neste caso ocorre falha na adesão entre o adesivo e a superfície do aderente. Segundo alguns autores, a rotura adesiva só ocorre se houver má preparação das superfícies. Todavia, trabalhos recentes (Gonçalves et al. 2002, Vallée et al. 2006) mostraram que, em juntas coladas de sobreposição simples, existe variação de tensões de arrancamento e de corte ao longo da espessura do adesivo, e que os valores máximos destas tensões ocorrem junto da interface. Isto pode explicar o aparecimento de uma rotura adesiva.

O modo de rotura preferencial é a rotura coesiva no adesivo ou no aderente, uma vez que se está a utilizar a totalidade da resistência dos materiais constituintes da junta. A rotura de um dos aderentes é demonstrativa de uma junta bem concebida, nomeadamente se a carga de rotura corresponder à resistência nominal do aderente.

A rotura mista consiste numa combinação de rotura adesiva e rotura coesiva, tal como mostra a Figura 6 (d). Por vezes, este modo de rotura deve-se à limpeza ineficaz numa dada região das superfícies a ligar, ou mesmo ao próprio adesivo (Petrie 1999).

### 2.1.2 Ligações soldadas

As ligações soldadas são um dos processos mais importantes usados na ligação de metais. A origem da soldadura como tecnologia de união de materiais metálicos remonta à idade do

bronze, em que as peças eram unidas por pressão depois de ser aplicada uma quantidade de calor adequada nas superfícies a unir.

Desde a invenção do eletrodo de carvão em 1885 por Bernardos Olszewski para criar o arco elétrico, a soldadura por fusão sofreu várias transformações até aos dias de hoje, dando origem a diversas variantes do processo, classificadas de acordo com a Figura 7 (Santos e Quintino 1993a).

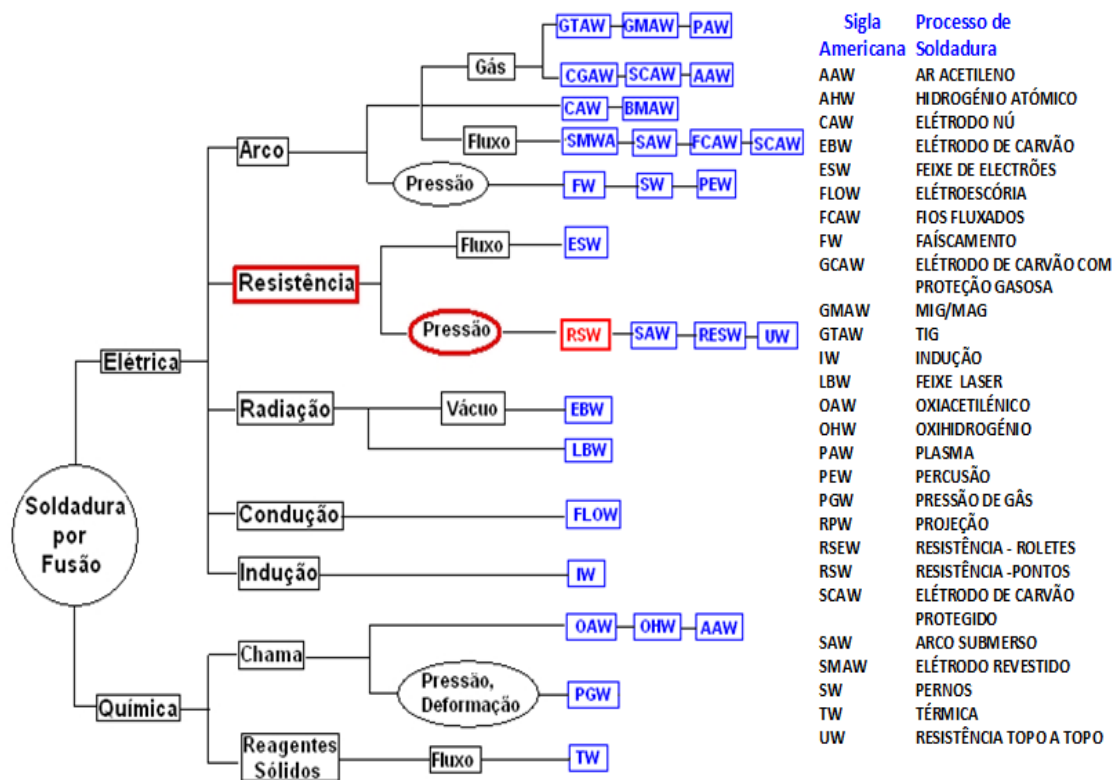


Figura 7 – Classificação dos processos de soldadura por fusão (Santos e Quintino 1993a).

Existe ainda outro tipo de soldadura que se designa por soldadura no estado sólido e que inclui os processos que empregam pressão e em que os dois lados da junta são levados ao contacto, a nível atómico, através de deformação, difusão atómica ou uma combinação de ambos os mecanismos (Santos e Quintino 1993a). As ligações soldadas pertencem à classe das ligações permanentes, e apresentam uma série de vantagens e também algumas desvantagens no contexto da sua utilização, que são sumarizadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens das ligações soldadas.

<b>Vantagens</b>
• 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 <i>gussets</i>
• 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
<b>Desvantagens</b>
• 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

Dentro dos processos de soldadura por fusão, a soldadura por resistência (em particular a soldadura de resistência por pontos) é um dos processos mais importantes e utilizados nos dias de hoje, com uma vasta aplicação na indústria automóvel, aeronáutica, aeroespacial e também em aplicações domésticas. Existem 3000 a 6000 pontos de soldadura num automóvel, o que mostra o nível de importância da soldadura de resistência por pontos ou *resistance spot welding* (RSW) (Khan e Pandey 2013). O processo de soldadura por resistência foi criado em 1877 por Elihu Thompson, que descobriu a possibilidade de soldar duas peças, aplicando-lhes pressão e fazendo-as atravessar por uma corrente elétrica de forte intensidade. Nos dias de hoje, o processo tem diversas variantes e é designado genericamente de soldadura por resistência (Santos e Quintino 1993b). Os processos de soldadura por resistência podem ser classificados de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação dos processos de soldadura por resistência (Santos e Quintino 1993b).

<b>Tipo de junta</b>	<b>Tipo de soldadura</b>	<b>Processo mecânico</b>	<b>Forma de aquecimento</b>
<b>Junta sobreposta</b>	Por pontos	Com par de eléctrodos	Por resistência (efeito de joule)
		Com par de eléctrodos de pontas múltiplas	
		Por pontas duplas	
		Pontas múltiplas executadas por aquecimento	
		Por roletes	
	Contínua	Com dois roletes	
		Com um rolete e um suporte	
Por bossas	Prensa de soldadura		
<b>Junta topo a topo</b>	Por resistência	Equipamento de soldadura topo a topo	Por resistência
	Por faíscamento		Por faíscamento
<b>Junta em T</b>		Máquinas de soldadura por pontos	Por resistência
		Máquinas de soldadura topo a topo	Por faíscamento

No processo de soldadura por pontos, a soldadura é realizada com uma combinação de pressão, calor e tempo. As superfícies são mantidas em contacto através da pressão aplicada pelos eléctrodos e a sua união dá-se através da fusão do metal pela passagem de uma corrente eléctrica que provoca um aumento de temperatura numa zona localizada na interface da junta, devido ao isolamento eléctrico. O aumento de temperatura é provocado por um pulso de baixa voltagem e alta amperagem durante um pequeno instante de tempo, o que permite formar uma zona de metal soldado vulgarmente denominada por ponto de soldadura. O ponto de soldadura forma-se localmente entre as superfícies em contacto, e o seu tamanho e forma irão depender da geometria dos eléctrodos (Khan e Pandey 2013).

Tratando-se de um processo de soldadura por fusão em que a geração de calor é comandada pelo efeito de Joule, verifica-se que a quantidade de calor produzida depende de três factores, que são simultaneamente os parâmetros principais do processo. Estes parâmetros são a resistência eléctrica, intensidade de corrente eléctrica e o tempo de passagem da corrente eléctrica. A resistência eléctrica varia com diversos factores, como a resistividade dos metais, o seu estado de superfície, a natureza e forma dos eléctrodos e a força de aperto dos eléctrodos. Como a resistência eléctrica aumenta com a força de aperto, em termos práticos costuma-se substituir o parâmetro resistência pelo parâmetro “força de aperto”. A corrente de soldadura atravessa as peças a soldar, aquecendo-as à temperatura desejada, ao percorrer o percurso formado pelo secundário do transformador, os condutores, os eléctrodos e as peças a soldar, como ilustrado na Figura 8. Os equipamentos de soldadura de resistência por pontos podem

produzir correntes muito variáveis, sendo as máquinas convencionais capazes de fornecer entre 5 e 20 kA de corrente (Santos e Quintino 1993b).

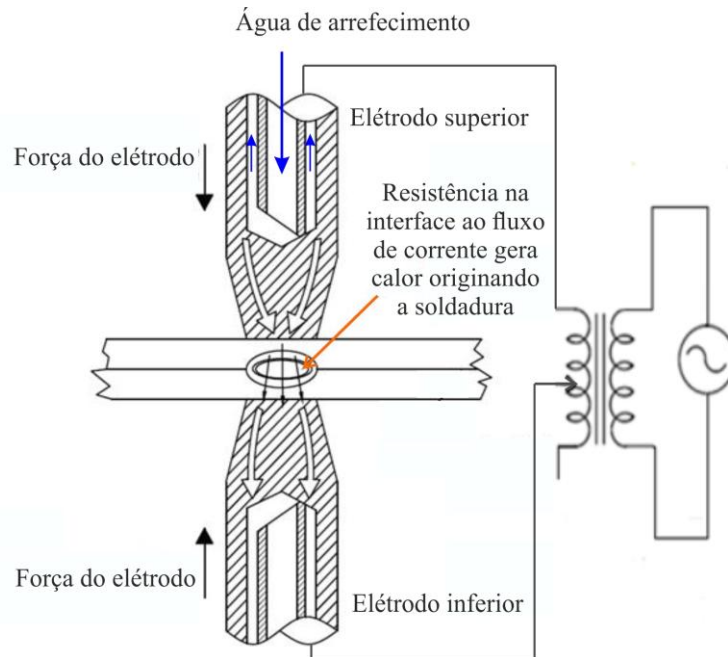


Figura 8 – Diagrama de funcionamento de soldadura por pontos (Khan e Pandey 2013).

A soldadura por resistência permite soldar juntas sobrepostas, topo a topo e juntas em T numa variada gama de materiais desde os aços de baixa liga, aços inoxidáveis, ligas de alumínio, ligas de níquel, ligas de magnésio, titânio, entre outros. De um modo geral, o processo apresenta um conjunto de vantagens e desvantagens no contexto da sua utilização, que estão sumarizadas na Tabela 3.

Tabela 3 –Vantagens e desvantagens do processo de soldadura de resistência por pontos (Santos e Quintino 1993b).

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa emissão de fumos</li> <li>• Altas taxas de produção</li> <li>• Fácil de automatizar</li> <li>• Não é necessário material de adição</li> <li>• Induz pouca distorção nas estruturas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitações na espessura máxima das chapas a soldar</li> <li>• Limitação nos tipos de geometria a soldar restringindo-se na maior parte dos casos a soldadura por sobreposição</li> </ul>

### 2.1.3 Ligações aparafusadas

As ligações aparafusadas são o método preferido de ligação de membros estruturais nos casos em que se pretenda uma estrutura desmontável. As ligações aparafusadas podem ser ainda fixas ou articuladas, podendo os parafusos ser projetados para trabalhar ao corte ou à tração. As zonas de ligação das juntas aparafusadas são críticas devido às elevadas concentrações de tensões. Quando mal projetadas, estas juntas podem levar ao colapso da estrutura, assim como à presença de perfurações que diminuem a secção transversal dos elementos resistentes, o que pode originar a ocorrência da rotura (Kelly 2006). Na Figura 9 apresentam-se os modos de rotura de uma junta aparafusada de sobreposição simples quando submetida a esforços de tração.

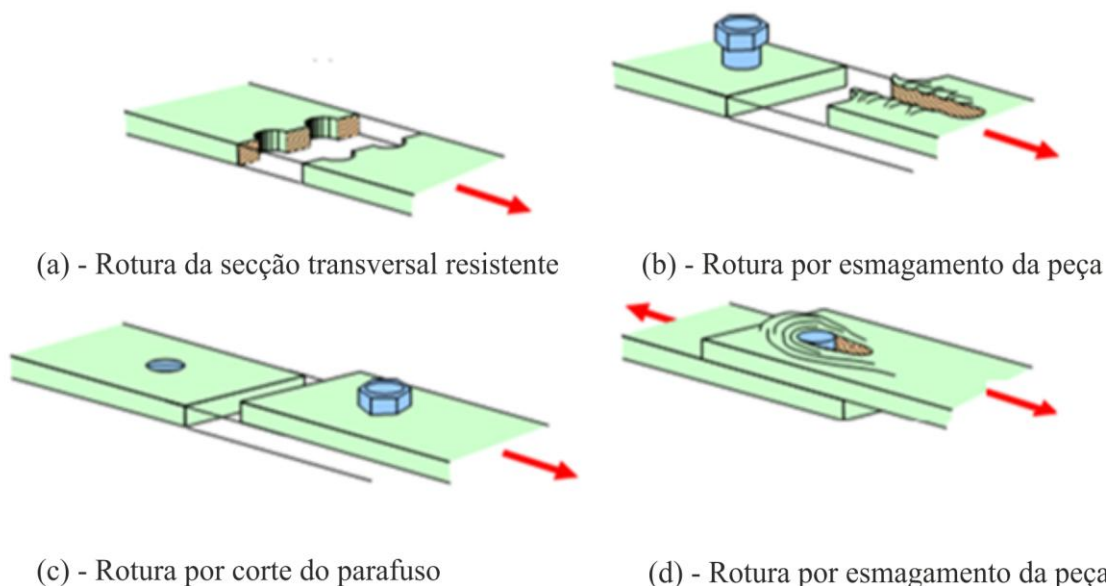


Figura 9 – Modos de rotura de uma junta aparafusada de sobreposição simples quando submetida a forças de tração: (a) rotura da secção transversal resistente, (b) rotura por rasgamento da peça, (c) rotura por corte do parafuso, (d) rotura por esmagamento da peça.

As ligações aparafusadas apresentam a seu favor o amplo conhecimento do seu comportamento mecânico e as elevadas cargas que podem suportar. Podem também unir materiais diferentes sem qualquer inconveniente. Pesa contra este tipo de juntas, o facto de ser necessária a execução de furos para o seu fabrico, aumentando os custos de produção. Os parafusos acrescentam peso à estrutura. Não permitem estruturas com contornos suaves. Se os componentes não forem devidamente revestidos podem apresentar graves problemas de corrosão, com conseqüente falha catastrófica da estrutura.

## 2.2 Classificação dos adesivos

Existem muitos tipos de adesivos e diversos critérios para os agrupar, sendo que qualquer critério apresenta sempre alguma subjetividade. A mais ampla classificação é segundo a sua **origem**, que divide os adesivos em (da Silva et al. 2007, Petrie 1999):

- Naturais;
- Sintéticos;
- Semi-sintéticos.

Os adesivos **naturais**, quanto à sua origem, ainda podem ser classificados em:

- Vegetais (amido, dextrina, resina natural);
- Animais (caseína, ovo);
- Minerais (silicatos, betumes, gessos).

Quanto à sua estrutura molecular, os adesivos **sintéticos** podem ser divididos em:

- Resinas termoplásticas: acrílicas, celulósicas, vinílicas, poliamidas;
- Resinas termoendurecíveis: fenólicas, epóxico, poliésteres, poliimida;
- Elastômeros: poliuretanos, nitrilos, policloroprenos, silicones.

Os adesivos **semi-sintéticos** são combinações de adesivos sintéticos com adesivos naturais. A classificação dos adesivos em sintéticos, semi-sintéticos e naturais é demasiado ampla para muitas das aplicações.

Geralmente, os critérios de classificação mais usados pela indústria são:

- Estrutura molecular (critério já referido);
- Modo de aplicação;
- Modo de endurecimento;
- Durabilidade;

- Estado físico ou modo de apresentação;
- Tipo de aderente (substrato) em que podem ser utilizados;
- Família;
- Desempenho.

A classificação dos adesivos quanto ao seu desempenho representa uma das mais interessantes e importantes classificações para o utilizador, e baseia-se na resistência mecânica apresentada pelo adesivo. Assim, esta classificação permite a criação de dois grandes grupos, os adesivos estruturais e não estruturais, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação dos adesivos segundo o seu desempenho (de Moura et al. 2009b).

<b>ADESIVOS</b>	
<b>Estruturais</b>	<b>Não Estruturais</b>
<b>Fenólicos</b> Fenólicos-Vinílicos Fenólicos-Vitrilo Fenólicos-Policloropropeno	<b>Borrachas Sintéticas</b> Silicone Policloropropeno e nitrilo Polisulfureto
<b>Acrílicos</b> Anaeróbicos Cianocrilatos	
<b>Poliuretanos</b>	<b>Poliésteres</b>
<b>Poliimidas</b>	<b>Termofusíveis</b>
<b>Epóxidos</b> Epóxido-Poliamida Epóxido-Polisulfureto Epóxido-Fenólicos Epóxido-Poliuretano Epóxido-Nitrilo	<b>Inorgânicos</b>

Os adesivos não estruturais não devem ser considerados para esforços substanciais e apenas servem para “manter os materiais no seu lugar”. Este grupo é por vezes chamado em terminologia anglo saxónica “*holding adhesives*” (Ebnesajjad 2008, Ebnesajjad e Landrock 2014). Os adesivos estruturais, por outro lado, são capazes de suportar esforços de elevada magnitude e apresentam outras qualidades descritas mais em detalhe na secção seguinte.

### 2.2.1 Caracterização dos adesivos estruturais

Os adesivos estruturais são usados em aplicações permanentes que necessitam de elevada resistência. Muitas vezes constituem o principal meio de ligação em aplicações estruturais. A resistência e durabilidade de uma junta adesiva estão relacionadas com as propriedades mecânicas e térmicas do adesivo. Neste contexto, os adesivos estruturais apresentam elevada resistência mecânica, e são tipicamente usados para promover uma maior resistência e rigidez da estrutura quando a carga estática ou dinâmica aplicada é substancial.

Segundo Pocius (2002), um adesivo poderá ser considerado um adesivo estrutural quando a resistência da junta ao corte exceda 6,9 MPa. Outra definição é a que considera o adesivo estrutural como um material que não sofre fluência sob a ação de cargas significativas (da Silva et al. 2007). Em caso de aderentes com elevado módulo de elasticidade, como os metálicos ou de fibra de carbono, qualquer deslocamento na junta devido à ação de uma carga aplicada é principalmente devido à deformação do adesivo. Assim, é conveniente caracterizar mecanicamente os adesivos como se caracteriza os metais, ou seja, através do seu módulo de Young, módulo de corte, coeficiente de Poisson, tensão de rotura e outros parâmetros normalmente utilizados na caracterização de metais e suas ligas. No entanto, os adesivos estruturais não podem ser vistos como metais com baixo módulo de elasticidade e resistência, dado que consistem em polímeros orgânicos, e a suas propriedades dependem das interações moleculares e não de interações atômicas como no caso dos metais (Adams et al. 1997). Tipicamente, o módulo de Young de um adesivo estrutural varia entre 0,04 e 6 GPa e o módulo ao corte entre 0,01 e 2 GPa. Devido à sua natureza polimérica é de esperar que o seu coeficiente de Poisson varie na mesma gama dos materiais poliméricos, entre 0,05 e 0,33 (Adams et al. 1997).

As propriedades térmicas dos adesivos são também de grande importância na escolha da sua aplicação e na durabilidade da junta adesiva, dado que a redução da sua resistência, módulo de Young e ductilidade pode ocorrer para temperaturas para as quais os aços correntes são quase insensíveis. Como são materiais poliméricos, é a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) que especifica a passagem de comportamento dúctil a frágil do adesivo. Outros parâmetros térmicos caracterizam também um dado adesivo, tais como o seu ponto de fusão, temperatura de decomposição, coeficiente de expansão térmica e a temperatura superior de utilização (Adams et al. 1997). Os adesivos estruturais estão disponíveis como produtos industriais, para aplicação industrial, ou como produtos de consumo, para aplicações domésticas. Na Tabela 5

pode-se visualizar a forma de apresentação no estado não curado e a temperatura de cura de alguns destes tipos de adesivos, bem como algumas das suas propriedades mecânicas.

Tabela 5 – Propriedades típicas dos adesivos estruturais (Pinto 2007)

Tipo	Apresentação	Temp. máxima de utilização em contínuo [°C]	Resistência				
			Corte [MPa]	Fluência	Arrancamento	Choques	Solventes
Fenólico	Líquido monocomponente	100 a 130	17 a 35	boa	média	boa	mediocre
	Líquido + pó						
	Filme						
Fenólico Nitrilo	Líquido monocomponente Filme	140 a 170	15 a 30	boa	média	boa	boa
Anaeróbicos (acrílicos)	Líquido monocomponente	140 a 170	10 a 40	média	boa	boa	média
Cianonitrilo	Líquido monocomponente	80	10 a 35	má	mediocre	má	má
Poliuretano	Líquido de dois componentes	90	8 a 15	boa	média	boa	boa
Poliimida	Filme	250 a 300	10 a 15	má	boa	mediocre	boa
Epóxido	Diversa	80 a 150	15 a 45	mediocre	boa	má	boa
Epóxido-Poliamida	Líquido de dois componentes	80	15 a 25	boa	mediocre	boa	mediocre
Epóxido-Polisulfido	Líquido de dois componentes	80	15 a 25	boa	mediocre	boa	boa

## 2.2.2 Tipos de adesivos estruturais

### • Adesivos de Epóxido

São provavelmente os adesivos mais versáteis porque aderem bem a muitos materiais. Os adesivos de epóxido formam ligações extremamente fortes e duráveis com a maioria dos materiais, exceto com polímeros e elastómeros que têm uma energia de superfície muito baixa (da Silva et al. 2007). Estão disponíveis numa grande variedade de formas, que vai desde

adesivos líquidos de baixa viscosidade até pastas sólidas ou filmes. São comercializados sob a forma de um só componente ou de vários componentes (normalmente dois). O desenvolvimento de formulações apresentando elevada rigidez aumentou fortemente o uso destes adesivos em muitas indústrias. Como tal, estes adesivos podem ser empregues na ligação de quase todos os materiais utilizados na construção mecânica. Os epóxidos são termoendurecíveis, têm uma excelente resistência à tração e ao corte mas uma fraca resistência ao arrancamento, a não ser que sejam modificados com um polímero mais tenaz. Têm uma excelente resistência ao óleo, humidade e muitos solventes. Têm uma baixa contração na cura e uma elevada resistência à fluência. Não libertam voláteis na cura e são úteis em aplicações de preenchimento de espaços (vedantes). Os epóxidos comerciais podem ser líquidos, pastas, filmes e sólidos. São compostos por uma resina epóxida e um endurecedor (*curing agent*), o que permite uma grande versatilidade na sua formulação, uma vez que existem diversas resinas e diferentes endurecedores, conseguindo-se assim diferentes propriedades (da Silva et al. 2007). As propriedades dos adesivos epóxidos, quando modificados pela adição de outras resinas (poliamida, polisulfido, fenólica, etc.) ou por um elastómero (poliuretano ou nitrilo), dão origem aos **adesivos epóxidos modificados**, dos quais se destacam pela sua maior utilização os **epóxido-poliamida, epóxido-polisulfido, epóxido-fenólicos, epóxido-vinílico, epóxido-poliuretano e epóxido-nitrilo** (Petrie 1999).

- **Adesivos de Poliuretano**

Os adesivos poliuretanos apresentam-se geralmente sob a forma de dois componentes. Apresentam boa flexibilidade, bom comportamento a baixas temperaturas, resistência relativamente alta ao corte e arrancamento, à abrasão, a choques e vibrações, boa tenacidade e boa resistência química. Estes adesivos podem apresentar uma resistência de rotura ao corte da ordem dos 20 MPa, possibilitando a utilização em aplicações estruturais. Tal como os epóxidos, os poliuretanos podem apresentar-se 100 % sólidos ou dissolvidos num solvente de uma ou duas partes. Estes adesivos podem curar à temperatura ambiente ou a altas temperaturas (Petrie 1999). Os poliuretanos formam ligações com boa tenacidade e têm melhor resistência a temperaturas baixas (criogénicas) do que outros adesivos. Não possuem uma boa resistência a altas temperaturas e a maior parte das formulações é usada abaixo dos 120 °C. Devido à sua boa molhabilidade e flexibilidade, os poliuretanos aderem bem a muitos materiais, incluindo polímeros difíceis de colar. Como são muito flexíveis, os poliuretanos são muitas vezes usados para ligar filmes, folhas metálicas e elastómeros. Os uretanos

estruturais são muito usados na indústria automível devido às boas propriedades de adesão com painéis moldados por *Sheet Molding Compound* (SMC) (da Silva et al. 2007).

- **Adesivos Fenólicos**

Foram os primeiros adesivos estruturais para metais e têm uma longa história na ligação de metais e madeira. As resinas fenólicas são o produto da condensação de fenol e formaldeído. A cura é feita a aproximadamente 140 °C durante vários minutos. A sua durabilidade é boa e a junta apresenta boa resistência a fungos e à água a altas temperaturas. Podem ser usados no exterior e as suas propriedades não são muito afetadas por baixas temperaturas. Os adesivos fenólicos em geral apresentam um baixo custo e possuem boa resistência mecânica, a temperaturas elevadas e aos agentes ambientais. Devido à sua boa resistência ao calor e boa estabilidade dimensional, têm sido usados em calços de travão, discos abrasivos, lixas e moldes de fundição. Como principais limitações, apontam-se a baixa resistência à corrosão por solventes, baixa resistência ao impacto e grande fragilidade. Para a resolução destes problemas têm sido desenvolvidos adesivos que combinam a resina fenólica com uma resina vinílica ou um elastómero (nitrilo ou policloropreno), dando origem aos **adesivos fenólicos híbridos** (Petrie 1999). Nestes adesivos fenólicos modificados o processo de cura efetua-se a quente e sob pressão (da Silva et al. 2007).

- **Adesivos acrílicos**

Nos adesivos acrílicos incluem-se os adesivos anaeróbicos, os cianoacrilatos e os acrílicos modificados.

#### Anaeróbicos

Os adesivos baseados no monómero acrilato designam-se por anaeróbicos porque curam quando o ar é excluído da resina (da Silva et al. 2007). São geralmente líquidos monocomponentes que podem ser curados à temperatura ambiente. Podem ser comercializados na forma de pastas ou líquidos tixotrópicos. Têm tido uma grande aplicação na indústria mecânica na fixação de peças estriadas e roscadas, fixação de rolamentos e, de uma forma geral, na ligação de peças de geometria cilíndrica (Dunn 2004). O uso mais importante é como travão líquido de porcas para parafusos (*liquid lock washers*).

### Cianoacrilatos

Trata-se de um adesivo de cura instantânea que permite colagens muito rápidas, e apresenta-se sob a forma de líquido monocomponente ou na versão tixotrópica sem solventes. Estes adesivos são conhecidos como colas instantâneas, super colas ou, ainda, por cola tudo. Apresentam excelente resistência à tração mas baixa resistência ao arrancamento, fragilidade e custo elevados. São adequados para colar pequenas partes de plásticos e borrachas (Dunn 2004).

### Acrílicos modificados e metacrilatos

Possuem baixa contração durante o processo de cura e permitem ligações fortes, tolerando uma preparação mínima das superfícies e podem ser aplicados para unir uma grande variedade de materiais (especialmente plásticos e metais). Como desvantagens, citam-se a baixa resistência mecânica a altas temperaturas e elevada flamabilidade (Dillard 2010).

- **Adesivos à base de resorcinol-formol**

As resinas resorcinol são da família das resinas fenólicas. São mais caras do que as fenólicas, mas são úteis quando é necessária uma cura à temperatura ambiente. Têm aplicação na colagem de madeira, acetato de celulose, plásticos moldados de ureia, nylon e vários laminados plásticos a madeira. A sua temperatura de serviço está compreendida entre -185 e +175°C (da Silva et al. 2007).

- **Adesivos poliacetato de vinilo (PVA)**

O adesivo vinílico, ou cola branca (como é mais conhecido) é fornecido pronto para o uso. É indicado para as colagens de madeiras de baixa, média e alta densidade, materiais porosos, laminados plásticos, em colagens estruturais e na montagem de móveis (Pizzi e Mittal 2003).

- **Adesivos sensíveis à pressão**

São adequados para fitas, rótulos e etiquetas. Apesar de não solidificarem e não sofrerem um processo químico de cura podem, frequentemente, resistir a ambientes adversos (da Silva et al. 2007).

## 2.3 Técnicas de previsão em juntas adesivas

No projeto de uma junta adesiva é de primordial importância prever a sua resistência, tanto por motivos de segurança como de durabilidade. Na análise de juntas adesivas o engenheiro ou projetista tem ao seu dispor duas técnicas para prever a sua resistência: métodos analíticos e simulação computacional baseada em métodos numéricos.

### 2.3.1 Métodos analíticos

Os métodos analíticos surgem como uma possibilidade de descrever através de um conjunto de equações diferenciais o estado de tensão e deformação numa junta. Este tipo de métodos é conhecido como “*closed-form stress analysis*” (Adams 2005). No caso mais simples em que o adesivo e aderentes são elásticos, é possível obter uma solução analítica para determinadas condições fronteira. Os métodos analíticos tornam-se de difícil uso quando começam a surgir não linearidades. As causas das não linearidades incluem a rotação, não linearidade geométrica da junta e a plasticidade do material. Contudo, através de várias simplificações é possível produzir soluções que podem ser usadas em várias geometrias de junta e materiais, cobrindo um número alargado de casos. Os métodos analíticos para previsão de estado de tensão/deformação de juntas adesivas foram desenvolvidos sobretudo para as juntas de sobreposição simples. De seguida, apresentam-se os modelos analíticos mais relevantes, e que serviram de base a outros trabalhos.

- **Análise Linear Elástica**

Na análise linear elástica de uma junta de sobreposição simples ambos os aderentes devem apresentar as mesmas propriedades geométricas e materiais, e o adesivo deforma-se apenas ao corte. Considerando o caso teórico em que os aderentes têm uma rigidez infinita, as forças aplicadas no aderente geram no adesivo uma tensão de corte uniformemente distribuída (da Silva 2008), como pode ser observado na Figura 10.

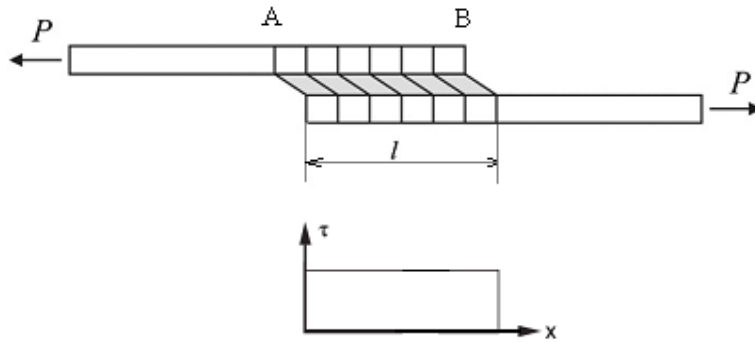


Figura 10 – Junta de sobreposição simples segundo a análise linear elástica (da Silva et al. 2009a).

O valor da tensão de corte média pode ser interpretado como a média das tensões atuando ao longo da camada de adesivo. Esta análise não é muito realista devido às muitas simplificações introduzidas, contudo ela continua a ser a base para a avaliação da resistência ao corte em diversos ensaios normalizados ISO e ASTM (da Silva et al. 2009a).

- **Análise de Volkersen (1938)**

Como ponto de partida nos métodos analíticos de análise de juntas adesivas, Volkersen (1938) considerou que os aderentes não são completamente rígidos e deformam axialmente enquanto o adesivo deforma ao corte (Adams et al. 1997). Assim, ao serem aplicadas forças de tração nos aderentes, a tensão normal no aderente superior atinge um máximo em A e decresce até zero em B (Figura 11). Assim, também a deformação axial é maior em A e diminui ao longo do comprimento  $l$ . O mesmo acontece no aderente inferior mas agora diminuindo de B até A (Adams et al. 1997).

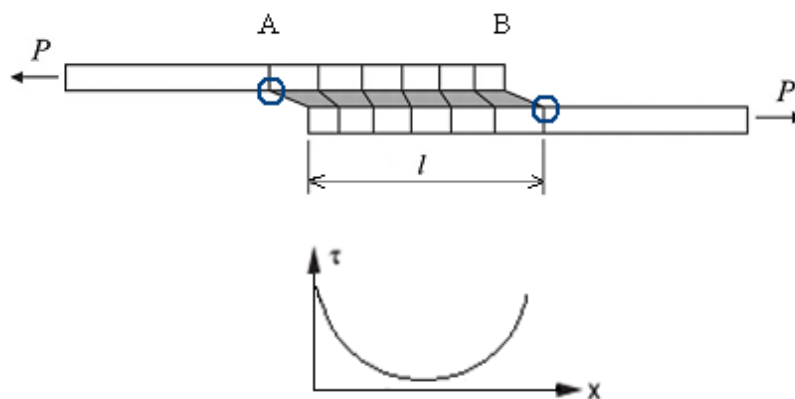


Figura 11 – Distribuição das tensões de corte no modelo de Volkersen (da Silva et al. 2009a).

Assumindo a continuidade entre o adesivo e interface do aderente, os paralelogramos uniformemente deformados mostrados na Figura 10 passam a apresentar uma distorção, como se pode ver na Figura 11, dando origem a que o valor máximo da tensão de corte ocorra nas extremidades da camada de adesivo. Este fenómeno é chamado de corte diferencial ou “*differential shear*” (Adams et al. 1997).

- **Análise de Goland e Reissner (1944)**

A teoria desenvolvida por Volkersen não tem em conta dois fatores importantes. O primeiro tem a ver com a não colinearidade das forças aplicadas que vai dar origem a um momento fletor e um deslocamento transverso, que introduz tensões de arrancamento (Adams et al. 1997, da Silva et al. 2009a). A rotação da junta tende a alinhar as forças, como se pode ver na Figura 12 e, conseqüentemente, o momento fletor diminui com o carregamento. Desta forma, quando os aderentes sofrem deflexões elevadas os deslocamentos já não são proporcionais às forças aplicadas, dando origem a um problema não linear geométrico (Adams et al. 1997).



Figura 12 – Alinhamento das forças aplicadas devido à rotação da junta.

Para ter em conta estes efeitos, Goland e Reissner (1944) determinaram um fator  $K$  para correção do momento fletor, que relaciona a tensão aplicada por unidade de comprimento com o momento fletor, e um fator  $K'$  para correção do esforço transversal, que relaciona a força aplicada por unidade de largura com o esforço transversal nas extremidades da junta (Adams et al. 1997). A Figura 13 mostra o modelo usado por Goland e Reissner, onde  $\bar{P}$  é a tensão por unidade de largura,  $V$  é o esforço transversal e  $M$  é o momento fletor (da Silva et al. 2009a).

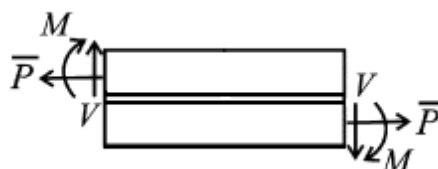


Figura 13 – Modelo de Goland e Reissner (da Silva et al. 2009a).

- **Análise de Hart-Smith (1973)**

O trabalho de Goland e Reissner leva em conta grandes deflexões dos aderentes mas assume os aderentes superior e inferior como sendo um só corpo, e a camada de adesivo infinitamente fina, conforme apresentado na Figura 14 (a). Hart-Smith (1973b) estendeu o trabalho de Goland e Reissner considerando a plasticidade do adesivo (Rodríguez et al. 2011), as deformações individuais dos aderentes e a espessura da camada de adesivo. A Figura 14 mostra os modelos da distribuição do momento fletor usados por Goland e Reissner e Hart-Smith no cálculo do fator  $K$ .

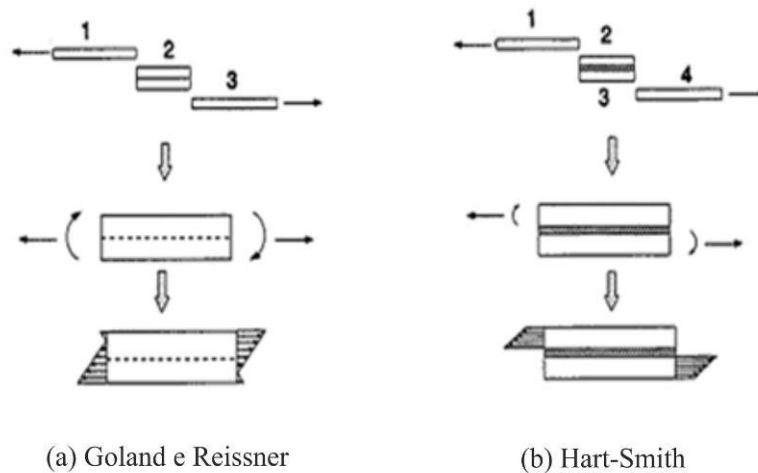


Figura 14 – Distribuição do momento fletor considerado para cálculo do fator  $K$  no modelo de: (a) Hart-Smith e (b) Goland e Reissner (van Ingen e Vlot 1993).

Outro aspeto fundamental do trabalho de Hart-Smith (1973b) é o mecanismo de transferência de carga. De facto, a intensidade da carga não é transferida uniformemente ao longo do adesivo. A grande maioria da carga é transmitida pelas extremidades da ligação, enquanto a zona elástica intermédia corresponde a uma menor intensidade de carga, como se pode ver na Figura 15.

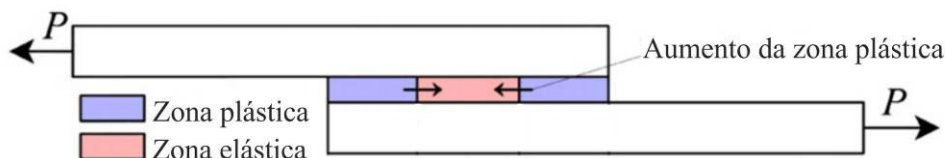


Figura 15 – Modelo elasto-plástico de Hart-Smith (Rodríguez et al. 2011).

Assim, tendo em conta estes aspetos, Hart-Smith apresentou uma expressão alternativa para o fator de correção do momento fletor de Goland e Reissner (van Ingen e Vlot 1993).

Os trabalhos clássicos dos autores citados, ainda que com várias limitações, serviram de base para formulações posteriores mais complexas e refinadas como as desenvolvidas por Williams (1975), Ojalvo e Eidinof (1978), Bigwood e Crocombe (1989), entre outros. Adams e Mallick (1992) desenvolveram uma análise ainda mais avançada para juntas de sobreposição simples e dupla, que inclui o efeito das tensões térmicas. Na Tabela 6 apresenta-se um resumo das considerações e aspetos levados em conta nos trabalhos de vários autores.

Tabela 6 – Resumo das considerações mais significativas nas teorias de diversos autores (van Ingen e Vlot 1993).

<b>Consideração</b>	Goland e Reissner (1944)	Hart-Smith (1973b)	Williams (1975)	Ojalvo e Eidinof (1978)	Bigwood e Crocombe (1989)
Filete de canto do adesivo desprezado	X	X	X	X	X
Direção da largura desprezada	X	X	X	X	X
Tensões longitudinais no adesivo inexistentes	X	X	X	X	X
Estado plano de tensão	X	X	X	X	X
Análise elástica	X		X	X	X
Deformação ao corte dos aderentes					
Tensão de corte nula na aresta da junta					
Tensão de corte variável ao longo da espessura do adesivo				X	
Tensão normal variável ao longo da espessura do adesivo					
Junta simétrica	X			X	
<b>Consideração</b>	Delale et al. (1981)	Yuceoglu e Updike (1980)	Allman (1977)	Renton e Vinson (1975)	Chen e Cheng (1983)
Filete de canto do adesivo desprezado	X	X	X	X	X
Direção da largura desprezada	X	X	X	X	X
Tensões longitudinais no adesivo inexistentes	X	X	X	X	X
Estado plano de tensão	X	X	X	X	X
Análise elástica	X	X	X	X	X
Deformação ao corte dos aderentes	X	X	X	X	X
Tensão nula na aresta da junta			X	X	X
Tensão de corte variável ao longo da espessura do adesivo					
Tensão normal variável ao longo da espessura adesivo				X	X
Junta simétrica	X			X	X

De entre várias restrições características dos modelos analíticos “*closed-form*”, estes modelos não levam em conta o estado de tensão tridimensional criada devido ao efeito de Poisson, também denominado efeito anti-clástico, que está representado na Figura 16 (van Ingen e Vlot 1993). Outro aspeto não levado em conta pelos modelos analíticos é a variação das tensões no

adesivo ao longo da sua espessura, especialmente as tensões da interface, que são importantes quando a rotura ocorre perto dessa zona (van Ingen e Vlot 1993).

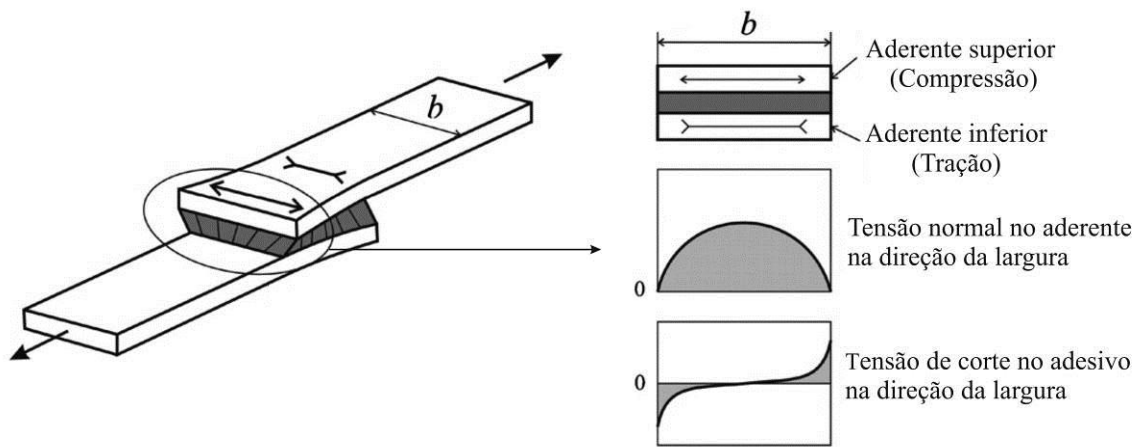


Figura 16 – Efeito de Poisson tridimensional (efeito anti-clástico) numa junta de sobreposição simples (da Silva et al. 2009a).

Por outro lado, estes modelos preveem um aumento das tensões no adesivo com a diminuição da espessura do adesivo. No entanto, este comportamento não está de acordo com a tensão de rotura observada nas juntas (van Ingen e Vlot 1993). O uso de técnicas analíticas na análise de juntas adesivas envolve sempre a utilização de pressupostos para a simplificação dos modelos, nomeadamente em termos da geometria da junta, carregamento e condições fronteira, para obter a solução do problema. A utilização de métodos analíticos na análise de juntas adesivas tem como vantagem a rapidez da análise, embora com muitas hipóteses simplificativas incorporadas (Panigrahi e Pradhan 2007). Uma destas simplificações consiste em assumir adesivos com comportamento linear elástico, que geralmente não reflete o comportamento real dos adesivos. Para facilitar a aplicação dos métodos analíticos existem *softwares* comerciais como o BISEPS-LOCO e BISEPS-TUG (E.A.A 2015), e mais recentemente o *Joint Designer* (da Silva et al. 2009c). O uso de modelos analíticos na análise de resistência das juntas adesivas pressupõe a utilização de critérios de rotura baseados em tensões, deformações ou energia de deformação que comparam os valores analíticos com os valores limite dos materiais (da Silva et al. 2009a).

### 2.3.1.1 Critérios de rotura

Existem diversos critérios de rotura que podem ser utilizados para previsão de resistência de juntas adesivas utilizando como base métodos analíticos de cálculo de tensões nas juntas. Os critérios que se apresentam neste capítulo são válidos para utilização em conjunto com

métodos analíticos, mas também com métodos numéricos baseados na mecânica dos meios contínuos, descritos posteriormente no capítulo 2.3.2.1. As tensões de corte têm sido extensivamente usadas como critério para prever a resistência de juntas adesivas de sobreposição através dos métodos analíticos.

O modelo de Volkersen (1938) considera que o adesivo deforma apenas ao corte. Assim, é natural considerar a tensão máxima de corte como critério de rotura. Esta abordagem foi também usada por Greenwood et al. (1969) que, usando a formulação de Goland e Reissner (1944), descobriram que a tensão máxima de corte ocorre a cerca de 45° ao longo da camada de adesivo (Quispe Rodríguez et al. 2012). Hart-Smith (1973a) propôs que a deformação máxima ao corte poderia ser usada como critério de rotura na presença de deformação plástica (da Silva e Campilho 2012b). Outras análises, como as desenvolvidas por Adams e Mallick (1992) vão além da de Hart-Smith, e permitem que ambos os esforços de corte e arrancamento contribuam para a plastificação do adesivo. A deformação máxima ao corte foi usada por Lee e Lee (1992) em juntas tubulares e Crocombe e Adams (1982) em juntas *T-Peel*.

A Tabela 7 apresenta os critérios de rotura testados por da Silva et al. (2009b) em vários modelos analíticos usando juntas de sobreposição simples. Os critérios de rotura baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados aos modelos analíticos são de certa forma intuitivos e reproduzem resultados satisfatórios em alguns casos (da Silva et al. 2009b). No entanto, estes podem ser bastante complexos sem que as suas previsões sejam realistas. Estes critérios não levam em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, assim como a presença de defeitos no adesivo. O estudo realizado por da Silva et al. (2009b) concluiu que as análises não lineares não têm solução usando modelos analíticos. Por outro lado, o tempo de implementação e resolução não apresenta vantagem significativa sobre os modelos numéricos.

Tabela 7 – Critérios de rotura testados por da Silva et al. (2009b) em vários modelos analíticos ( $\tau$  - tensão de corte,  $\tau_r$  - rotura ao corte,  $\sigma$  - tensão de arrancamento (*peel*),  $\sigma_r$  - tensão de rotura,  $\gamma$  - deformação ao corte,  $\gamma_p$  - deformação plástica ao corte,  $\varepsilon_e$  - deformação de von Mises equivalente,  $\varepsilon_r$  - deformação de rotura à tração, GY (*global yielding* ou cedência global no adesivo) (da Silva et al. 2009b).

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)	$\varepsilon_e > \varepsilon_r$ ou GY
Wang et al. (2003) (análise não linear total)	$\varepsilon_e > \varepsilon_r$ ou GY
Adams e Mallick (1992)	
Análise linear	$\tau > \tau_r$ ou $\sigma > \sigma_r$
Análise não linear	$\varepsilon_e > \varepsilon_r$ ou GY
'Módulo efetivo'	$\varepsilon_e > \varepsilon_r$
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

### 2.3.2 Métodos numéricos

A análise do estado de tensão nas juntas adesivas usando métodos analíticos pode-se tornar altamente complexa se, por exemplo, o adesivo deformar plasticamente ou se os aderentes s forem materiais compósitos. Nestes casos, pode-se obter várias equações diferenciais não-lineares ou não homogêneas, tornando a obtenção de uma solução um processo bastante moroso e quase impraticável. Para estes casos os métodos numéricos são mais adequados. O MEF, o método dos elementos fronteira e o método das diferenças finitas são os três principais métodos numéricos usados na resolução de equações diferenciais parciais (da Silva e Campilho 2012b).

O MEF é baseado na ideia de construir um objeto complicado com simples blocos ou dividir um objeto em pequenas partes. A primeira abordagem matemática deste princípio surge na literatura com o trabalho de Courant (1943). O avanço na indústria aeroespacial e o desenvolvimento dos computadores permitiram o desenvolvimento destes métodos, assim

como a sua informatização (da Silva e Campilho 2012b). O MEF começou a ser usado há 40 anos no contexto das juntas adesivas por Wooley e Carver (1971) e posteriormente por Adams e seus colaboradores. Um dos objetivos iniciais para o uso do MEF foi a avaliação da influência do filete de adesivo (Adams 1986, Adams e Davies 2002a, Adams e Harris 1984, Adams e Peppiatt 1974, Crocombe e Adams 1981). Este assunto foi mais tarde analisado por Dorn e Liu (1993) e Tsai et al. (1995). A análise de Harris e Adams (1984) é uma das análises mais completas e mostra o efeito da não linearidade geométrica e também da plasticidade dos aderentes e do adesivo. A ligação entre materiais compósitos é um dos exemplos típicos da utilidade do MEF, uma vez que o comportamento anisotrópico destes materiais complica drasticamente qualquer abordagem analítica. Existe uma grande quantidade de estudos de juntas em materiais compósitos como os de Adams (1986), Adams e Davies (2002a) e Magalhães et al. (2005). Na análise de juntas híbridas, os métodos analíticos tornam-se quase impraticáveis. Campilho et al. (2012) e Al-Samhan e Darwish (2003a) publicaram alguns dos mais importantes trabalhos de análise de juntas híbridas recorrendo ao MEF. O MEF permite estudar qualquer geometria, ou seja, permite incluir variações na forma dos aderentes, ou filetes de adesivo, o que é muito complicado por métodos analíticos (da Silva et al. 2007). A rotação da junta e dos aderentes, e a plasticidade dos adesivos, são outros aspetos que podem ser facilmente tratados pelo MEF (da Silva e Campilho 2012b). Outra vantagem importante, evidenciada no trabalho de Gonçalves et al. (2002), é a possibilidade de cálculo de todas as componentes de tensão recorrendo a análises tridimensionais. Todavia, os estudos paramétricos por MEF, tais como o estudo da influência da espessura do adesivo, são mais difíceis pois geralmente envolvem a criação de um novo modelo para cada nova configuração (da Silva et al. 2007).

Na modelação pelo MEF, a escolha do tipo de elementos é um passo muito importante e pode ter influência nos resultados finais. Cada tipo de elemento tem vantagens e inconvenientes, dependendo da aplicação. Os elementos sólidos contínuos são adequados para análises lineares e também para problemas complexos não-lineares envolvendo plasticidade e grandes deformações. Uma junta adesiva pode ser modelada como uma geometria bi (2D) ou tridimensional (3D). Os elementos 2D contínuos podem ser de estado plano de tensão, estado plano de deformação ou de estado plano de deformação generalizada. Os elementos contínuos 3D têm a vantagem de eliminar a aproximação introduzida pelos estados planos de tensão e de deformação. Apesar de uma análise 3D permitir resultados mais precisos do que uma análise 2D, o tempo e esforço requerido por uma análise 3D pode, por vezes, não compensar. Nas juntas coladas, geralmente faz-se uma análise bidimensional assumindo condições de

estado plano de deformação. Apesar de haver efeitos tridimensionais como a deformação lateral (Adams e Peppiatt 1977) e efeitos anti-clásticos ou de Poisson (Adams e Davies 1996, Gonçalves et al. 2002), vários estudos mostraram que análises 2D permitem a obtenção de resultados satisfatórios (Adams et al. 1997, Adams e Davies 2002b). Os elementos usados na análise de juntas adesivas costumam ser elementos quadriláteros de quatro ou oito nós (com funções de forma lineares ou quadráticas, respectivamente). Geralmente, usa-se primeiramente uma malha grosseira e aumenta-se progressivamente a densidade da malha (aumento do número de elementos, ou seja, diminuição do seu tamanho). Uma redução do tamanho do elemento aumenta os níveis de tensão e deformação até um ponto em que praticamente não há alteração. Quando assim acontece diz-se que há convergência da malha (da Silva et al. 2007). No entanto, nas zonas de singularidade não se obtém convergência da malha.

É importante construir um modelo de MEF com um número limitado de elementos para poupar tempo de computação. Contudo, os modelos simplificados limitam a visão global do sistema em análise e a exatidão dos resultados. A aplicação de códigos explícitos de MEF na análise de juntas adesivas tem aumentado significativamente nos últimos anos. Através do uso de códigos explícitos de MEF, a equação de movimento de cada grau de liberdade é resolvida individualmente. Isto permite que grandes modelos como estruturas detalhadas de aviões, que por vezes consistem em mais de um milhão de graus de liberdade, possam ser simulados dentro de um tempo razoável de execução. O limite dos graus de liberdade é devido à memória do computador e à necessidade de obter a solução num tempo razoável (He 2011).

Estão disponíveis no mercado vários códigos de MEF, tais como o Nastran<sup>®</sup>, Solidworks<sup>®</sup> Simulation, Ansys<sup>®</sup>, Nisa<sup>®</sup> e Abaqus<sup>®</sup>. Alguns destes códigos fornecem modelos constitutivos que permitem a simulação do comportamento da maioria dos adesivos, considerando distribuições não uniformes de tensão/deformação, não linearidades geométricas, efeitos hidrotérmicos, comportamento elasto-plástico e visco elástico, análises estáticas e dinâmica e dependência da taxa de deformação. Estão disponíveis também pacotes extra de geradores automáticos de malha, como o PATRAN e o FEMGVO, que podem ser usados em conjunto com o *software* de MEF de forma a melhorar a qualidade da malha e, como tal, a robustez da análise.

Embora o MEF seja capaz de acomodar geometrias, cargas, propriedades do material e condições fronteira complexas, as soluções geradas são apenas aproximações à solução real. É importante que o projetista ou analista esteja consciente das limitações de cada um dos métodos numéricos quando aplicado à compreensão fundamental da mecânica das ligações

adesivas (da Silva e Campilho 2012b). Apresentam-se de seguida os métodos numéricos mais relevantes para a análise de juntas adesivas.

### **2.3.2.1 Mecânica dos Meios Contínuos**

As técnicas da mecânica dos meios contínuos consistem na utilização de métodos numéricos para obtenção dos campos de tensão/deformação e previsão de rotura por diferentes critérios. Podem-se considerar critérios baseados na tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância da extremidade da zona ligada ou tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite, entre outros. Nos critérios de tensão ou deformação máxima, os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação, previstos pelos métodos numéricos, são geralmente comparados com os valores admissíveis dos materiais para estimar a resistência das ligações adesivas (da Silva e Campilho 2012b).

Tendo em conta a utilização do MEF para obtenção do campo de tensões, inicialmente consideraram-se as tensões principais máximas como critério de rotura para adesivos frágeis e cujo modo de falha se dá na direção da tensão principal máxima. Adams et al. (1997) usaram este critério com sucesso na previsão da resistência de juntas adesivas. Contudo, este critério ignora todas as outras tensões principais, que podem não ser nulas. Mais ainda, devido às singularidades de tensões que ocorrem nos cantos das juntas, as tensões dependerão do tamanho da malha e a que proximidade das singularidades as tensões são avaliadas. Na prática, e devido aos processos de produção, os cantos da junta são arredondados, podendo afetar a distribuição de tensões devido à variação de geometria. No entanto, o arredondamento dos cantos facilita a aplicação de critérios limite de tensão ou deformação, pois elimina a existência de singularidades (da Silva e Campilho 2012b). O critério da cedência generalizada foi primeiramente introduzido por Crocombe (1989), e aplica-se quando uma porção de adesivo ao longo da zona ligada atinge um estado limite em que não pode mais sustentar um aumento significativo de carga. Este critério é apenas aplicável a uma gama limitada de juntas adesivas, porque a maioria dos epóxidos não tem ductilidade suficiente para que toda a camada d adesivo ceda antes da rotura da junta (Quispe Rodríguez et al. 2012). Para ultrapassar as referidas dificuldades de dependência da malha dos critérios com as singularidades, vários autores recorreram aos critérios da tensão ou deformação pontual a uma dada distância da singularidade. Zhao (1991) propôs o critério da tensão principal média, em que a espessura do adesivo é usada como a distância sobre a qual é calculada a média da tensão principal máxima, que é depois comparada com a resistência do material. No entanto, Charalambides

et al. (1997) demonstraram que, em juntas de sobreposição dupla, a localização da tensão máxima ocorre num ponto localizado fora da zona característica. Os critérios da tensão ou deformação média sobre uma dada região foram inicialmente desenvolvidos por Whitney e Nuismer (1974) e Nuismer e Whitney (1975). Zhao et al. (2011) usaram um critério em que a rotura ocorre quando a densidade de energia plástica média sobre uma certa distância atinge um valor crítico. A energia específica não é tão sensível ao tamanho da zona de integração quando é interpretada como uma média sobre uma área em análise 2D, ou sobre um volume em análise 3D. É do conhecimento comum que a precisão do MEF é mais real quando interpretada como uma média do que do ponto de vista pontual (da Silva e Campilho 2012b).

A análise de juntas adesivas através da mecânica dos meios contínuos usada em conjunto com o MEF tem como vantagem a análise expedita das juntas e a obtenção de resultados muito satisfatórios, assim como a possibilidade de aplicação a juntas de geometria complexa. No entanto, devido a entalhes e variações abruptas de geometria, esta técnica apresenta problemas de convergência devido à dependência do tamanho da malha, assim como também não leva em conta a presença inicial de defeitos no adesivo.

### **2.3.2.2 Mecânica da Fratura**

A técnica da mecânica dos meios contínuos é baseada na teoria da resistência de materiais, em que um dos princípios básicos é considerar que o material está isento de defeitos (da Silva et al. 2007). No entanto, é bastante comum aparecerem defeitos como fissuras ou materiais com cantos e reentrâncias. Consequentemente, a mecânica dos meios contínuos não produz uma solução nesses pontos, que resultam em singularidades de tensão e deformação (da Silva e Campilho 2012b). Em contrapartida, na Mecânica da Fratura assume-se que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo conter defeitos causados pelo próprio processo de fabrico ou por um qualquer acidente durante o seu funcionamento. O objetivo é saber se os defeitos existentes serão suscetíveis de causar a rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, as suas dimensões se mantêm inferiores às críticas, embora se possam propagar de uma forma estável. Assim, em vez de uma análise local ao valor do pico das tensões, que é teoricamente infinito na extremidade da fenda, a Mecânica da Fratura avalia se as fendas existentes na estrutura são suscetíveis de induzir a rotura (da Silva et al. 2007). O uso de critérios puramente baseados na Mecânica da Fratura está então dependente da existência de uma fenda ou defeito na zona de colagem. Estas fendas são artificialmente introduzidas e pretendem simular a existência de dano ou defeitos originados durante o processo de fabrico ou induzidos em serviço. 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. Por outro lado, existem uma série de dificuldades associadas a este tipo de abordagem, como o tamanho da fenda inicial a considerar e a sua localização.

Os princípios básicos da Mecânica da Fratura devem-se ao trabalho pioneiro de Griffith (1921), que estudou a fratura em diversos materiais e concluiu que todos os corpos apresentam defeitos, e que a fratura ocorre a partir do mais crítico. Neste contexto, Griffith estabeleceu que a propagação de um defeito interno ocorrerá quando a energia disponível na extremidade desse defeito, devido à solitação aplicada, igualar a energia necessária à propagação da fenda, e que é uma propriedade do material (da Silva et al. 2007).

Como ilustrado na Figura 17, uma fenda pode propagar em três modos. O Modo I representa o modo de abertura, e os Modos II e III são modos de corte. No Modo II as superfícies da fenda têm movimento relativo perpendicular à frente de fenda, enquanto no Modo III esse movimento é paralelo à frente de fenda. Geralmente, a rotura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte, e também pelo efeito induzido pelos aderentes no adesivo (Campilho et al. 2008).

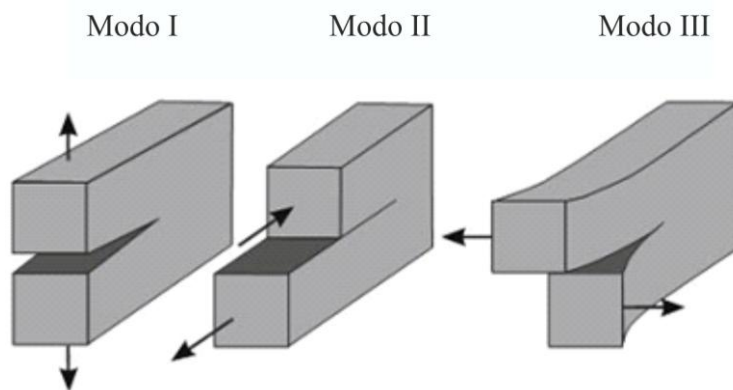


Figura 17 – Três diferentes modos de propagação de uma fenda (Zeng 2015).

Para a previsão de fratura em modo misto, foi desenvolvido o conceito de superfície de fratura (ou envelope de fratura) que fornece uma função para rotura em função dos diversos modos de fratura. Com o objetivo de ajustar os resultados experimentais, têm sido propostas várias funções matemáticas, como o critério 3D de Dillard et al. (2009).

O fator generalizado de intensidade de tensão, semelhante ao fator de intensidade de tensão usado na mecânica da fratura, inicialmente desenvolvido por Irwin (1958), é um fator de escala que representa a alteração do estado de tensão na vizinhança da extremidade da fenda, permitindo desta forma que as tensões se mantenham finitas. Este fator de escala tem sido investigado para prever o início da ocorrência de fratura nas extremidades da interface entre o adesivo e os aderentes de uma junta de sobreposição simples (da Silva et al. 2009b). Assume-se que a fratura tem início quando o fator de intensidade de tensão atinge o seu valor crítico, estimado experimentalmente (da Silva e Campilho 2012a). Conclui-se que a mecânica da fratura pode ser usada para prever a resistência residual de uma junta se existir alguma fenda ou singularidade (Magalhães et al. 2005). Estes métodos permitem uma boa aproximação em juntas em que os fatores críticos de intensidade de tensão foram especificamente determinados, mas torna-se discutível a sua extrapolação para outras geometrias.

Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo das superfícies é menor que  $180^\circ$  (Williams 1959). Este efeito é extensível para a singularidade de tensões na interface entre dois materiais ligados na proximidade de uma esquina viva. A descontinuidade de tensões continua a existir, porém deixam de existir superfícies livres. Para materiais dúcteis, uma quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e esta propaga-se de forma estável, antes da rotura final (Gonçalves et al. 2002). A teoria da mecânica da fratura linear elástica não é apropriada para este tipo de materiais, mas a solução HRR (Hutchinson Rice Rosengreen) desenvolvida por Hutchinson (1968) e por Rice e Rosengren (1968) pode ser utilizada para modelar este tipo de materiais.

Perante materiais que deformam plasticamente, os conceitos da mecânica da fratura linear elástica têm de ser estendidos para a mecânica da fratura elasto-plástica. Neste âmbito, têm sido usadas abordagens baseadas na mecânica da fratura elasto-plástica com bons resultados na previsão da resistência de juntas adesivas fissuradas, como o integral J desenvolvido por Rice e Rosengren (1968), ou como observado nas análises de Fernlund et al. (1994), Choupani (2008), Sørensen e Jacobsen (2003) e Banea et al. (2010). Contudo, o integral J também não pode ser usado como critério para juntas sem um defeito inicial.

### **2.3.2.3 Modelos de dano Coesivo**

Para ultrapassar as limitações associadas às abordagens da mecânica dos meios contínuos e da mecânica da fratura, são necessárias técnicas que modelem de forma eficaz o início e

evolução do dano num material ou estrutura com componentes colados, de forma a prever a sua resistência com precisão.

Baseados na teoria da fratura de Griffith, Barenblatt (1959), (1962) e Dugdale (1960) foram os pioneiros no desenvolvimento dos MDC, que conceptualmente foram finalizados por Hillerborg et al. (1976). Os MDC combinam critérios baseados na resistência para prever o início do dano e na mecânica da fratura para determinar a propagação do dano (Khoramishad et al. 2010). Nas últimas décadas, os MDC emergiram como uma ferramenta popular na investigação dos processos de fratura em materiais e estruturas. Alguns exemplos são os trabalhos de Needleman (1987), Tvergaard e Hutchinson (1992), Xu e Needleman (1994), Ortiz e Pandolfi (1999), Roy e Dodds (2001), Elices et al. (2002), (de Borst 2003), Scheider e Brocks (2003) e Jin e Sun (2005). Esta técnica tem sido também adaptada a simulações de dano por fadiga, denominando-se por modelo de dano coesivo cíclico. Os MDC descrevem a fratura como um fenómeno progressivo (Jousset e Rachik 2014). A ideia básica é concentrar todo o processo de fratura numa zona coesiva de espessura constante (Roth et al. 2014). A zona à frente da ponta da fenda é considerada a zona coesiva, onde ocorre o processo de fratura (Wang 2010). A zona coesiva é delimitada pela superfície coesiva superior e inferior e a sua união ao nível atómico resulta de forças de tração coesivas. Dentro desta zona o comportamento do material é descrito por uma lei constitutiva local, que relaciona a tração transferida ao longo da zona coesiva com o deslocamento relativo das superfícies coesivas, também denominado de separação (Jin e Sun 2006).

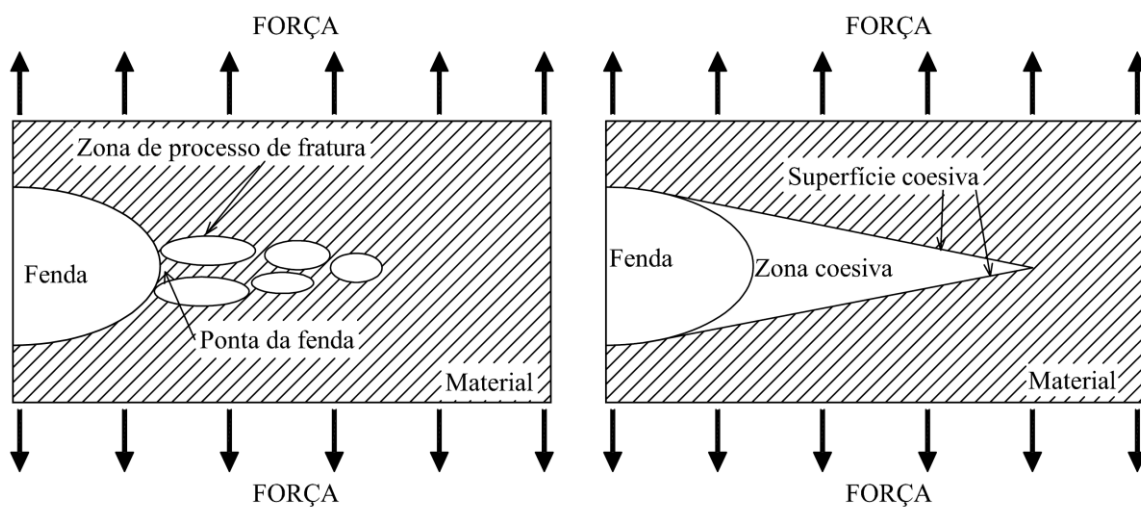


Figura 18 – Zona de processo de fratura à frente da ponta da fenda (a) e zona coesiva equivalente (b).

Considerando a ponta de uma fenda como representado na Figura 18, a singularidade de tensão esperada pela mecânica da fratura linear elástica é substituída por uma distribuição mais realista das tensões na zona coesiva. Assim, a falha do material é controlada por grandezas como deslocamentos e tensões, que se enquadram nos conceitos da mecânica dos materiais (Jin e Sun 2006). A iniciação do dano é determinada quando se atinge o parâmetro de resistência denominado como resistência coesiva. Abaixo da resistência coesiva, ou seja, à frente da zona coesiva, a lei constitutiva é reversível. Após ultrapassada a resistência coesiva, segue-se a zona de amaciamento até à rotura (Figura 19).

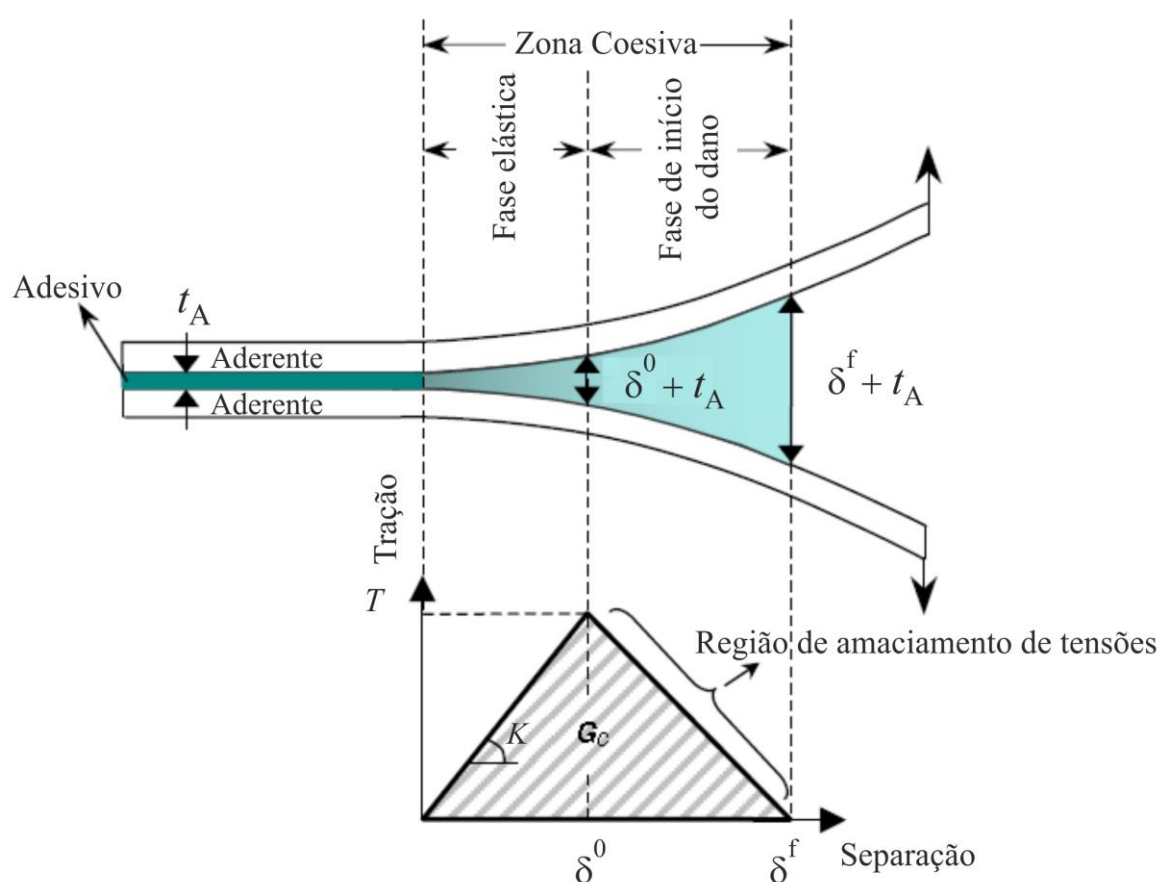


Figura 19 – Representação esquemática da zona do processo de dano numa junta adesiva e a correspondente lei de tração-separação bi-linear.

Em função do exposto percebe-se que esta técnica não necessita da presença de um defeito inicial. Assim, os MDC permitem a simulação do início de uma fenda e a sua propagação até à fratura final (Roth et al. 2014). Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um dado percurso, desvalorizando os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação de leis de tração-deslocamento relativo

(Harris e Adams 1984). Uma característica destes modelos é que podem facilmente ser incorporados em programas que têm como base o MEF e desta forma simular a evolução da força e conseqüentemente do enfraquecimento do material, até a fenda estar completa, permitindo desta forma simular a deterioração das propriedades dos materiais. Assim, os elementos coesivos não representam nenhum material físico, mas descrevem as forças coesivas que surgem quando elementos do material se encontram em separação. Como tal, os elementos coesivos são colocados entre os elementos que modelam os meios contínuos, como mostrado na Figura 20.

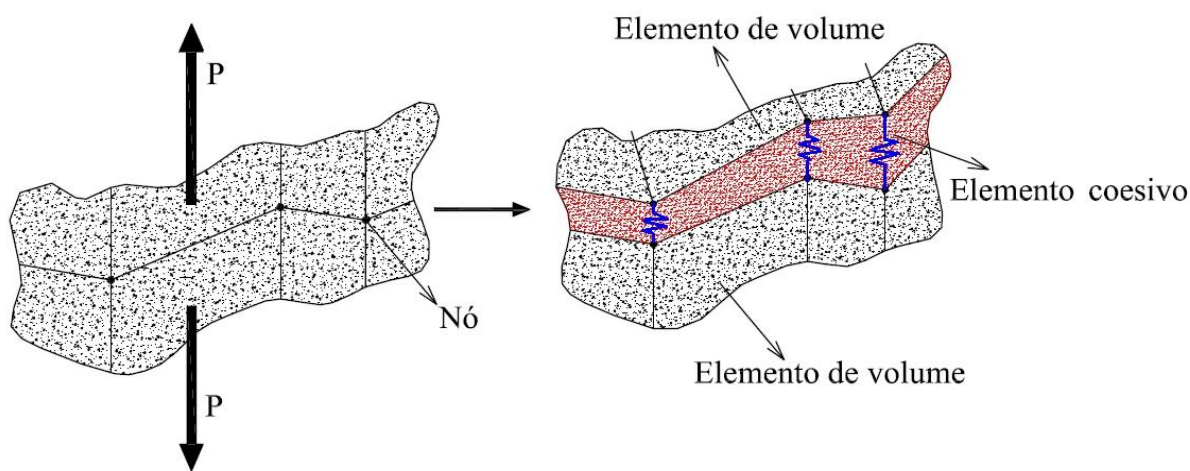


Figura 20 – Aplicação de elementos coesivos em conjunto com elementos de volume (contínuos)  
(Kregting 2005).

Como o trajeto da fenda apenas pode seguir os elementos coesivos, a direção da propagação da fenda está restringida à existência ou não de elementos coesivos. Assim, um dado caminho de fratura torna-se dependente do modelo numérico criado pelo utilizador. Na modelação de dano por elementos coesivos podem ser usadas as técnicas de aproximação local ou contínua (Dillard et al. 2009), uma vez que estes elementos podem ser considerados para modelar uma fratura interfacial de camadas em compósitos ou a interface entre o adesivo e o aderente para simular roturas adesivas (aproximação local), ou por outro lado para simular uma pequena camada de adesivo de espessura constante (aproximação contínua), conforme ilustrado na Figura 21.

A modelação de juntas adesivas pela aproximação contínua tem um grande campo de aplicação, mas a camada única de elementos coesivos usada para modelar a camada adesiva torna impossível a diferenciação dos efeitos ao longo da espessura ou de concentrações de tensões na direção da interface, permitindo apenas obter um comportamento equivalente da camada adesiva (Campilho et al. 2011a).

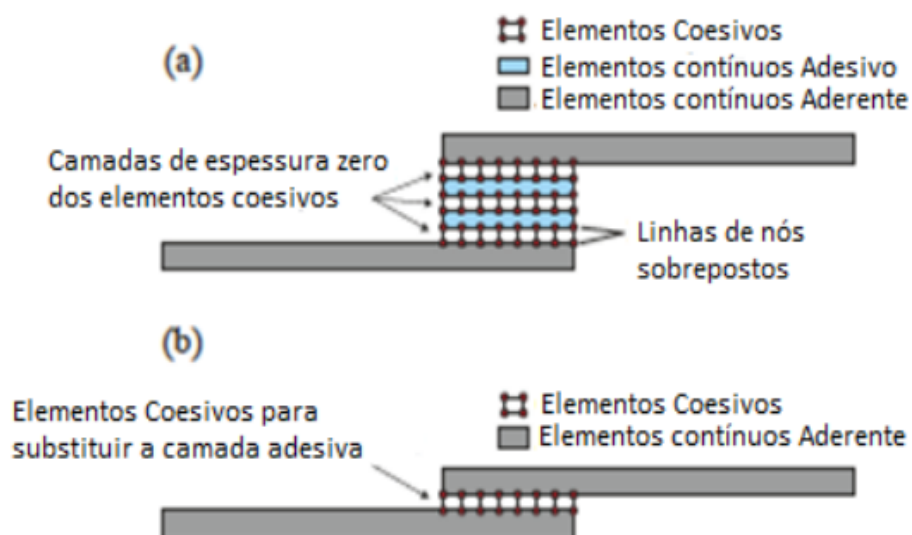


Figura 21 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura com espessura nula: aproximação local (a) e para a modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (da Silva e Campilho 2012b).

As vantagens dos MDC são a sua simplicidade, versatilidade na aplicação em conjunto com o MEF e também a possibilidade da simulação do início, crescimento e propagação da fenda num único modelo numérico (Cornec et al. 2003). Além disso, os MDC podem ser aplicados sem a presença de uma fenda inicial (Wang et al. 2008). Por outro lado, os MDC possibilitam a inclusão de múltiplas possibilidades de rotura, em várias zonas ou interfaces dos materiais (Fernandes et al. 2015). A limitação mais recorrente dos MDC reside na obrigatoriedade de colocar os elementos coesivos nos caminhos de propagação de dano onde se pretende que este ocorra. No entanto, em juntas adesivas esta desvantagem não se coloca, uma vez que a propagação do dano está limitada a planos conhecidos, como por exemplo a camada de adesivo.

### 2.3.2.3.1 Modelo de dano triangular

O uso de MDC na análise de juntas adesivas requer uma lei constitutiva para descrever o comportamento elasto-plástico da camada de adesivo. Tem sido realizada uma investigação intensa focada na determinação experimental da lei mais correta. Exemplo disso são os trabalhos de Olsson e Stigh (1989), Sørensen (2002), Alfredsson (2003), Andersson e Stigh (2004), Andersson e Biel (2006), Sørensen e Kirkegaard (2006) e Leffler et al. (2007).

A Figura 22 exemplifica uma lei coesiva triangular. No ponto O, o material ainda não está em carga e não há separação. Ao longo da linha OA, o material encontra-se no domínio elástico. No ponto A (com a separação  $\delta^0$ ) a tração coesiva alcança o valor máximo admissível

(resistência coesiva ou  $t^0$ ). A seguir ao ponto A, o material começa a sofrer dano e a rigidez coesiva diminui (amaciamento do material). Num ponto genérico B (com separação  $\delta$ ) entre os pontos A e C, a trajetória do descarregamento é linear em direção ao ponto O. A rigidez coesiva cai assim do valor inicial  $K$  para  $K^\delta$  e a tração admissível desce da resistência coesiva  $t^0$  para o valor atual  $t$ . Quando a tração admissível cai para zero no ponto C (correspondendo à extremidade da fenda), a separação é igual a  $\delta^f$  e ocorre a separação completa do material. Depois outra fenda é nucleada ou a ponta de uma fenda existente avança. Qualquer ponto à frente de C (por exemplo o ponto D) está agora fora da zona coesiva e pertence às superfícies da fenda localizadas atrás da ponta da fenda (Chen 2013).

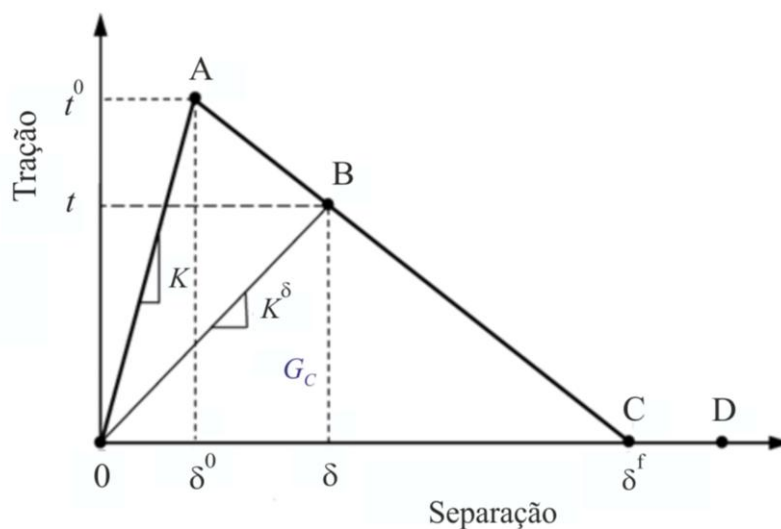


Figura 22 – Lei coesiva triangular (Chen 2013).

A energia crítica coesiva ou tenacidade à fratura,  $G_c$ , que é dada pela área do triângulo, está relacionada com outros dois parâmetros através da relação de área  $G_c = t^0 \times \delta^f / 2$ . Assim, quaisquer dois dos três parâmetros (por exemplo  $t^0$  e  $G_c$ ) podem ser escolhidos como entradas para a lei coesiva triangular. Além dos dois parâmetros  $t^0$  e  $\delta^f$ , outro parâmetro tem de ser definido para descrever completamente a forma da lei coesiva triangular. Este parâmetro pode ser a rigidez coesiva inicial  $K$  ou a separação normal característica  $\delta^0$ , correspondendo à tração máxima. Eles relacionam-se por  $\delta^0 = t^0 / K$  (Chen 2013). Em função do comportamento do tipo de material ou da interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas, de modo a obter resultados mais precisos (Campilho et al. 2013). Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular (Alfano e Crisfield 2001), linear parabólico (Allix e Corigliano 1996), exponencial (Chandra et al. 2002), polinomial (Chen 2002) e trapezoidal (Kafkalidis e Thouless 2002). Pela sua simplicidade,

pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais, a lei triangular é a mais usada (Liljedahl et al. 2006).

O modelo de dano triangular pode ser do tipo 2D ou 3D. No modelo 2D distinguem-se dois modos, o puro e o misto. O modo puro divide-se em modo I, em que a fenda abre por esforços de tração, e em modo II, em que a fenda desliza por esforços de corte (Jousset e Rachik 2014). O modo puro caracteriza-se por a propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva respetiva. No modo misto os modos puros I e II atuam simultaneamente e são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar tração e corte (Campilho et al. 2008).

## **2.4 Juntas híbridas**

A crescente procura de estruturas mais leves, assim como a possibilidade de unir materiais de natureza diferente, têm tornado as juntas híbridas umas das preferidas da indústria automóvel. As juntas híbridas são obtidas por superposição de uma ligação mecânica com uma ligação adesiva, e são consideradas soluções muito interessantes que permitem explorar ambas as vantagens das ligações adesiva e mecânica. As ligações mecânicas, usando parafusos ou rebites, em geral caracterizam-se por permitir a fácil e rápida desmontagem sem dano, por não ser necessária a preparação da superfície e por não serem sensíveis à temperatura e humidade (Choi e Lee 1994, Kim et al. 2006). O uso de ligações adesivas, por outro lado, permite obter componentes que se caracterizam pela boa rigidez, peso reduzido e boa resistência estática e à fadiga, sobretudo devido à ausência de entalhes nos componentes a serem ligados. Em geral, o uso de juntas híbridas permite aumentar o desempenho das juntas adesivas, especialmente em casos de sobrecarga e/ou tensões de fadiga significativas (Kelly 2006, Lee et al. 2010). Se a junta híbrida for apropriadamente projetada, a inserção de parafusos, rebites ou pontos de soldadura origina uma diminuição das tensões máximas nas arestas livres, sobretudo as tensões de arrancamento. Contudo, apesar da investigação intensiva levada a cabo por diversos autores (da Silva et al. 2011), atualmente não existem modelos analíticos fiáveis que possam ser usados na previsão da resistência das juntas híbridas. Desta forma, o projeto de juntas híbridas é maioritariamente baseado na avaliação experimental do seu desempenho. Os primeiros estudos de juntas híbridas em aviões levados a cabo por Hart-Smith (1982) e Hart-Smith (1985) mostraram que, embora não se observando um aumento significativo na resistência em relação às juntas adesivas, a adição de um parafuso exibia vários benefícios

devido à significativa melhoria na propagação do dano. Mais recentemente também Sadowski et al. (2010) realizaram uma análise comparativa de juntas adesivas, rebitadas e híbridas, mostrando que no último caso a adição de um rebite a uma junta adesiva não origina um aumento apreciável da resistência. Por outro lado, as juntas híbridas permitem obter um significativo aumento na absorção de energia e assim uma melhoria significativa na tolerância ao dano e na segurança (Marannano e Zuccarello 2015). A adição de um ponto de soldadura a uma junta adesiva (junta híbrida adesiva-soldada) não diminui a secção resistente, dado não ser necessária a execução de furos, e mantém uma elevada resistência ao arrancamento. Em geral, o colapso da junta híbrida é composto por duas fases, o que ajuda à percepção visual do dano antes da rotura total. Na concepção de juntas híbridas, a geometria da junta e os materiais podem ser ajustados para uma aplicação específica, dependendo dos objetivos e das condições de serviço (Campilho et al. 2012). As propriedades destas juntas vão depender não só da natureza e propriedades do adesivo, mas também do sistema mecânico usado, da compatibilidade com a geometria e também das condições de fabrico da junta (Sadowski et al. 2011).

#### **2.4.1 Juntas adesivas-soldadas**

As juntas híbridas adesivas-soldadas obtêm-se através da combinação da ligação adesiva com a ligação soldada, sendo a soldadura de resistência por pontos a técnica de soldadura mais usada no fabrico deste tipo de juntas. A sinergia entre ligação adesiva e soldadura por pontos oferece vantagens competitivas em relação às ligações adesivas, tais como superior resistência e rigidez, maior resistência ao arrancamento e mais fácil fabrico, dado que não são necessários sistemas de posicionamento durante a cura. Estas juntas também apresentam uma melhor distribuição de tensões, já que permitem diminuir as concentrações de tensões nas arestas livres (Campilho et al. 2012). Têm melhor resistência à corrosão do que as juntas aparafusadas e rebitadas, e não diminuem a secção transversal resistente da junta por não necessitarem de furos na sua execução. Comparadas com as juntas soldadas por pontos, as juntas adesivas-soldadas exibem melhores características de resistência à fadiga devido à redução das concentrações de tensões na periferia do ponto de soldadura (Campilho et al. 2012). De um modo geral apresentam outras vantagens, como melhor isolamento acústico, eliminação das operações de vedação da junta, redução de custos de produção e possibilidade de automação do processo (Al-Samhan e Darwish 2003b, Darwish e Al-Samhan 2004a). O grau de aceitação das juntas adesivas-soldadas tem vindo a aumentar com o aumento do conhecimento do seu processo de fabrico e as suas características mecânicas obtidas (Darwish e Ghanya 2000).

Contudo, mesmo com todas as potenciais vantagens deste tipo de junta, existe ainda alguma hesitação no uso desta tecnologia em componentes estruturais primários. Esta relutância em parte é devida ao pouco estudo e compreensão das suas propriedades mecânicas, da durabilidade das juntas adesivas-soldadas e do papel do ponto de soldadura e adesivo na capacidade de carga da junta (Chang et al. 2001). Atualmente ainda não existe nenhum critério de rotura estabelecido para este tipo de juntas. Claramente a análise de tensões-deformações neste tipo de juntas é mais complexa, e ao mesmo tempo a camada de adesivo é muito fina para que as suas tensões internas possam ser medidas experimentalmente com exatidão (Chang et al. 2000). Atualmente, muitas ligações em componentes em automóveis (Figura 23), aviões, helicópteros, cápsulas de mísseis, sondas espaciais e estruturas de veículos são ligações adesivas-soldadas (Campilho et al. 2012).



Figura 23 – Juntas híbridas adesivas-soldadas na carroçaria de um automóvel (Bartczak et al. 2013).

Além do processo de soldadura por resistência, podem ser também usados outros processos de soldadura nas juntas adesivas-soldadas, como processo MIG ou soldadura a laser (E.A.A 2015). As juntas adesivas-soldadas foram pela primeira vez desenvolvidas e usadas na Ex-URSS em aviões AN-24 (Darwish e Ghanya 2000). Existem dois métodos de fabrico de uma junta adesiva-soldada. No método *flow-in* os componentes são inicialmente soldados e posteriormente um adesivo de baixa viscosidade penetra por capilaridade no interior da junta e é curado. O método *flow-in* foi o primeiro a ser usado no fabrico de juntas híbridas adesivas-soldadas. O segundo método, *weld-through*, consiste na aplicação do adesivo e posterior realização do ponto de soldadura antes da cura do adesivo. Na Figura 24 pode-se observar de forma ilustrativa os passos de preparação da junta pelos métodos citados. Até recentemente, o método *weld-through* ainda não se encontrava entendido devido à escassa investigação teórica e experimental nesta área (trabalho experimental de Charbonnet et al. (2000) e

trabalhos metalúrgicos/experimentais e numéricos de Darwish e Ghanya (2000) e Darwish (2003). Charbonnet et al. (2000) testaram ligações adesivas-soldadas em duas qualidades de aço de baixa liga com dois tipos de adesivos (epóxico e borracha), verificando um desempenho globalmente melhor das juntas quando fabricadas pelo método *flow-in*.

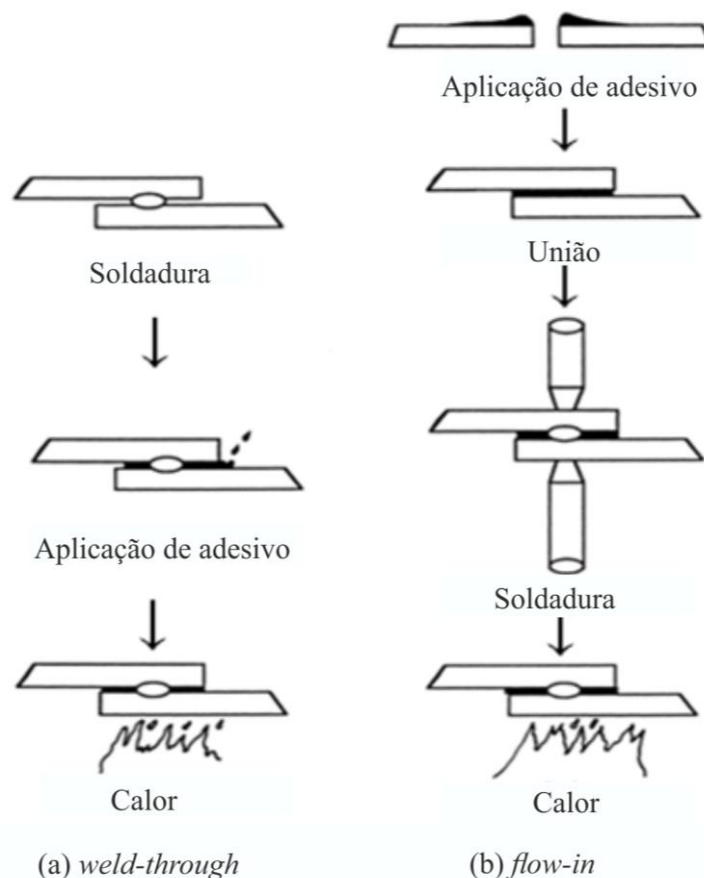


Figura 24 – Técnicas de fabrico de juntas adesivas-soldadas: (a) *weld-through* e (b) *flow-in* (da Silva et al. 2011).

Em relação à resistência das juntas adesivas-soldadas, diferentes estudos mostraram, quer experimentalmente ou por MEF, as vantagens das juntas de sobreposição adesivas-soldadas quando comparadas com juntas soldadas em esforços cíclicos ou estáticos (Campilho et al. 2012). Al-Samhan e Darwish (2003b) mostraram que as tensões principais máximas numa junta soldada são cerca de seis vezes maiores que numa junta híbrida soldada. Estudos levados a cabo por Moroni et al. (2010) permitiram concluir que, em geral, as juntas híbridas soldadas aumentam a resistência, rigidez e absorção de energia em relação às juntas simplesmente soldadas. Observou-se também uma forte redução da dependência da temperatura e envelhecimento em relação às juntas adesivas.

### 2.4.1.1 Sobreposição simples

A junta híbrida de sobreposição simples representada esquematicamente na Figura 25 é a junta mais comum encontrada na prática. Esta junta é fácil de fabricar, e também aquela que tem sido mais objeto de investigação.

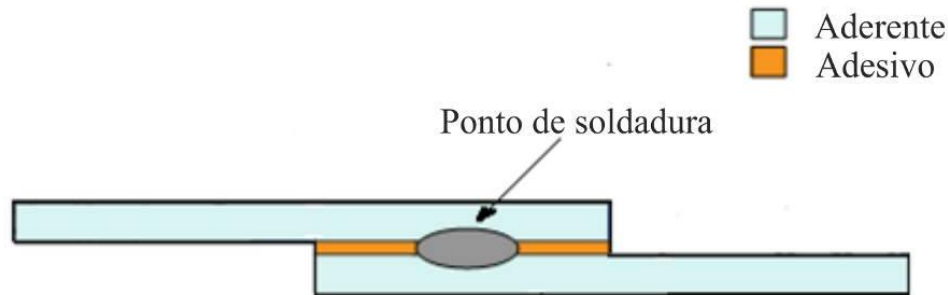


Figura 25 – Junta de sobreposição simples adesiva-soldada (da Silva et al. 2011)

Estudos levados a cabo por Chang et al. (2001) mostraram que existem elevadas concentrações de tensões na periferia do ponto de soldadura da junta soldada, que são acentuadamente diminuídas e mais uniformemente distribuídas com a adição da camada de adesivo nas juntas adesivas-soldadas em comparação com as juntas apenas soldadas. Obtêm-se assim juntas com melhores propriedades mecânicas, especialmente na resistência à fadiga. Al-Samhan e Darwish (2003b) concluíram que as tensões principais máximas que ocorrem em juntas de sobreposição simples soldadas são cinco a seis vezes maiores quando comparadas às das juntas adesivas-soldadas e apenas adesivas, demonstrando também o papel do adesivo no aumento da resistência das juntas adesivas-soldadas. Os mesmos autores, em estudos de juntas adesivas com aderentes de espessuras diferentes, mostraram também um aumento significativo da resistência ao corte e ao arrancamento com a adição de um ponto de soldadura (Darwish e Al-Samhan 2004b). O desenvolvimento de métodos de previsão da rotura deste tipo de juntas tem sido objeto de intenso estudo. Sadowski et al. (2013), através do *software* Abaqus® e usando elementos coesivos, compararam a junta de sobreposição simples adesiva-soldada com apenas soldada, e concluíram que a junta híbrida tinha cerca de duas vezes e meia maior capacidade de carga que a junta soldada. Usando MDC triangulares no MEF, Campilho et al. (2012) realizaram um estudo paramétrico em juntas de sobreposição simples, híbridas, adesivas e soldadas. A sua resistência foi comparada para diferentes comprimentos de sobreposição. Observaram-se nas juntas soldadas concentrações de tensões de corte e arrancamento na periferia do ponto de soldadura e também uma elevada rotação dos aderentes com conseqüente separação nas extremidades de sobreposição. Nas juntas

adesivas os picos de tensões situam-se nas extremidades de sobreposição. Por outro lado, as juntas adesivas-soldadas beneficiam de transmissão de tensões de corte mais elevadas na zona interior da sobreposição, pelo ponto de soldadura, devido à maior rigidez deste relativamente ao adesivo. Pela comparação da resistência das três técnicas de ligação verificou-se uma vantagem considerável da junta híbrida para  $L=30$  mm. Para  $L=15$  mm, a melhoria foi apenas observada relativamente à junta adesiva, devido à rotura prematura da camada de adesivo. Valores de  $L_0$  mais elevados revelaram uma influência menor no que concerne ao aumento de resistência relativamente às juntas adesivas, devido à plastificação dos aderentes decorrente dos maiores valores de carga obtidos e também devido à alteração da distribuição das tensões. No entanto, as juntas híbridas foram sempre recomendadas em detrimento das juntas soldadas.

#### 2.4.1.2 T-peel

As juntas adesivas T-peel possuem uma geometria que as torna vulneráveis a esforços de tração, uma vez que geram na junta adesiva esforços de arrancamento. Assim, ao transformar uma junta T-peel adesiva numa junta T-peel híbrida pela adição de rebite, parafuso ou ponto de soldadura (Figura 26), a sua resistência ao arrancamento vai aumentar drasticamente. No entanto, pode-se observar um decréscimo da resistência à fadiga.

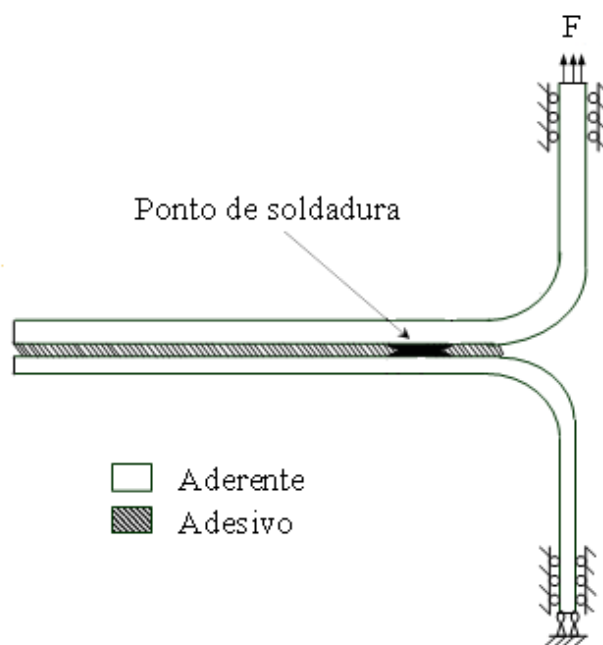


Figura 26 – Representação esquemática de uma junta T-peel adesiva-soldada.

Os primeiros estudos sobre o processo de dano em juntas T-peel adesivas-soldadas devem-se a Gilchrist e Smith (1993) que, em estudos de resistência à fadiga, usaram elementos coesivos para caracterizar a região de início, propagação e direção da fenda neste tipo de juntas. Neste estudo, os autores observaram um crescimento da fenda coesivo com início no interior do filete remanescente de adesivo e propagando-se até à superfície. Darwish e Al-Samhan (2004b), em estudos paramétricos pelo MEF, compararam juntas T-peel soldadas com aderentes de espessuras iguais e diferentes com juntas T-peel adesivas-soldadas com aderentes de espessuras diferentes. Concluiu-se que a introdução da camada de adesivo aumenta drasticamente a resistência de uma junta soldada. Observou-se também que na zona onde ocorriam as maiores tensões principais, as mesmas eram reduzidas em 85 % com a introdução da camada de adesivo, recomendando o uso desta tecnologia em situações de espessuras diferentes de aderentes. Existem na literatura poucos estudos acerca do comportamento mecânico destas juntas. Apesar de estas envolverem alguma complexidade, é de extrema importância o estudo da previsão da sua resistência. De facto, em termos construtivos este tipo de juntas permite ligar elementos topo a topo, que é uma configuração que ocorre com bastante frequência na indústria.

#### **2.4.2 Juntas adesivas-aparafusadas**

As juntas adesivas-aparafusadas atualmente podem ser encontradas, por exemplo, na indústria aeronáutica ou aplicações da indústria automóvel (Figura 27). Nos últimos anos foram publicados poucos trabalhos relativos a este tipo de juntas, sendo um dos mais importantes o trabalho de Lee et al. (2010), baseado no índice de área de falha (*Failure Area Index*). Este tipo de junta pode ser executado com a técnica de parafuso e fêmea (Figura 28), parafusos autoroscantes ou parafusos de injeção (E.A.A 2015). O trabalho analítico de Hart-Smith (1982) foi um dos primeiros sobre as juntas adesivas-aparafusadas pela consideração de juntas em degrau com aderentes compósitos. Como técnica de previsão de resistência, utilizou-se a teoria não linear da mecânica de meios contínuos, com uma reprodução satisfatória dos resultados experimentais.



Figura 27 – Junta adesiva aparafusada em estrutura de automóvel (E.A.A 2015).

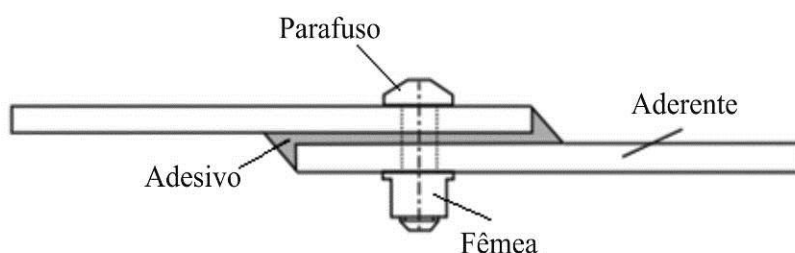


Figura 28 – Representação esquemática de uma junta híbrida adesiva-aparafusada com a técnica parafuso/fêmea (Fu e Mallick 2001).

Fu e Mallick (2001) investigaram a resistência à fadiga e a esforços estáticos de juntas híbridas adesivas-aparafusadas em compósitos estruturais moldados por injeção. Concluiu-se que o desempenho das juntas é dependente da geometria das anilhas de aperto, que afeta a distribuição da força de aperto. Foi ainda observado que este tipo de junta, no sistema de material estudado, tinha melhor resistência estática e maior vida à fadiga relativamente às juntas adesivas. Kelly (2005), usando técnicas de MEF, estudou juntas de sobreposição simples com aderentes compósitos, incluindo no seu estudo os efeitos do contacto entre furo e parafuso e as não linearidades do material. Os resultados obtidos mostraram que esta tecnologia beneficia a resistência da junta, especialmente quando se trata de juntas flexíveis. Moroni et al. (2010), em análises experimentais, mostraram que a adição de adesivo beneficia mais as juntas aparafusadas do que as soldadas e aumenta substancialmente a resistência da junta.

### 2.4.3 Juntas adesivas-rebitadas

As ligações híbridas adesivas-rebitadas (Figura 29) são um método de ligação de componentes de máquinas de forma durável. Este tipo de ligação tem grande aplicação na tecnologia moderna de ligações de componentes, especialmente na aviação (Sadowski et al. 2011).



Figura 29 – Junta híbrida de sobreposição simples adesiva-rebitada (Sadowski et al. 2011).

A adição de rebites à junta adesiva de sobreposição simples aumenta a absorção de energia durante o processo de rotura em comparação com a junta rebitada ou adesiva. O aumento da rigidez da junta híbrida proporciona uma maior fiabilidade e durabilidade do sistema estrutural (Sadowski et al. 2011). Sadowski et al. (2013), em estudos de juntas de sobreposição dupla, mostraram que o aumento da capacidade de carga numa junta adesiva-rebitada era superior a 10 vezes em comparação com a junta simplesmente rebitada e 10 % com a junta adesiva. Globalmente, a junta híbrida adesiva-rebitada tem um comportamento bastante melhor que as juntas adesivas ou rebitadas (Sadowski et al. 2011). Contudo, a resistência desta junta é dependente da sua geometria, número de rebites e sua disposição na junta, como também do tipo de adesivo usado (Sadowski e Zarzeka-Raczkowska 2012).

#### 2.4.4 Outros tipos de juntas híbridas

Outra tecnologia de juntas híbridas são as juntas adesivas-cravadas. Este tipo de juntas apresenta a vantagem de ser um processo de ligação a frio, e o seu único consumível é o adesivo (E.A.A 2015). O cravamento é uma técnica de ligação em que duas folhas metálicas são apertadas (comprimidas) entre um cunho e uma matriz. A união das peças é devida ao travamento a que ficam sujeitas entre si por efeito da deformação plástica local provocada pelo cunho, como se pode verificar na Figura 29. Estudos numéricos de Balawender et al. (2012) concluíram que executar o cravamento antes da cura do adesivo é mais efetivo no aumento de resistência da junta. A resistência mecânica deste tipo de junta depende fortemente das propriedades do adesivo e aderentes (Balawender et al. 2011).



Figura 30 – Secção longitudinal de uma junta híbrida adesiva-cravada (Balawender et al. 2011)

A resistência da junta cravada não é alta comparada com outras técnicas de ligação, mas a adição do adesivo pode aumentar a sua resistência, criando uma junta híbrida com aplicações na indústria (Sadowski et al. 2013).



# 3 Trabalho experimental

## 3.1 Materiais

Neste subcapítulo são apresentados os diversos materiais utilizados no trabalho experimental, ou seja, os aderentes e os adesivos. Também é feita uma descrição das suas propriedades mecânicas mais relevantes, que são utilizadas na análise numérica descrita no capítulo 4.

### 3.1.1 Aderentes

O material utilizado para o aderente trata-se de um aço de baixa liga DIN C45E. Este material foi submetido a ensaios de tração, onde foram realizados 5 ensaios. As curvas de tensão-deformação ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) à tração estão apresentadas na Figura 31.

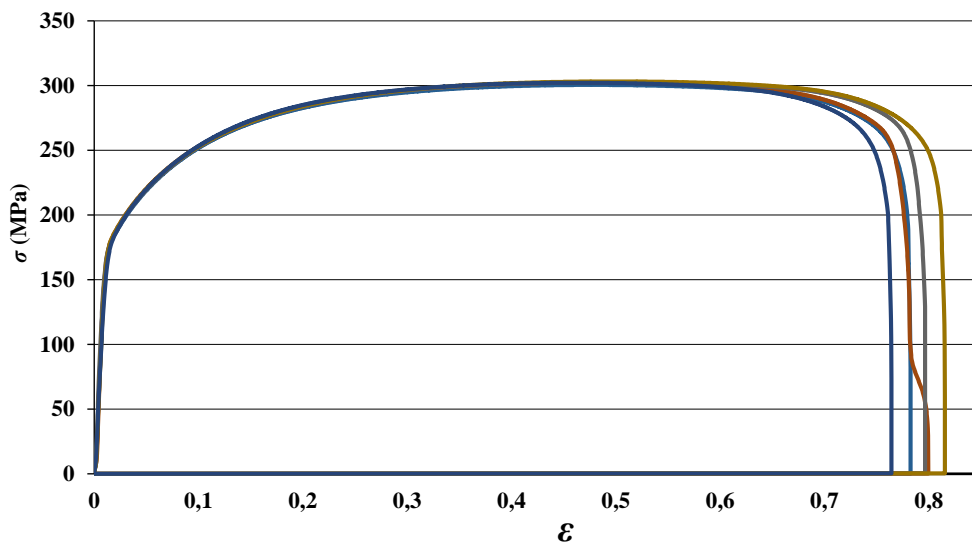


Figura 31 – Curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  à tração do aço DIN C45E (Marques 2014).

Pela análise da Figura 31 observa-se uma boa repetibilidade dos resultados obtidos em termos de rigidez elástica à tração, 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 ( $\varepsilon_r$ ). Como valores médios e respetivo desvio padrão obteve-se  $\sigma_{\text{elast}}=180,70 \pm 1,22$  MPa,  $\sigma_{\text{rot}}=301,93 \pm 0,79$  MPa e  $\varepsilon_r=79,16 \pm 1,93$  %. Foi utilizado um valor de  $E$  de 210 GPa como valor de referência para o material em estudo.



Figura 32 – Rotura similar nos 5 provetes de aço DIN C45E submetidos ao ensaio de tração.

Como se pode verificar na Figura 32, a rotura dos aderentes foi similar e acompanhada de estrição acentuada devido à ductilidade do material.

### 3.1.2 Adesivos

Neste tópico descrevem-se os adesivos usados no trabalho experimental e suas propriedades. No fabrico das juntas T-peel usaram-se três tipos de adesivos: o Araldite® AV138, que se caracteriza por ser um adesivo epóxico frágil, o Araldite® 2015, definido como sendo um adesivo epóxico dúctil, e o adesivo poliuretano dúctil Sikaforce® 7752.

#### 3.1.2.1 Adesivo Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 descreve-se como um adesivo epóxico frágil mas de elevada resistência, adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros (Campilho et al. 2013). As curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  dos provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 33. Estas foram obtidas experimentalmente no trabalho de Campilho et al. (2013). Na Tabela 8 visualizam-se as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo.

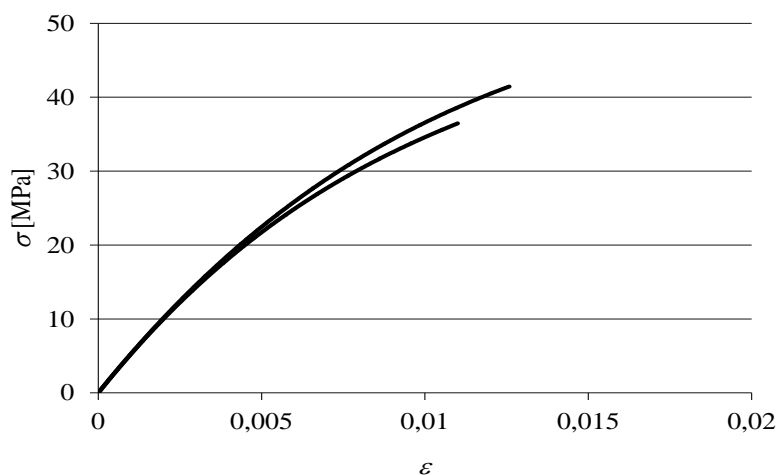


Figura 33 – Curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 (Moreira 2013).

Tabela 8 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 (Neto et al. 2012).

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de <i>Young</i> , $E$ [GPa]	4,89±0,81
Coefficiente de <i>Poisson</i> , $\nu^b$	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, $\varepsilon_f$ [%]	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. (2012)

### 3.1.2.2 Adesivo Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 define-se como um adesivo epóxico estrutural de duas partes, de ductilidade moderada e que, comparando com o adesivo Araldite® AV138, oferece uma resistência à tração e corte inferiores. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentração (tipicamente nas extremidades das juntas), devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes (Campilho et al. 2013). Apresentam-se na Figura 34 as curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  dos provetes maciços para este adesivo, obtidas experimentalmente em trabalhos anteriores (Campilho et al. 2013).

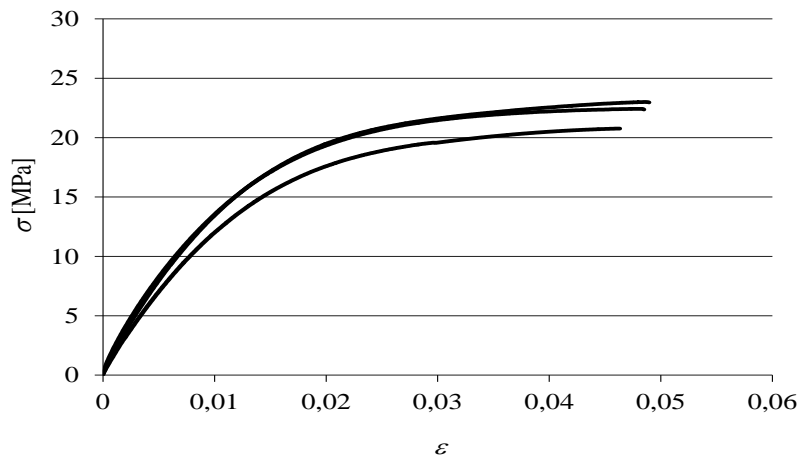


Figura 34 – Curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015.

Na Tabela 9 estão apresentadas as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo. Comparando os valores deste adesivo com o Araldite® AV138, verifica-se que a deformação de rotura ao corte é quase seis vezes superior. Por outro lado, a tensão de rotura ao corte e à tração do Araldite® AV138 é praticamente o dobro da do Araldite® 2015.

Tabela 9 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 (Campilho et al. 2013).

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de <i>Young</i> , $E$ [GPa]	1,85±0,21
Coefficiente de <i>Poisson</i> , $\nu^a$	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, $\varepsilon_f$ [%]	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

### 3.1.2.3 Adesivo Sikaforce® 7752

O adesivo Sikaforce® 7752-L60 (designado abreviadamente no presente trabalho como Sikaforce® 7752) é um adesivo dúctil, conforme se pode observar na curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  da Figura 35. Trata-se de um adesivo à base de poliuretano, que se apresenta sob a forma de dois componentes, resina e endurecedor. A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 100g/20g, respetivamente. Estas informações foram retiradas da ficha técnica

disponibilizada pelo fabricante. A Figura 35 representa as curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  de provetes maciços de Sikaforce® 7752.

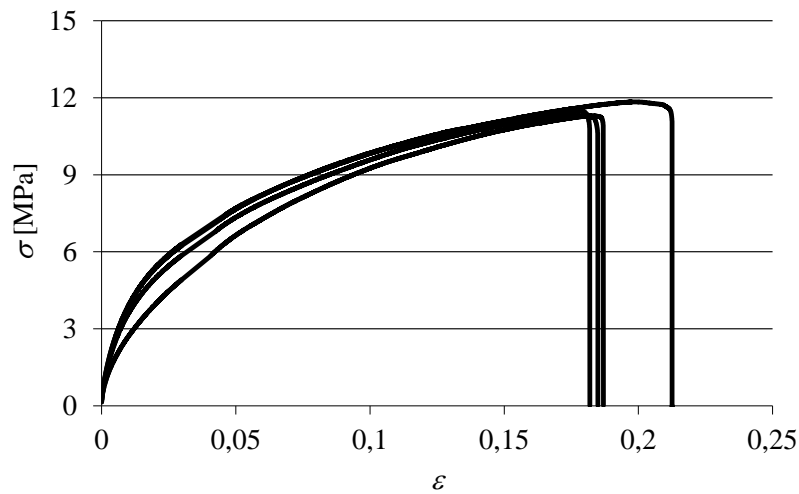


Figura 35 – Curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  de provetes maciços de Sikaforce® 7752.

Na Tabela 10 apresentam-se as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo (Faneco 2014).

Tabela 10 – Propriedades mecânicas do adesivo Sikaforce 7752® (Faneco 2014).

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, $\varepsilon_f$ [%]	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

Em função das propriedades obtidas, é expectável que a resistência de juntas adesivas coladas com este adesivo seja elevada, pois este adesivo combina uma resistência muito aceitável com a elevada ductilidade dos poliuretanos. Assim, são permitidas tensões elevadas na camada de adesivo, bem como um efeito acentuado de plastificação antes da rotura nas

extremidades do adesivo com o carregamento progressivo das juntas, o que conduz a uma elevada resistência.

### 3.2 Geometrias estudadas

#### 3.2.1 Dimensões e configurações de juntas

A Figura 36 apresenta uma representação esquemática da geometria, dimensões e modo de carregamento das juntas T-peel soldadas, adesivas e híbridas. 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.

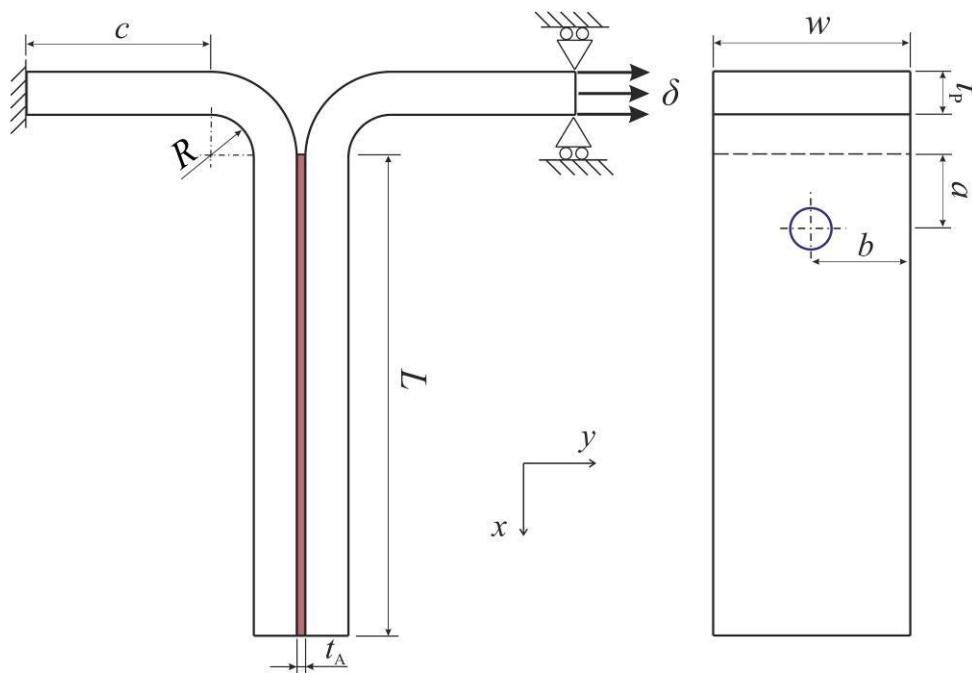


Figura 36 – Dimensões e geometria das juntas T-peel.

#### 3.2.2 Fabrico dos provetes

No processo de fabrico dos provetes, os aderentes foram obtidos através do corte em guilhotina de tiras de aço DIN C45E já com a largura final. Posteriormente, as tiras foram quinadas de forma a obter provetes com dimensões finais requeridas (Figura 37).



Figura 37 – Provetes cortados e quinados.

Seguidamente procedeu-se à preparação das superfícies através do processo mecânico de granalhagem (Figura 38). Este processo é de extrema importância, e tem como finalidade remover a camada superficial de óxidos (decapagem) e aumentar a rugosidade da superfície de colagem, promovendo desta forma um aumento da superfície de contacto entre adesivo e aderente e, conseqüentemente, das forças de adesão. A operação de granalhagem dos aderentes foi realizada no laboratório de ensaios mecânicos do ISEP numa granalhadora Cidblast® modelo RT6S (Figura 38) com granalha de alumina.



Figura 38 – Granalhagem mecânica dos provetes.

Depois da granalhagem mecânica, as superfícies foram cuidadosamente limpas com acetona para desgorduramento e remoção de resíduos resultantes do processo de granalhagem. Este segundo processo caracteriza-se como sendo um processo passivo químico. Após as operações de limpeza das superfícies procedeu-se à fixação, com o auxílio de fita adesiva, de dois fios com espessura calibrada de 0,2 mm ao longo da superfície de colagem, de forma a garantir uma camada de adesivo uniforme de espessura 0,2 mm, como pode ser observado na Figura 39.

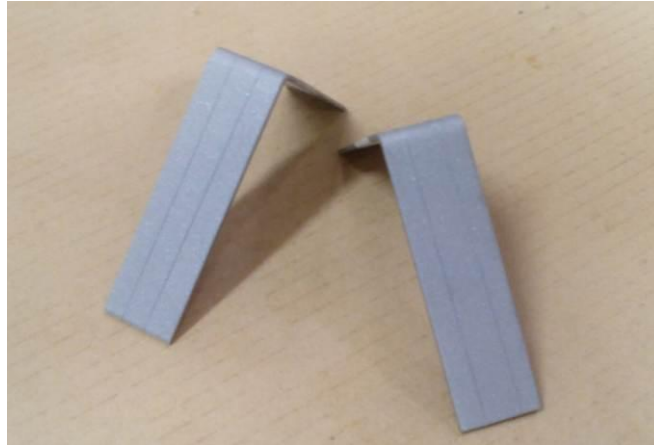


Figura 39 – Aderentes após granalhagem, limpeza das superfícies de ligação e colocação de fio de 0,2 mm de diâmetro ao longo da superfície de colagem.

Após a superfície dos provetes estar devidamente preparada para receber o adesivo, procedeu-se à preparação dos adesivos, pesando-se as massas necessárias para obter uma relação mássica entre resina/endurecedor respetivamente de 100/40 para o Araldite<sup>®</sup> AV138, 1/1 para o Araldite<sup>®</sup> 2015 e 5/1 para o Sikaforce<sup>®</sup> 7752 (Figura 40).



Figura 40 – Pesagem das massas de resina e endurecedor para o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7752.

Imediatamente após a preparação do adesivo, e por forma a evitar o seu endurecimento, procedeu-se à sua aplicação na superfície de um dos aderentes e à sua união com o aderente complementar. Assim, e também de forma a prevenir a existência de vazios na camada de adesivo e obter uma espessura de adesivo uniforme ao longo de toda a junta, assim como a maximização da molhagem do adesivo na superfície do aderente, foi aplicada pressão com grampos, uniformemente distribuídos ao longo do comprimento de colagem. Seguidamente, para garantir a correta posição dos aderentes, as juntas foram colocadas horizontalmente sobre uma chapa plana protegida com Teflon<sup>®</sup> para evitar a colagem da junta à chapa, como

pode ser visto na Figura 41. As juntas adesivas foram deixadas a curar à temperatura ambiente.



Figura 41 – Juntas adesivas com alicates de pressão dispostas horizontalmente sobre placa plana protegida com Teflon®.

As juntas híbridas, após colagem, foram ainda sujeitas ao processo de soldadura usando a técnica *weld-through*, como se pode observar na Figura 42. O processo de soldadura que se descreve de seguida é válido para as juntas híbridas e também para as juntas puramente soldadas. Para a realização da soldadura, e antes do procedimento de colagem para as juntas híbridas, marcou-se nos provetes a localização requerida para o ponto de soldadura. De seguida, fixaram-se as juntas num *gabarit* adequado, por forma a facilitar o manuseamento das mesmas e manter os provetes imóveis durante a aplicação do ponto de soldadura.



Figura 42 – Aplicação de ponto de soldadura nas juntas híbridas.

A operação de soldadura foi realizada a um máximo de 10 minutos após a aplicação do adesivo. A operação de soldadura foi realizada num equipamento de soldadura CEA® NKLT-28, equipado com eléctrodos com uma geometria em forma tronco de cone ( $\text{Ø}6$  mm nas arestas de contacto) de acordo com a norma ISO 5182. A força de aperto dos eléctrodos

é ajustável (até 2,2 kN) e aplicada por pedal. A máquina de soldadura CEA<sup>®</sup>NKLT-28 tem uma capacidade máxima de corrente de curto-circuito de 14 kA e uma potência nominal de soldadura de 25kVA. Os parâmetros de entrada no equipamento são o tempo de aperto, representando 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, correspondendo ao tempo necessário para se atingir a corrente de soldadura requerida, fixado em 5 ciclos, o tempo de soldadura, correspondendo à duração do fluxo de corrente e fixado em 35 ciclos, e a corrente de soldadura, relativa à percentagem de corrente fornecida pela máquina de soldadura, fixada a 45 % da capacidade da máquina (6,3 kA) (Campilho et al. 2012).

Após a cura do adesivo nas juntas adesivas e híbridas procedeu-se remoção do excesso de adesivo com lima, como se pode observar na Figura 43.



Figura 43 – Remoção de excesso de adesivo depois de curado.

### 3.3 Condições de ensaio

Após fabricadas, as juntas ficaram em repouso durante pelo menos uma semana para que os adesivos usados na sua colagem atingissem completamente o estado curado. Posteriormente à cura do adesivo procedeu-se à realização dos ensaios de tração dos respectivos provetes para cada tipo de junta em estudo (soldadas, adesivas e adesivas-soldadas).



Figura 44 – Máquina de ensaios Shimadzu® AG-X 100 e computador de aquisição de dados.

Foram testados 5 provetes para cada configuração de junta na máquina de ensaios de tração Shimadzu® AG-X 100 (Figura 44), equipada com uma célula de carga de 100 kN, à temperatura ambiente, e em controlo de deslocamentos (1 mm/min). A distância inicial entre as maxilas foi de 50 mm. Para cada tipo de adesivo foram realizados 10 ensaios, 5 em juntas adesivas e 5 em juntas adesivas-soldadas.

### 3.4 Resultados das juntas

Neste capítulo são descritos os modos de rotura das juntas adesivas, híbridas e soldadas. São também apresentadas as curvas  $P-\delta$  das juntas soldadas, adesivas e adesivas soldadas. Com base nos resultados experimentais efetua-se também uma análise comparativa da sua resistência, expondo-se possíveis fatores contributivos para os resultados observados. No entanto, a análise detalhada dos resultados obtidos vai ser conduzida apenas no capítulo 4, com a ajuda da informação proveniente da análise numérica.

#### 3.4.1 Juntas soldadas

A Figura 45 mostra o aspeto das juntas soldadas após a rotura total. Pode-se observar que a rotura da junta ocorreu pelo rompimento do aderente com início no contorno do ponto de soldadura, e não pelo destacamento do ponto de soldadura.



Figura 45 – Provetes de uma junta soldada após rotura total.

Na Figura 46 apresentam-se as curvas força-deslocamento ( $P-\delta$ ) obtidas experimentalmente para as juntas soldadas. Não foram considerados os valores obtidos em dois ensaios devido ao desvio apresentado em relação aos restantes provetes ensaiados. Como se pode observar na Figura 46, as curvas apresentam um comportamento idêntico em todo o processo de rotura. Nas curvas da Figura 46 pode-se observar uma subida inicial com declive acentuando da carga sustentada até  $\approx 1000$  N. A partir deste valor, o início da deformação do aderente à flexão origina uma subida com menor declive da carga sustentada. A carga máxima corresponde ao início da rotura do aderente na periferia do ponto de soldadura. O valor mais elevado de força máxima obtida nos ensaios considerados foi 3598,3 N para um deslocamento de 20,1 mm, sendo o menor de 3339,6 N, correspondente a um deslocamento de 20,0 mm. Após o início da deformação plástica dos aderentes na vizinhança do ponto de soldadura, a carga diminui até valores da ordem dos 2400 N. Segue-se o rompimento de um dos aderentes pela mesma zona, que se propaga pelas duas bandas laterais do ponto de soldadura, originando um novo aumento da carga sustentada até ser atingido um máximo local para um deslocamento ( $\delta$ ) de aproximadamente 33,2 mm. A este máximo local corresponde o afastamento máximo dos dois caminhos de rotura, ou seja, um rompimento 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, originando um arrancamento de material em forma de lágrima, como se pode ver na Figura 45. A este arrancamento corresponde o 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.

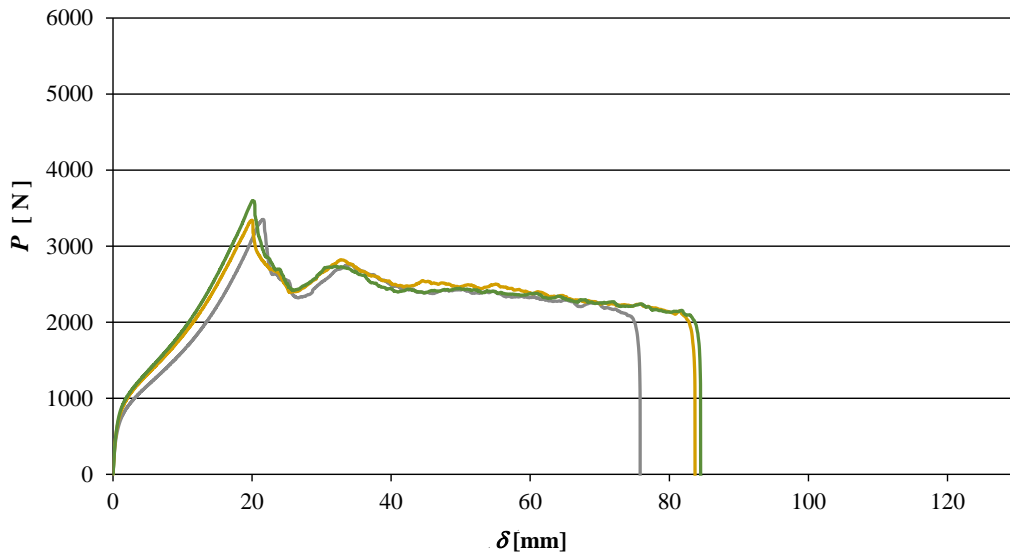


Figura 46 – Curvas  $P$ - $\delta$  experimentais das juntas soldadas.

### 3.4.2 Juntas coladas e híbridas com o Araldite® AV138

Após a rotura das juntas, efetuou-se uma análise visual das superfícies de fratura das juntas coladas com o Araldite® AV138. Observou-se que ambos os aderentes permaneceram cobertos com uma fina camada de adesivo, como pode ser observado na Figura 47. Como tal, o modo de rotura das juntas coladas com o Araldite® AV138 é um modo de rotura coesivo.



Figura 47 – Modo de rotura nas juntas coladas com o Araldite® AV138.

Na Figura 48 apresentam-se as curvas  $P-\delta$  obtidas experimentalmente para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138. Não foi considerada a curva  $P-\delta$  de um provete por não apresentar significado estatístico, devido aos valores de  $P$  substancialmente menores em relação aos restantes provetes ensaiados. A causa deste desvio deveu-se possivelmente à falta de adesivo na junta. Contudo, a análise da Figura 48 mostra uma boa repetibilidade dos resultados obtidos nos restantes ensaios, refletindo a qualidade do fabrico das mesmas. Na análise das curvas  $P-\delta$  da Figura 48 pode-se observar inicialmente um aumento da carga sustentada até atingir o seu máximo ( $P_{\max}$ ). Ao valor de  $P_{\max}$  corresponde o início da fenda no adesivo. Pode-se observar também que as curvas apresentam um comportamento linear até se atingir o valor de  $P_{\max}$ , sendo que o declive da reta de subida da carga é inversamente proporcional à ductilidade do adesivo. O valor mais elevado de força máxima obtida foi de 1256,6 N associado a um deslocamento de 0,130 mm, sendo o menor valor de 1080,8 N para um deslocamento de 0,107 mm. Logo após o início da fenda a carga sustentada diminui verticalmente, o que evidencia que a ligação adesiva após o início da fenda no adesivo perde grande parte da sua resistência, quando submetida a esforços de arrancamento. Seguidamente, a fenda vai-se propagando ao longo do adesivo, acompanhada de uma ligeira diminuição da carga sustentada até atingir a rotura total.

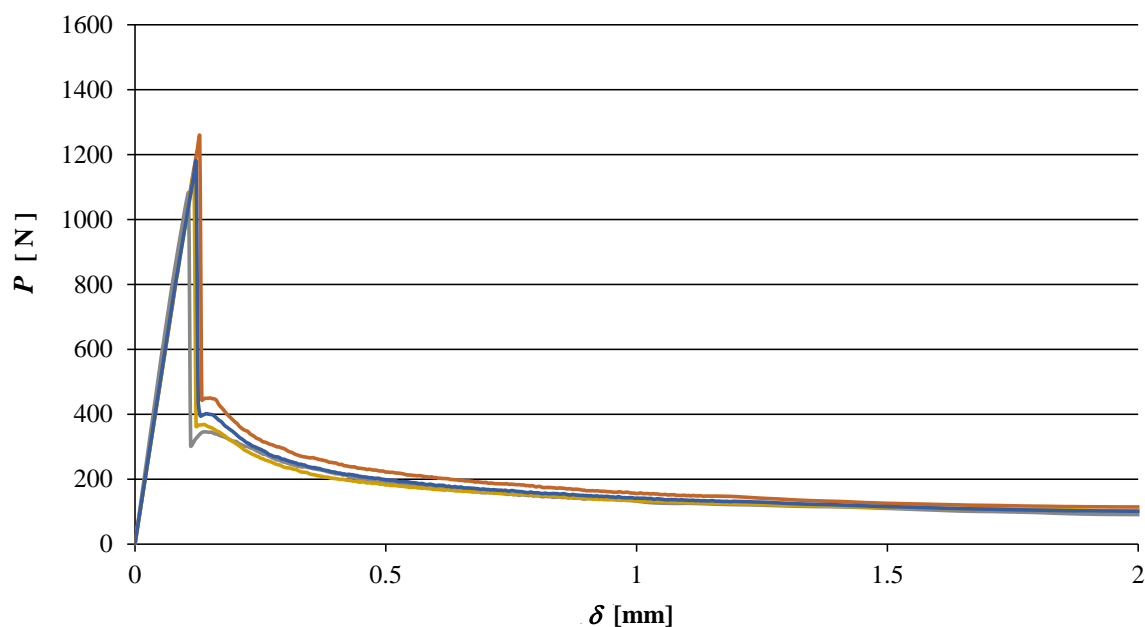


Figura 48 – Curvas  $P-\delta$  experimentais das juntas adesivas coladas com o Araldite® AV138.

Na Figura 49 pode-se observar que a rotura das juntas híbridas com o Araldite® AV138 foi uma sobreposição de rotura coesiva do adesivo com a rotura da junta soldada pelo destacamento do aderente pelo contorno de soldadura.



Figura 49 – Modo de rotura nas juntas híbridas coladas com o Araldite® AV138.

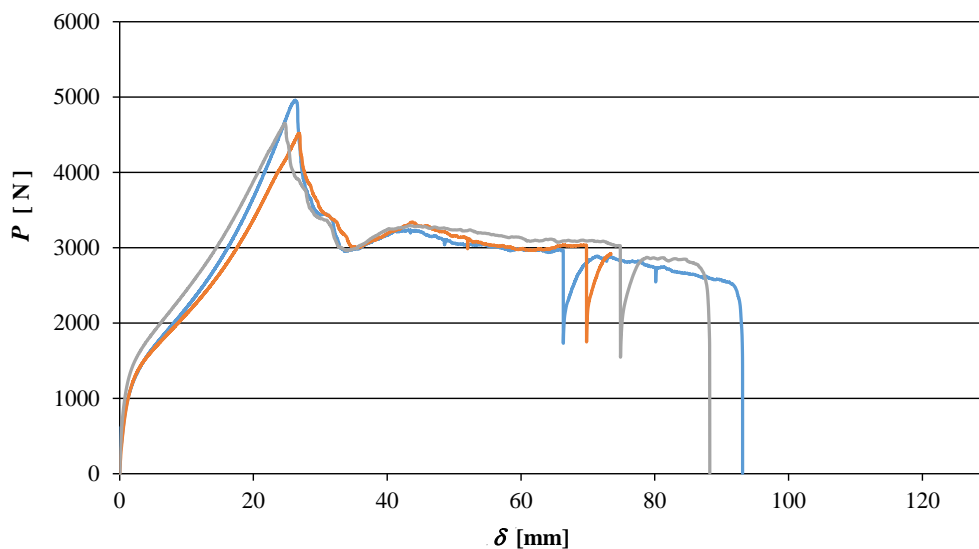


Figura 50 – Curvas  $P-\delta$  experimentais das juntas híbridas com o Araldite® AV138.

Na Figura 50 apresentam-se as curvas  $P-\delta$  obtidas experimentalmente para as juntas híbridas com o adesivo Araldite® AV138. Não foram consideradas as curvas  $P-\delta$  de dois provetes por não apresentarem significado estatístico, devido aos valores substancialmente menores obtidos em relação aos restantes provetes ensaiados. A causa possível dos desvios

encontrados poderá estar relacionada com uma deficiente soldadura da junta ou também devido ao ligeiro desalinhamento dos provetes durante a operação de soldadura. Nas curvas  $P-\delta$  da Figura 50 pode-se observar uma subida inicial da carga a rigidez constante, até um valor de  $P$  aproximadamente de 1000 N. Após o valor final desta zona linear, segue-se o início da deformação do aderente, em que o aumento da carga se dá com menor taxa de variação relativamente à subida inicial. Após o aderente não conseguir mais compensar com a sua deformação a força que lhe é aplicada, atinge-se o valor de  $P_{\max}$  e inicia-se a rotura do aderente pelo contorno do ponto de soldadura, como se pode observar na Figura 51. O valor mais elevado de força máxima obtida nas curvas apresentadas da Figura 50 foi de 4955,5 N, associada a um deslocamento de 26,23 mm, sendo o menor valor de 4516,3 N para um deslocamento de 26,82 mm.



Figura 51 – Início do rompimento do aderente pelo contorno do ponto de soldadura.

Ao atingir o valor de  $P_{\max}$  a força diminui e atinge um mínimo local que, como já referido nas ligações soldadas, corresponde ao início da propagação da rotura do aderente pelo contorno de soldadura. Quando a rotura no aderente atinge aproximadamente metade do seu perímetro, que é o instante em que os dois caminhos de rotura se encontram no seu afastamento máximo (Figura 52), a carga sustentada atinge um máximo local para aproximadamente  $\delta=43,9$  mm.



Figura 52 – Afastamento máximo das zonas de rompimento pelo contorno do ponto de soldadura.

Seguidamente ao máximo local, observa-se um patamar de carga (Figura 50) que corresponde simultaneamente ao avanço da fenda do adesivo e ao avanço da rotura do ponto de soldadura através do arrancamento de material, ao longo do comprimento da junta. Nesta fase, os valores de carga vão diminuindo ligeiramente à medida que a rotura avança. Embora a rotura do adesivo e rompimento do aderente sejam processos que ocorrem simultaneamente, a velocidade de propagação da fenda do adesivo é superior à velocidade de arrancamento de aderente. Esta diferença nas velocidades de propagação origina que o adesivo seja o primeiro a atingir a rotura total, ou seja, a sua fenda atinge a extremidade oposta da camada de adesivo. A esta rotura total do adesivo corresponde a diminuição brusca de carga observada no patamar de carga que se observa na Figura 50, e ocorre na junta de  $P_{\max}$  mais elevado para um  $\delta$  de 74,9 mm. A diminuição brusca da carga resulta da falta de adesivo, provocando um relaxamento da rigidez da junta decorrente da rotura do adesivo. Com a continuação do carregamento, a carga sustentada rapidamente recupera para níveis próximos aos observados antes da rotura do adesivo, embora agora apenas devido à resistência oferecida pelo ponto de soldadura. Quando dá o arrancamento total da porção de material em forma de lágrima, acontece a rotura total da junta, como se pode observar na Figura 53, e a carga diminui até zero (Figura 50).



Figura 53 – Rompimento total do aderente por efeito de arrancamento de material.

### 3.4.3 Juntas coladas e híbridas com o Araldite® 2015

Após a rotura das juntas coladas com o Araldite® 2015, efetuou-se uma análise visual das superfícies de fratura. Observou-se que as juntas também apresentaram um modo de rotura coesivo, como pode ser observado na Figura 54.



Figura 54 – Modo de rotura nas juntas coladas com o Araldite® 2015.

Na Figura 55 apresentam-se as curvas  $P-\delta$  obtidas experimentalmente para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015. Tal como nas juntas coladas com Araldite® AV138, observa-se uma subida linear da carga sustentada até  $P_{\max}$ , que corresponde à fase elástica do adesivo. Após a ocorrência de  $P_{\max}$  dá-se o início da fenda no adesivo, e o valor da carga sustentada

decrece, mas agora com uma transição mais suave que a observada para as juntas coladas com o Araldite® AV138. Este comportamento é explicado pelo facto do Araldite® 2015 ser um adesivo mais dúctil que o Araldite® AV138 e evidencia que, após o início da fenda, a junta T-peel adesiva perde grande parte da sua resistência, quando submetida a esforços de arrancamento. O valor mais elevado de força máxima obtida foi de 1458,4 N, associada a um deslocamento de 0,162 mm, sendo o menor valor de 1099,0 N para um deslocamento de 0,174 mm. Após a diminuição acentuada a seguir a  $P_{max}$  a carga continua a diminuir até aproximadamente  $\delta=1$  mm, estabilizando até a rotura final.

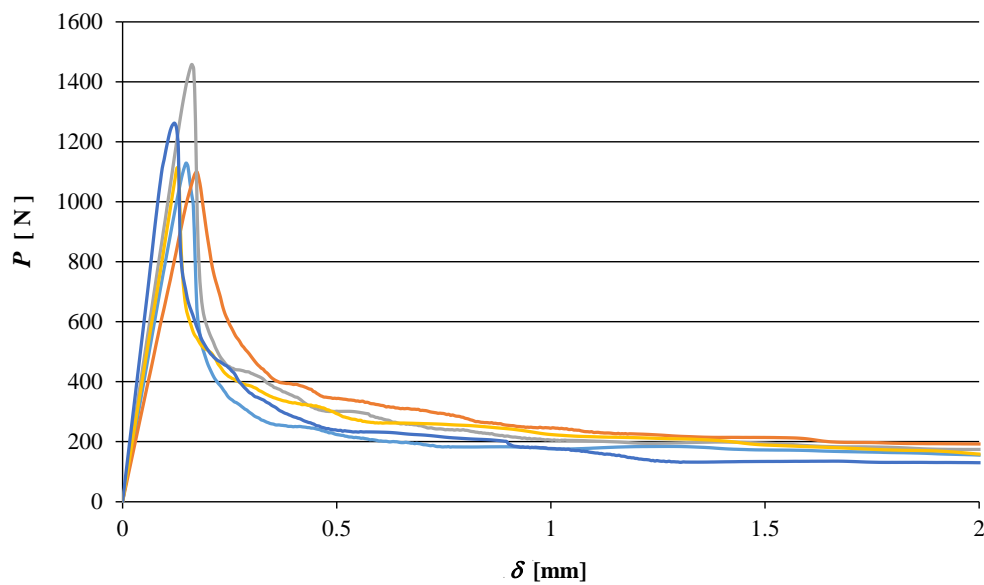


Figura 55 – Curvas  $P$ - $\delta$  experimentais das juntas adesivas com o Araldite® 2015.

Na Figura 56 pode ser observado o aspeto final das juntas híbridas com o Araldite® 2015 após rotura total. Tal como para as juntas híbridas com o Araldite® AV138, pode-se observar na Figura 56 uma rotura mista entre rotura coesiva da camada de adesivo com rotura do contorno de soldadura.



Figura 56 – Modo de rotura nas juntas híbridas com o Araldite® 2015.

Na Figura 57 apresentam-se as curvas  $P-\delta$  obtidas experimentalmente para as juntas híbridas com o adesivo Araldite® 2015. Foram desconsideradas as curvas  $P-\delta$  de dois ensaios, devido aos valores substancialmente menores obtidos em relação aos restantes provetes ensaiados. A causa possível dos desvios, como referido anteriormente, poderá estar relacionada com uma deficiente soldadura da junta ou com um possível desalinhamento dos provetes durante a operação de soldadura. Nas curvas  $P-\delta$  da Figura 57 pode-se observar uma subida inicial da carga a rigidez constante, até aproximadamente um valor de  $P$  de 1300 N. Seguidamente, inicia-se a flexão do aderente, originando uma subida da carga sustentada com menor taxa de crescimento relativamente à subida inicial, até ao seu valor máximo ( $P_{\max}$ ). O valor mais elevado de  $P_{\max}$  obtido nas curvas apresentadas da Figura 57 foi de 5031,65 N, correspondendo a um deslocamento de 27,10 mm, sendo o menor valor de 4609,03 N para um deslocamento de 25,74 mm. Após o início da fenda do adesivo em  $P_{\max}$ , o comportamento das curvas explica-se como já referido anteriormente para as juntas híbridas com o Araldite® AV138. No entanto, como se pode observar na Figura 57, a rotura total do adesivo não acontece antes da rotura total do ponto de soldadura, como observado nas juntas híbridas com o Araldite® AV138, mas quase simultaneamente. Este comportamento explica-se pelo facto do adesivo Araldite® 2015 ser mais dúctil que o Araldite® AV138, podendo assim acomodar maiores deformações, evitando uma rotura prematura do adesivo relativamente ao ponto de soldadura.

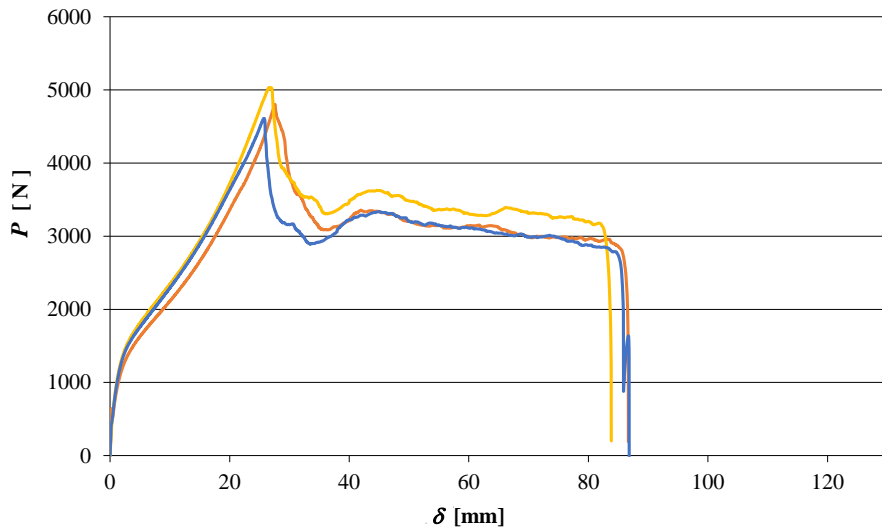


Figura 57 – Curvas  $P$ - $\delta$  experimentais das juntas híbridas com o Araldite® 2015.

### 3.4.4 Juntas coladas e híbridas com o Sikaforce® 7752

Na análise visual das superfícies de fratura após a rotura das juntas coladas com o Sikaforce® 7752, verificou-se que estas juntas também apresentaram um modo de rotura coesivo, como se pode observar na Figura 58.



Figura 58 – Modo de rotura nas juntas coladas com o Sikaforce® 7752.

Na Figura 59 apresentam-se as curvas  $P-\delta$  obtidas experimentalmente para as juntas coladas com adesivo o Sikaforce<sup>®</sup> 7752. Foi retirada da análise a curva  $P-\delta$  de um provete devido ao desvio em relação aos restantes valores obtidos. Na Figura 59 pode ser observado, tal como para as juntas adesivas referidas atrás, um aumento da carga sustentada a rigidez constante até  $P_{\max}$ . O valor mais elevado de  $P_{\max}$  obtido nos ensaios analisados foi de 1364,42 N, associado a um deslocamento de 0,18 mm, sendo o menor valor de 1295,09 N para um deslocamento de 0,19 mm. O comportamento das curvas  $P-\delta$  após o início da fenda em  $P_{\max}$  explica-se como já referido anteriormente para as juntas coladas com o Araldite<sup>®</sup> AV138 e Araldite<sup>®</sup> 2015. No entanto, salienta-se o facto de estas juntas apresentarem uma taxa de decréscimo da carga sustentada inferior às juntas coladas com o Araldite<sup>®</sup> AV138 e Araldite<sup>®</sup> 2015. Pode-se observar ainda que estas juntas também perdem menos resistência após o início da fenda do adesivo. Aproximadamente a partir de  $\delta=1,5$  mm a carga sustentada estabiliza em valores entre 500 e 600 N até à rotura final. Este comportamento reflete a maior ductilidade do adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7752 relativamente aos anteriores.

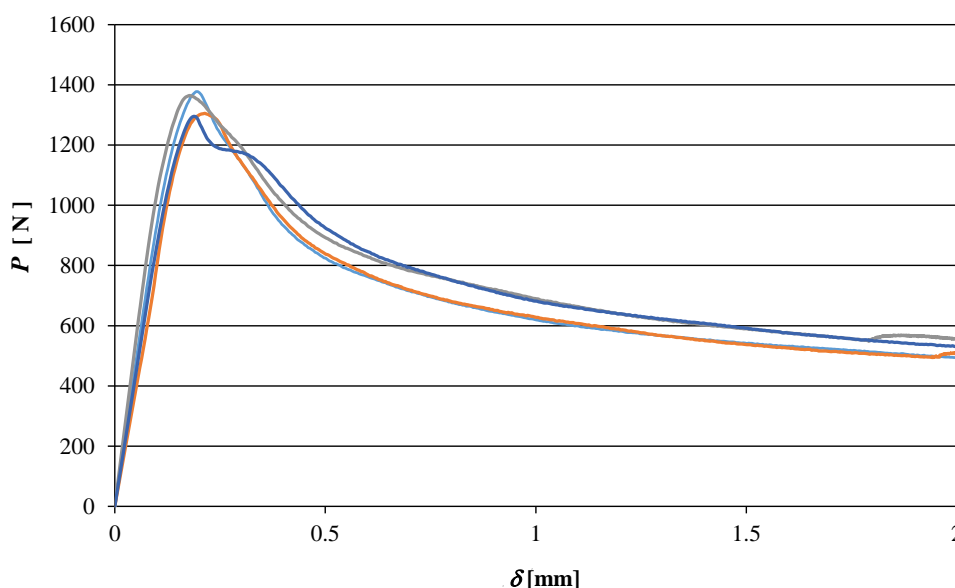


Figura 59 – Curvas  $P-\delta$  experimentais das juntas adesivas com o Sikaforce<sup>®</sup> 7752.

Como se pode observar na Figura 60, as juntas híbridas Sikaforce<sup>®</sup> 7752 apresentam também o mesmo modo de rotura das juntas híbridas com o Araldite<sup>®</sup> AV138 e Araldite<sup>®</sup> 2015.



Figura 60 – Modo de rotura nas juntas híbridas com o Sikaforce<sup>®</sup> 7752.

Apresentam-se na Figura 61 as curvas  $P-\delta$  das juntas híbridas com o Sikaforce<sup>®</sup> 7752. Não foram considerados os valores experimentais de dois ensaios por apresentarem valores significativamente inferiores em relação aos obtidos nos restantes ensaios, possivelmente pelas causas referidas atrás. Na análise das curvas  $P-\delta$  (Figura 61) pode-se observar inicialmente uma subida brusca da carga sustentada até valores entre 1500 e 2000 N. Os valores máximos desta subida inicial correspondem ao início da fenda no adesivo. Seguidamente, a carga recupera para valores da ordem dos 1000 N, voltando novamente a subir e a comportar-se seguidamente de acordo com o já referido atrás para as juntas híbridas com o Araldite<sup>®</sup> AV138 e Araldite<sup>®</sup> 2015. Note-se, no entanto, que o decréscimo vertical que se segue ao patamar de carga se deve ao facto de a rotura total do ponto de soldadura ocorrer muito antes da rotura total do adesivo. Após a rotura do ponto de soldadura, a carga estabiliza em valores da mesma ordem de grandeza aos observados para as respetivas juntas adesivas. Também como já referido atrás, este comportamento está intimamente relacionado com a ductilidade do adesivo, sendo que entre os três adesivos em estudo o Sikaforce<sup>®</sup> 7752 é aquele que apresenta a maior ductilidade, podendo portanto sofrer maiores deformações, originando uma menor velocidade de propagação da fenda. Após este segundo patamar de carga correspondente ao processo de rotura do adesivo, acontece a rotura total da junta pelo adesivo e carga a sustentada decresce até zero.

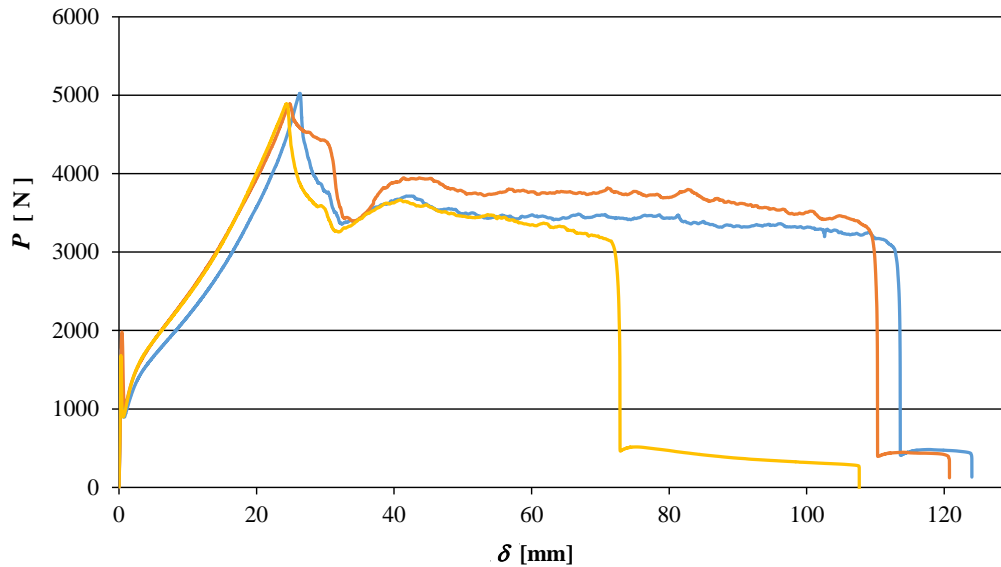


Figura 61 – Curvas  $P$ - $\delta$  experimentais das juntas híbridas com o Sikaforce® 7752.

### 3.4.5 Comparação dos valores de $P_{\max}$

O gráfico da Figura 62 apresenta os valores médios de  $P_{\max}$  das configurações de juntas ensaiadas e o respetivo desvio padrão. Observa-se uma redução de  $P_{\max}$  das juntas adesivas relativamente às soldadas, o que se deve ao facto de ter considerado  $P_{\max}$  nas juntas adesivas como o instante de rotura do adesivo, o que aconteceu de forma prematura relativamente à rotura do ponto de soldadura nas juntas soldadas. De facto, considera-se que após a rotura inicial do adesivo a junta perde grande parte da sua rigidez inicial, o que pode comprometer a sua função estrutural. A redução de  $P_{\max}$  observada nas juntas adesivas relativamente às soldadas foi de 66,1 % para o Araldite® AV138, 64,7 % para o Araldite® 2015 e 61,1 % para o Sikaforce® 7752. Pode-se observar que a aplicação da camada de adesivo em conjunto com um ponto de soldadura produziu um aumento de  $P_{\max}$  em todas as configurações de juntas híbridas consideradas, relativamente às juntas soldadas. Nas juntas híbridas com o Araldite® AV138 verifica-se um aumento percentual em relação às juntas soldadas de 37,2 %, nas juntas híbridas com o Araldite® 2015 de 40,3 % e o valor mais elevado de acréscimo de  $P_{\max}$  relativamente às juntas soldadas verifica-se nas juntas híbridas com o Sikaforce® 7752, sendo de 43,8 %. A conversão de uma junta adesiva numa junta híbrida através da aplicação de um ponto de soldadura produziu um aumento no valor de  $P_{\max}$  de 304,1 % nas juntas com o Araldite® AV138, de 297,0 % com o Araldite® 2015 e de 269,4 % com o Sikaforce® 7752.

Relativamente às propriedades mecânicas intrínsecas 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 quantificador da ductilidade, varia inversamente. Na análise da Figura 62 verifica-se que a resistência das juntas híbridas varia diretamente com o aumento da ductilidade do adesivo, apesar de a sua tensão de rotura à tração diminuir. Assim, nos casos em estudo, conclui-se que a ductilidade do adesivo tem um papel mais importante no incremento da resistência da junta do que a sua resistência. Tal resultado era de esperar devido ao tipo de geometria das juntas T-peel, que provoca a concentração de tensões de arrancamento numa área muito localizada na extremidade do adesivo, o que faz com que adesivos frágeis apresentem resultados menos satisfatórios (Castagnetti et al. 2010). No Capítulo 4, dedicado à análise numérica das juntas T-peel, vai ser realizada uma análise mais detalhada destes aspetos.

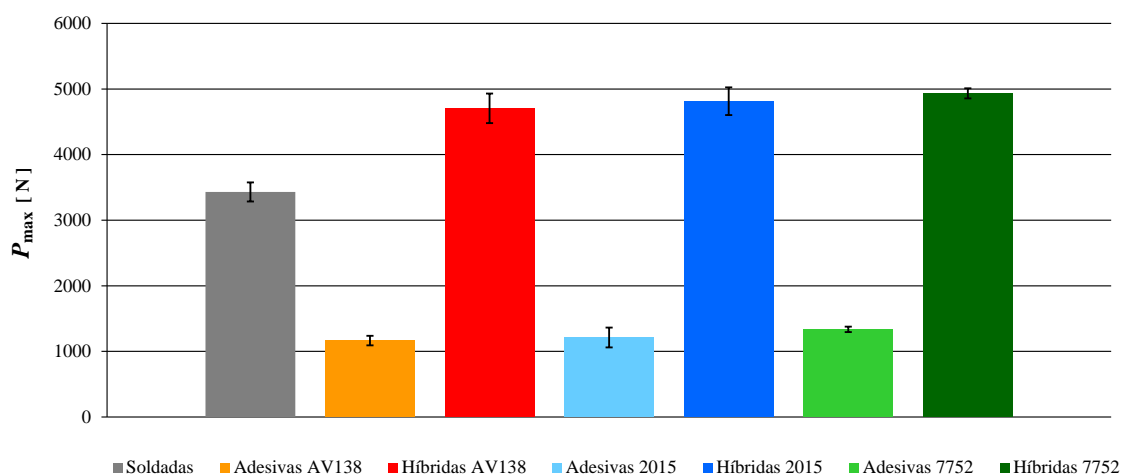


Figura 62 – Valores experimentais médios de  $P_{max}$  e respetivo desvio padrão para todas as configurações de juntas estudadas.



# 4 Trabalho numérico

Neste capítulo é efetuada uma abordagem das condições de análise numérica usadas no *software* ABAQUS® para aplicação dos MDC. É também discutida a determinação das propriedades coesivas dos adesivos considerados, necessárias para a modelação numérica. De seguida, é realizada uma análise de tensões de arrancamento e de corte das juntas para as diferentes configurações estudadas. No final, para cada condição estudada, é feita uma comparação dos valores de  $P_{\max}$  obtidos numericamente com os obtidos experimentalmente, e apresentada uma discussão detalhada dos resultados obtidos em função da análise de tensões realizada e características dos adesivos.

## 4.1 Condições da análise numérica

A análise pelo MEF foi realizada no ABAQUS®, considerando elementos formulados com não linearidades geométricas, com o objetivo de avaliar a capacidade dos MDC para prever o comportamento das juntas em análise. Os modelos tridimensionais (3D) foram construídos utilizando condições longitudinais de simetria, que permitiram modelar metade da largura da junta (Figura 63). Também se consideraram condições de simetria eliminando um dos aderentes e considerando apenas metade do valor de  $t_A$ . Desta forma, apenas se considerou  $\frac{1}{4}$  do modelo total. Relativamente às condições fronteira impostas nos modelos das juntas adesivas e híbridas, o plano de simetria a meio da espessura do adesivo foi encastrado, o plano de simetria a meio da largura do provete foi restringido na direção da largura do provete e a extremidade livre do aderente foi restringida na direção longitudinal da junta e sujeita a um deslocamento de tração, como mostra a Figura 63.

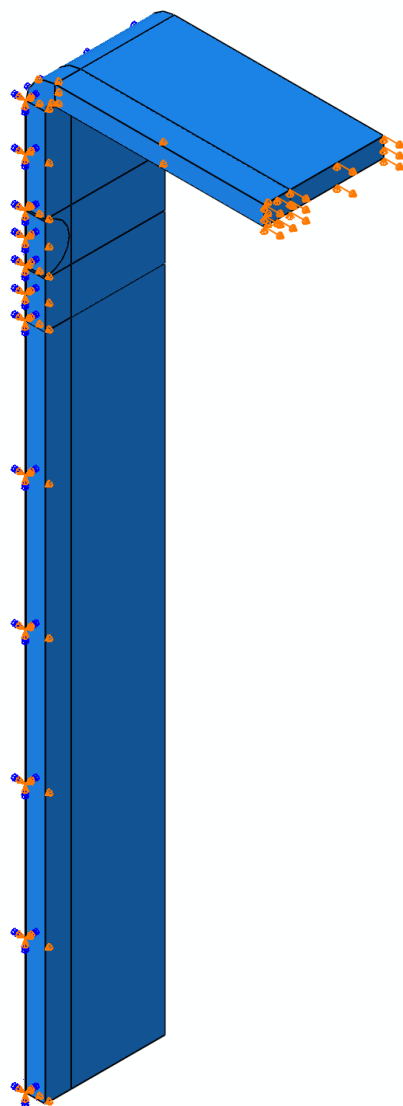


Figura 63 – Condições fronteira impostas nas juntas adesivas e híbridas.

Nas juntas soldadas, de forma a simular o contacto entre os aderentes, foi criado um plano rígido sobre o ponto de soldadura e ao longo de todo o comprimento de junta, como se pode verificar na Figura 64, com restrição ao deslocamento horizontal e vertical. As restantes condições fronteira usadas foram as mesmas das juntas adesivas e híbridas.

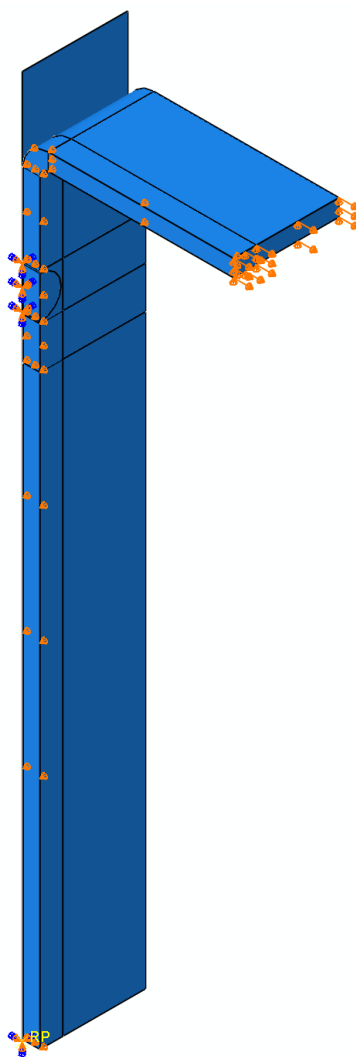


Figura 64 – Condições fronteira impostas nas juntas soldadas.

Para a análise de resistência foram considerados elementos sólidos de 8 nós de integração reduzida para diminuição do esforço computacional (C3D8R do ABAQUS®) para os aderentes e elementos coesivos de 8 nós (COH3D8) de forma a modelar o adesivo e ponto de soldadura. A Figura 65 mostra os refinamentos típicos de malha para as juntas adesivas usados na análise de resistência, evidenciando um maior refinamento na camada de adesivo e no aderente na zona onde se inicia a rotura do adesivo, que corresponde à zona C. Na zona de ligação na direção da espessura, como se pode verificar pelo sentido de *bias* (grau de gradação de refinamento da malha) na Figura 65, a malha do aderente foi também gerada de modo a garantir um maior refinamento na proximidade da camada do adesivo, devido às concentrações de tensões existentes neste local (Ortiz e Pandolfi 1999). Para se obterem os refinamentos atrás descritos, o modelo foi dividido de acordo com a Figura 65.

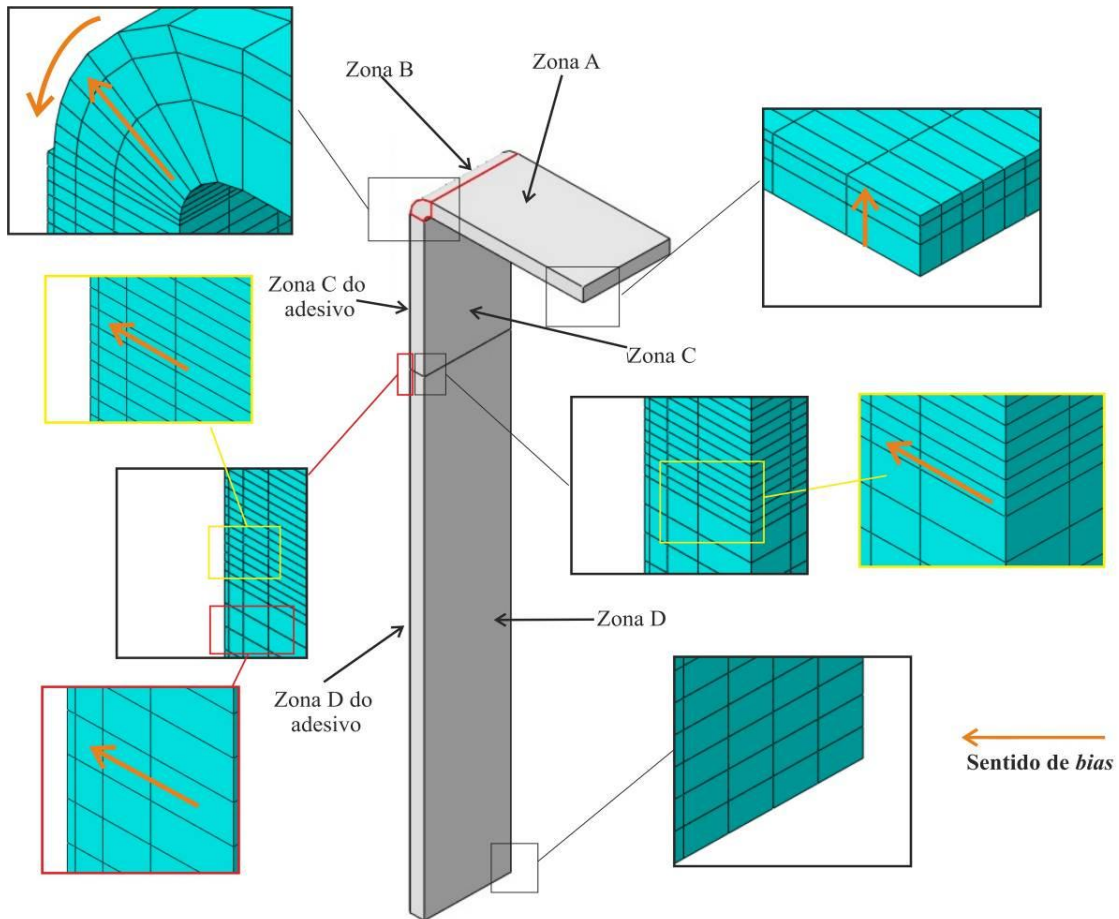


Figura 65 – Detalhes da malha de MEF para a análise de resistência das juntas adesivas.

O número total de elementos usados na malha para previsão da resistência das juntas adesivas foi de 16128. A Tabela 11 sumariza as dimensões de cada zona de malha, distribuição do número de nós assim como o tipo de malha usada nas diversas zonas do modelo.

Tabela 11 – Dimensões das zonas de malha, tipo de malha, refinamento e distribuição dos elementos na análise da resistência das juntas adesivas.

Zona	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Bias no Comprimento	Bias na Largura	Bias na Espessura	Tipo de Malha	Nº de elementos
A	21,9	25	2	----	----	3	Estruturada	384
B	----	25	2	6	----	3	Estruturada	384
Aderente C	20	25	2	----	----	3	Estruturada	4800
Aderente D	70	25	2	----	----	3	Estruturada	6720
Adesivo C	20	25	0,2	----	----	----	Não estruturada	1600
Adesivo D	70	25	0,2	----	----	----	Não estruturada	2240

Para a análise de tensões foram utilizados elementos sólidos de 8 nós para todos os constituintes dos modelos (C3D8 do ABAQUS®). As tensões no adesivo foram avaliadas no plano médio da largura do provete e a meio da camada de adesivo.

A Figura 66 mostra os refinamentos típicos de malha para as juntas adesivas usadas na análise de tensões. Como se pode verificar na Figura 66, os elementos sólidos na espessura da camada de adesivo têm dimensão 5 vezes inferior relativamente à malha usada na previsão da resistência. O refinamento da malha na largura do adesivo e aderente aumenta com um *bias* de 20 da sua extremidade para o centro, onde vão ser retiradas as distribuições de tensões. O refinamento dos elementos no aderente aumentam com um *bias* de 8 ao longo da sua espessura para a proximidade da camada de adesivo, como se pode verificar na Figura 66. A zona C do aderente e adesivo apresenta uma largura de elemento bastante menor do que nas restantes zonas, permitindo assim gerar um maior refinamento nesta zona ao longo do seu comprimento, devido aos expectáveis maiores gradientes de tensão.

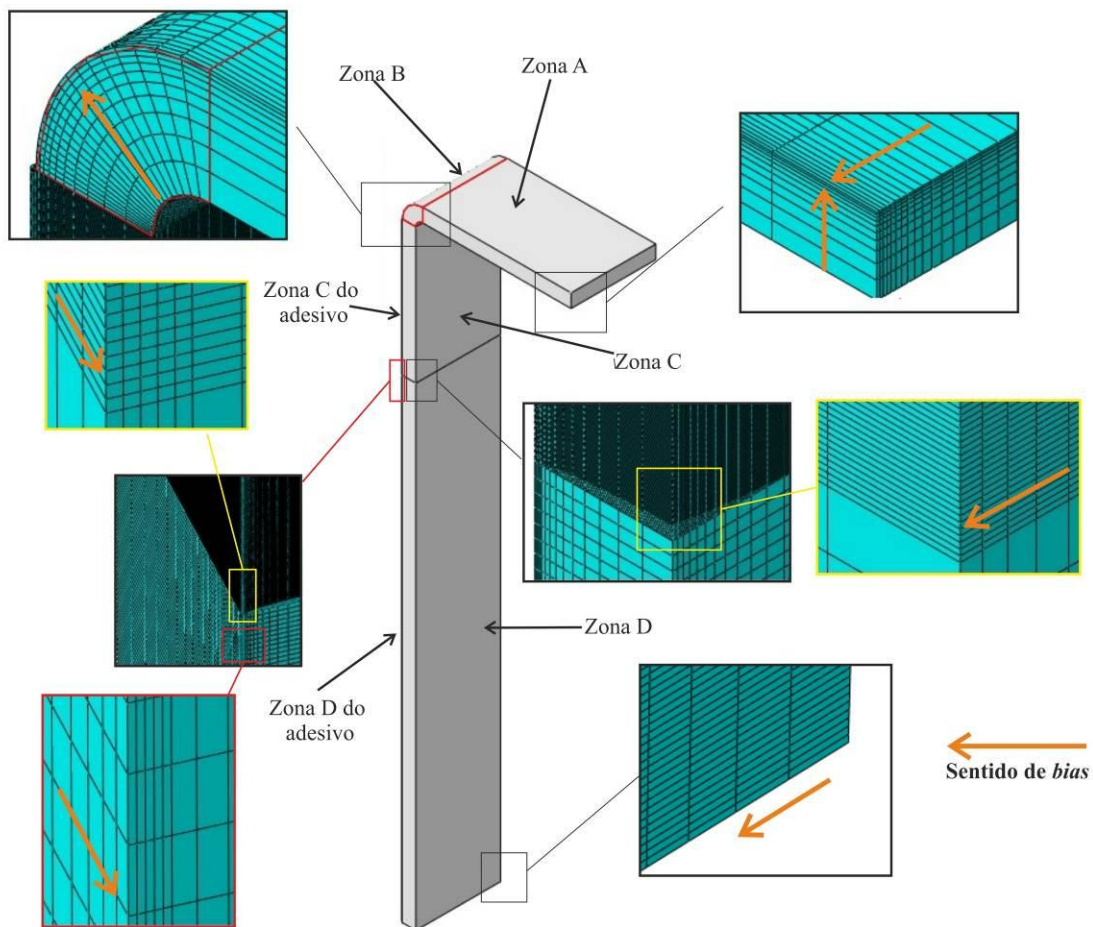


Figura 66 – Detalhes da malha de MEF para análise de tensões das juntas adesivas.

A criação da malha para análise da distribuição de tensões foi gerada de acordo com os parâmetros sumariados na Tabela 12. O número total de elementos usados na malha para previsão da resistência das juntas adesivas foi de 513250.

Tabela 12 – Dimensões das zonas de malha, tipo de malha, refinamento e distribuição dos elementos na análise de tensões das juntas adesivas.

Zona	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Bias no Comprimento	Bias na Largura	Bias na Espessura	Tipo de Malha	Nº de elementos
<b>A</b>	21,9	25	2	-----	20	8	Estruturada	2000
<b>B</b>	-----	25	2	6	20	8	Estruturada	5000
<b>Aderente C</b>	20	25	2	-----	20	8	Estruturada	250000
<b>Aderente D</b>	70	25	2	-----	20	8	Estruturada	87500
<b>Adesivo C</b>	20	25	0,2	-----	20	8	Estruturada	125000
<b>Adesivo D</b>	70	25	0,2	-----	20	8	Estruturada	43750

Na análise de resistência das juntas híbridas foram utilizadas as mesmas condições fronteira das juntas adesivas. A malha de elementos foi gerada de modo a obter um maior refinamento no ponto de soldadura, obrigando a um maior seccionamento do provete de forma a manter a malha estruturada na sua periferia.

O refinamento da malha do restante modelo seguiu os mesmos princípios das juntas adesivas, mas agora com *bias* de 3 no aderente na direção da espessura. Os elementos finitos do ponto de soldadura foram modelados com elementos coesivos de 8 nós (COH3D8). A Figura 67 apresenta os detalhes da malha das juntas híbridas.

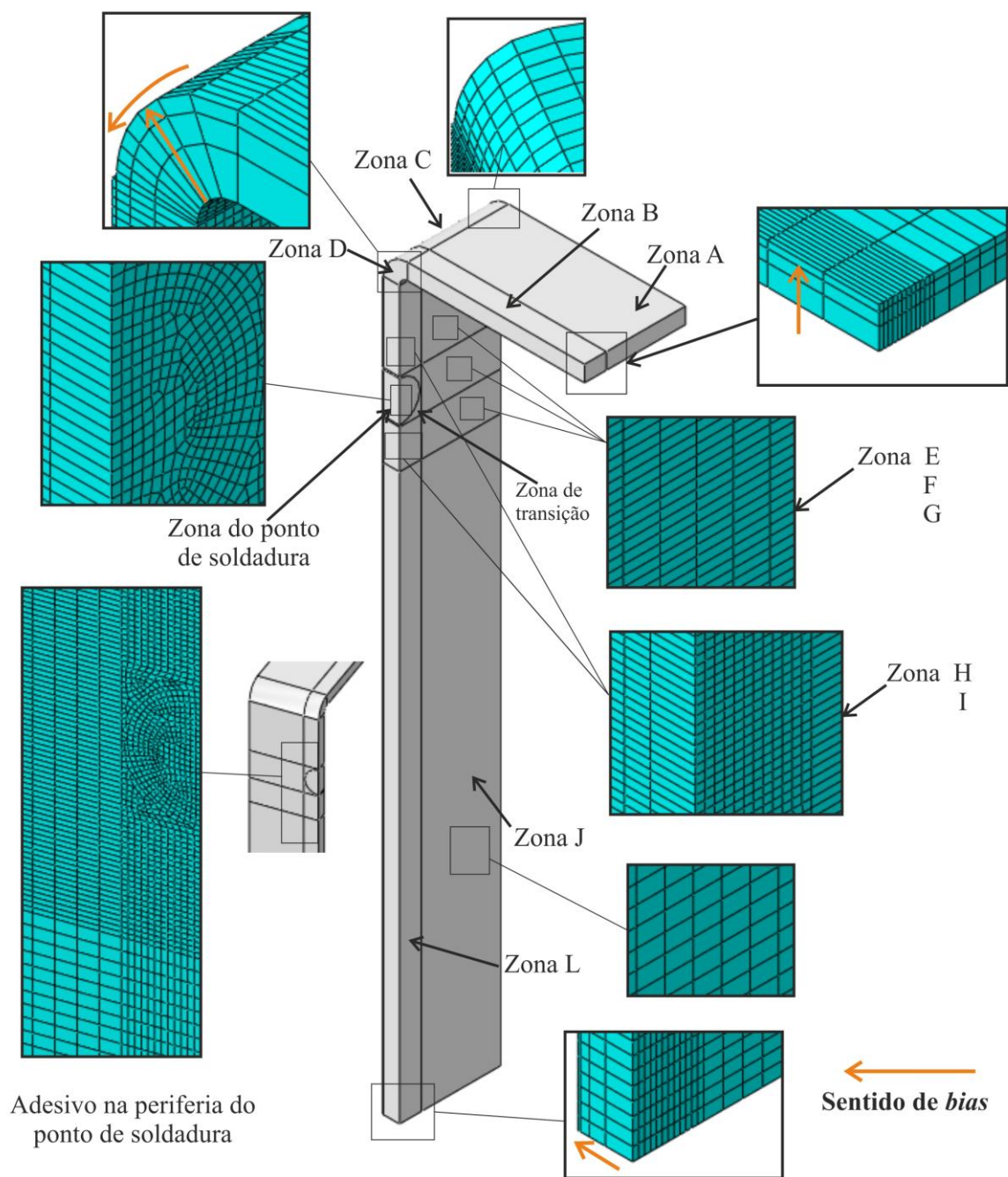


Figura 67 – Detalhes da malha de MEF para as análises de resistência das juntas híbridas.

O número total de elementos usados na malha para previsão da resistência das juntas adesivas foi de 31350. A Tabela 13 resume as dimensões de cada zona de malha, distribuição do número de nós assim como o tipo de malha usado nas diversas zonas do modelo.

Tabela 13 – Dimensões das zonas de malha, tipo de malha, refinamento e distribuição dos elementos na análise da resistência das juntas híbridas.

Zona	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Bias no Comprimento	Bias na Largura	Bias na Espessura	Tipo de Malha	Nº de elementos
A	21,9	9,8	2	-----	-----	3	Estruturada	312
B	21,9	2,7	2	-----	-----	3	Estruturada	288
C	-----	9,8	2,7	6	-----	3	Estruturada	312
D	-----	2,7	2	6	-----	3	Estruturada	288
Aderente E+F+G	20	9,8	2	-----	-----	3	Estruturada	3900
Aderente H	20	2,7	2	-----	-----	3	Estruturada	1764
Aderente I	4,8	2,7	2	-----	-----	3	Estruturada	864
Aderente J	70	9,8	2	-----	-----	3	Estruturada	5460
Aderente L	70	2,7	2	-----	-----	3	Estruturada	5040
Ponto de soldadura	-----	-----	2	-----	-----	3	Não estruturada	1689
Aderente Transição	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Não estruturada	1450
Adesivo E+F+G	20	9,8	0,2	-----	-----	-----	Estruturada	5044
Adesivo H	20	2,7	0,2	-----	-----	-----	Estruturada	588
Adesivo I	4,8	2,7	0,2	-----	-----	-----	Estruturada	288
Adesivo J	70	9,8	0,2	-----	-----	-----	Estruturada	1820
Adesivo L	70	2,7	0,2	-----	-----	-----	Estruturada	1680
Adesivo Transição	5,4	2,7	0,2	-----	-----	-----	Não estruturada	563

A Figura 68 mostra os refinamentos típicos de malha para as juntas adesivas usados na análise de tensões.

A Tabela 14 apresenta um resumo dos parâmetros usados na criação da malha para análise da distribuição de tensões nas juntas híbridas. O número total de elementos usados na malha das juntas híbridas foi de 1003950.

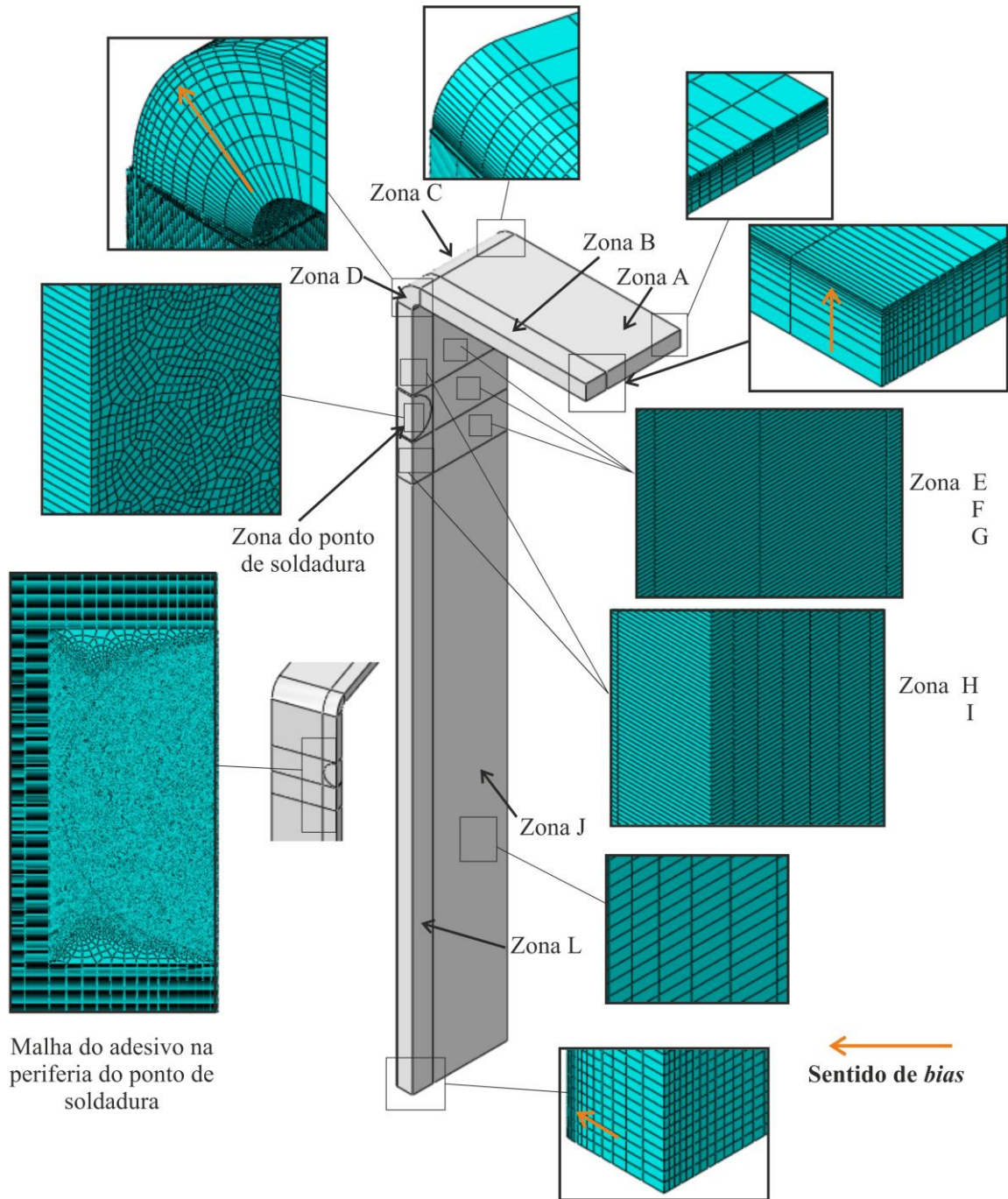


Figura 68 – Detalhes da malha de MEF para as análises de tensões das juntas híbridas.

Tabela 14 – Dimensões das zonas de malha, tipo de malha, refinamento e distribuição dos elementos na análise de tensões das juntas híbridas.

Zona	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Bias no Comprimento	Bias na Largura	Bias na Espessura	Tipo de Malha	Nº de elementos
A	21,9	9,8	2	----	5	8	Estruturada	800
B	21,9	2,7	2	----	2,5	8	Estruturada	1200
C	----	9,8	2,7	6	5	8	Estruturada	1600
D	----	2,7	2	6	2,5	8	Estruturada	3000
Aderente E+F+G	20	9,8	2	----	5	8	Estruturada	100000
Aderente H	20	2,7	2	----	2,5	8	Estruturada	150000
Aderente I	4,8	2,7	2	----	2,5	8	Estruturada	36000
Aderente J	70	9,8	2	----	5	8	Estruturada	35000
Aderente L	70	2,7	2	----	2,5	8	Estruturada	52500
Ponto de soldadura	----	----	----	----	----	----	Não estruturada	483000
Aderente Transição	----	----	2	----	----	----	Não estruturada	12650
Adesivo E+F+G	20	9,8	0,2	----	5	----	Estruturada	50000
Adesivo H	20	2,7	0,2	----	2,5	----	Estruturada	10125
Adesivo I	4,8	2,7	0,2	----	2,5	----	Estruturada	18000
Adesivo J	70	9,8	0,2	----	5	----	Estruturada	17500
Adesivo L	70	2,7	0,2	----	2,5	----	Estruturada	26250
Adesivo Transição	5,4	2,7	0,2	----	----	----	Não estruturada	6325

A malha para análise de resistência das juntas soldadas foi criada com 19952 elementos. Os refinamentos e dimensões dos elementos aplicados foram os mesmos usados na respetiva análise das juntas híbridas. Na análise de tensões das juntas soldadas a malha foi criada com 830838 elementos, sendo os seus refinamentos e dimensões dos elementos iguais aos aplicados na malha das ligações híbridas.

## 4.2 Modelo de dano coesivo

Como falado anteriormente, os MDC baseiam-se numa relação entre tensões e deslocamentos que ligam nós homólogos dos elementos coesivos. Pelos MDC, é possível simular o comportamento elástico do material até à resistência máxima e subsequentemente degradação das propriedades dos materiais até à rotura, ou seja, o seu comportamento plástico.

### 4.2.1 Modelo de dano triangular

A lei de dano triangular, ver Figura 69, assume inicialmente um comportamento linear elástico, seguido de degradação linear. O comportamento elástico é definido por uma matriz constitutiva ( $\mathbf{K}$ ) que contém os parâmetros de rigidez, e relaciona as tensões e deformações em tração e corte ao longo dos elementos coesivos (subscritos n e s, respetivamente)

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{\text{COH}} \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (1)$$

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição é dependente da formulação utilizada. Caso seja uma formulação local, esta é usada para simular fraturas de espessura nula, em que os parâmetros da matriz possuem valores extremamente elevados, com a finalidade de não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos (da Silva e Campilho 2012b).

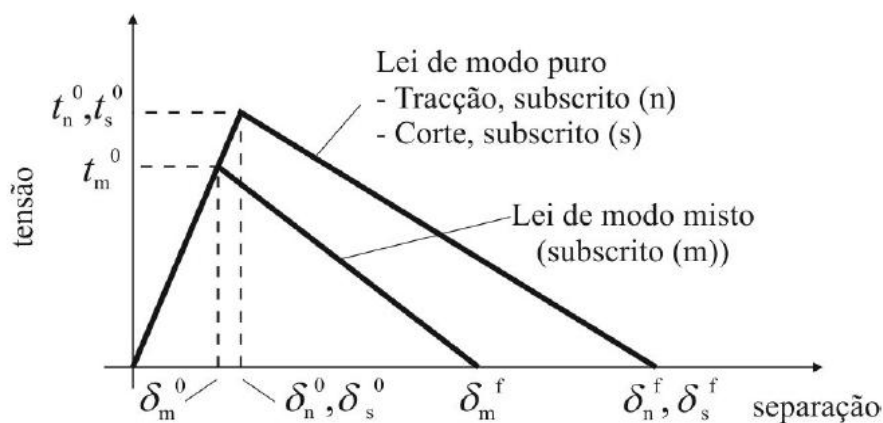


Figura 69 – Lei coesiva triangular em modo puro e modo misto (Khoramishad et al. 2010).

Para camadas finas de adesivo, uma aproximação viável aos parâmetros de rigidez é dada por

$$k_{nn} = E, \quad k_{ss} = G, \quad k_{ns} = 0, \quad (2)$$

onde  $E$  corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e  $G$  ao módulo de elasticidade transversal. Considerando esses parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação de uma camada fina de adesivo (Campilho et al. 2011a). Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios. Neste trabalho foi considerado o critério

quadrático de tensões que se segue para a iniciação do dano, por já ter sido provada a sua fiabilidade (de Moura et al. 2008). A iniciação do dano refere-se à iniciação da degradação da rigidez do material. O dano inicia-se quando as tensões instaladas satisfazem o critério atrás referido, que é dado pela seguinte expressão (Abaqus 2014)

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1. \quad (3)$$

$\langle \rangle$  são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. A evolução do dano descreve a taxa de degradação da rigidez do material após a iniciação do dano (Abaqus 2014). Depois de atingida a resistência máxima em modo misto ( $t_m^0$  na Figura 69), através da equação anterior, a rigidez do material é degradada. A separação completa de um par de nós homólogos ( $\delta_m^f$  na Figura 69) é prevista por um critério linear energético, definido pela equação (4), em função dos valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$ , onde  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  são as taxas críticas de libertação de energia de deformação para os modos I e II, respetivamente (Abaqus 2014)

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (4)$$

Diferentes técnicas estão atualmente disponíveis para a determinação dos parâmetros coesivos ( $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$ ), tais como a técnica de identificação de propriedades, método direto e o método inverso. Estes métodos geralmente usam ensaios de caracterização à fratura como o *Double-Cantilever Beam* (DCB), *End-Notched Flexure* (ENF) ou provetes de sobreposição simples (Campilho et al. 2013). Sob uma perspetiva fundamental, é importante ter uma descrição precisa da lei coesiva. No entanto, esta forma exata poderá nem sempre ser prática ou necessária para modelações numéricas. Assim, na prática por vezes assume-se uma forma parametrizada da lei coesiva (Gustafson e Waas 2009).

#### 4.2.2 Determinação das propriedades coesivas

De modo a caracterizar as leis coesivas em tração e corte, é necessário conhecer  $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  (Figura 69). No passado foram publicados alguns estudos que por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios em adesivo maciço (Campilho et al. 2005, Pocius 2002). No entanto, a restrição às deformações na camada do

adesivo provocada pelos aderentes neste tipo de geometrias, e propagação de fenda tipicamente em modo misto, levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina (Andersson e Stigh 2004, Högberg e Stigh 2006, Leffler et al. 2007). Assim sendo, é necessária a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados. Para o adesivo Araldite® 2015, as leis coesivas da camada de adesivo foram determinadas em trabalhos anteriores (de Moura et al. 2008, 2009a) por um método inverso para a determinação de  $t_n^0$  e  $t_s^0$ . Nestes trabalhos é apresentada uma descrição mais detalhada desta metodologia, que basicamente consiste na determinação de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  através de ensaios *Double-cantilever beam* (DCB) e *End-notched flexure* (ENF), respectivamente, usando um método ou teoria apropriados para a sua obtenção. O valor de  $G_{IC}$  ou  $G_{IIC}$  é então utilizado para construção de uma lei coesiva no modo puro correspondente, que inicialmente tem um valor aproximado de  $t_n^0$  ou  $t_s^0$ , estimado em função das características do adesivo. A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tração ou ENF para corte) com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de  $t_n^0$  ou  $t_s^0$  é então definido utilizando um procedimento de ajuste entre as curvas  $P-\delta$  numéricas e experimentais do teste respetivo de caracterização à fratura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo. A Tabela 15 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada do adesivo Araldite® 2015 numa lei coesiva em modo misto. Os valores de  $E$  e  $G$  foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST – *Thick adherend shear test*), respetivamente (Campilho et al. 2008).

Tabela 15 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo de Araldite® 2015 com uma espessura de 0,2 mm.

$E$ [MPa]	1850	$G$ [MPa]	650
$t_n^0$ [MPa]	23,0	$t_s^0$ [MPa]	22,8
$G_{IC}$ [N/mm]	0,43	$G_{IIC}$ [N/mm]	4,7

Tal como no caso anterior, para a determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138 foi utilizado um método inverso, descrito em detalhe no trabalho de Campilho et al. (2011b). No entanto, devido à não existência de ensaios de caracterização à fratura, o procedimento seguido foi ligeiramente diferente. Foram utilizados os valores de resistência

à tração e corte através de ensaios em adesivo maciço e ensaio de corte TAST para a definição de  $t_n^0$  e  $t_s^0$ , respetivamente. Estes valores foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas, utilizando inicialmente valores típicos de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  para adesivos frágeis. As leis obtidas para tração e corte foram utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a junta de sobreposição simples com comprimento de sobreposição de 20 mm), e as leis do adesivo foram estimadas de forma idêntica ao caso anterior por ajuste das curvas  $P-\delta$  numéricas e experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas com resultados bastante satisfatórios. Os valores de  $E$  e  $G$  foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST), respetivamente. Noutro trabalho (Campilho et al. 2011a) concluiu-se que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades dos adesivos. A Tabela 16 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada do adesivo Araldite® AV138 numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 16 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com uma espessura de 0,2 mm.

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

O processo de obtenção de propriedades coesivas para o adesivo Sikaforce® 7752 seguiu um processo algo idêntico ao utilizado para o Araldite® 2015. De facto, para a determinação da lei coesiva ao corte, foi seguido um método inverso idêntico, correspondente à determinação do valor de  $G_{IIC}$  por ensaio de fratura ENF, seguido de ajuste iterativo manual para a estimativa de  $t_s^0$  (Azevedo 2014). Os valores utilizados neste trabalho são os valores médios de  $t_s^0$  e  $G_{IIC}$  obtidos no trabalho de Azevedo (2014), cujo desvio entre provetes foi bastante reduzido, traduzindo a repetibilidade dos ensaios efetuados. Por outro lado, para a lei coesiva em tração, devido à inexistência, até à data, de procedimento inverso, foi seguido um processo distinto. O valor de  $G_{IC}$  foi obtido por ensaios de fratura DCB (Faneco 2014), nomeadamente o valor médio de uma série de ensaios. O valor de  $t_n^0$  foi aproximado ao valor médio de resistência à tração de provetes maciços ensaiados no mesmo trabalho (Faneco 2014). Como foi definido em trabalhos anteriores que, no caso particular de solicitação à tração, o valor de  $t_n^0$  não tem influência digna de registo para variações de  $t_n^0$  até 25 % do

valor obtido por método inverso (variação para os 2 sentidos) (Faneco 2014), não foi considerada relevante neste trabalho a realização do dito procedimento. Os valores de  $E$  e  $G$  foram obtidos experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST), respetivamente (Faneco 2014). A Tabela 17 mostra os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada do adesivo Sikaforce® 7752 numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 17 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7752 com uma espessura de 0,2 mm.

$E$ [MPa]	493,81	$G$ [MPa]	37,49
$t_n^0$ [MPa]	12,25	$t_s^0$ [MPa]	10,50
$G_{IC}$ [N/mm]	2,36	$G_{IIC}$ [N/mm]	5,56

### 4.3 Análise de tensões

A análise de tensões das juntas adesivas e híbridas baseia-se no estudo das tensões de arrancamento ( $\sigma_y$ ) e de corte ( $\tau_{xy}$ ) ao longo da camada de adesivo durante a fase elástica do carregamento, e é realizada no plano médio da espessura do adesivo e no plano médio da largura do adesivo. Estes planos consideram-se como os mais representativos do estado de tensão no adesivo embora ocorram zonas de concentração de tensões na interface entre os aderentes e o adesivo (Fernandes et al. 2015). 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  $\sigma_{y\text{ avg}}$ .

#### 4.3.1 Juntas coladas

Na Figura 70 e Figura 71 apresentam-se, para as 3 configurações de juntas adesivas, as distribuições de tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$ , respetivamente, em função do comprimento de sobreposição de junta  $L$ . Na análise da Figura 70 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 coladas 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 70. 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. 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.

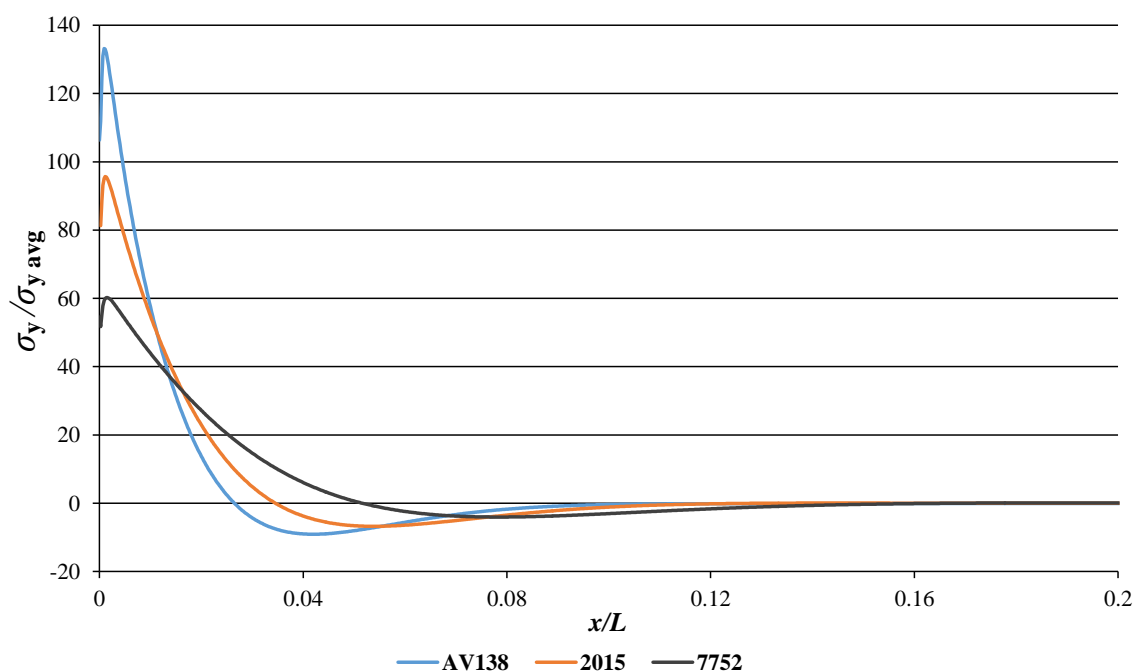


Figura 70 – Distribuição de tensões  $\sigma_y$  a meio da espessura do adesivo em função de  $x/L$  para as juntas adesivas.

As distribuições de tensões  $\tau_{xy}$  das juntas adesivas são apresentadas na Figura 71. 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 coladas 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.

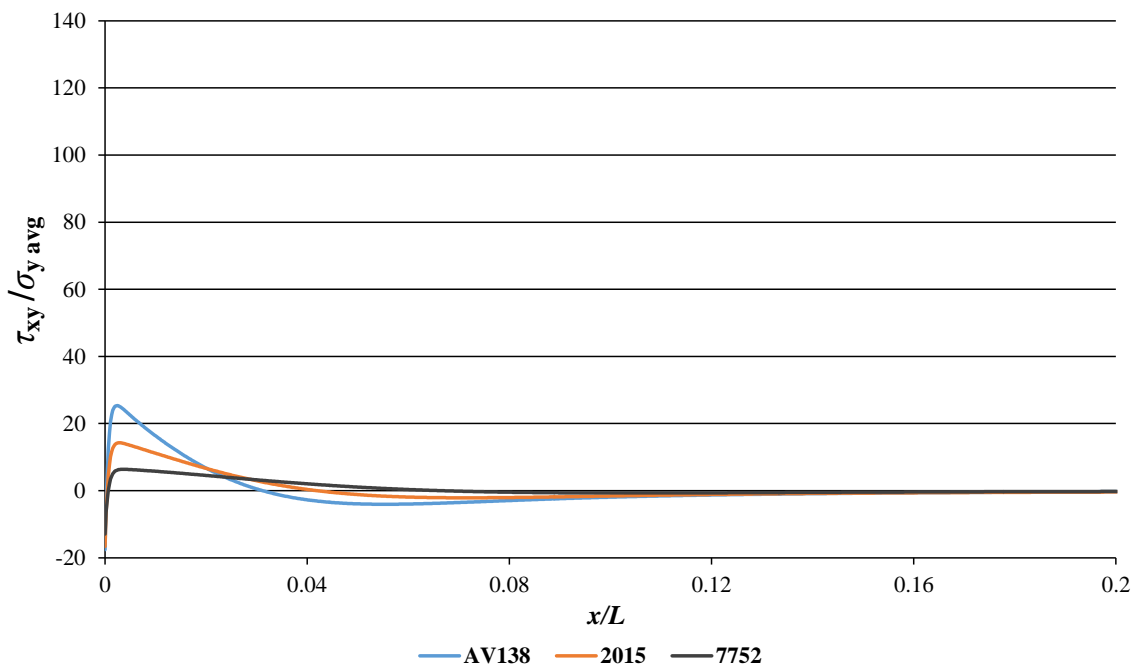


Figura 71 – Distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  a meio da espessura do adesivo em função de  $x/L$  para as juntas adesivas.

### 4.3.2 Juntas híbridas

A Figura 72 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 72 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.

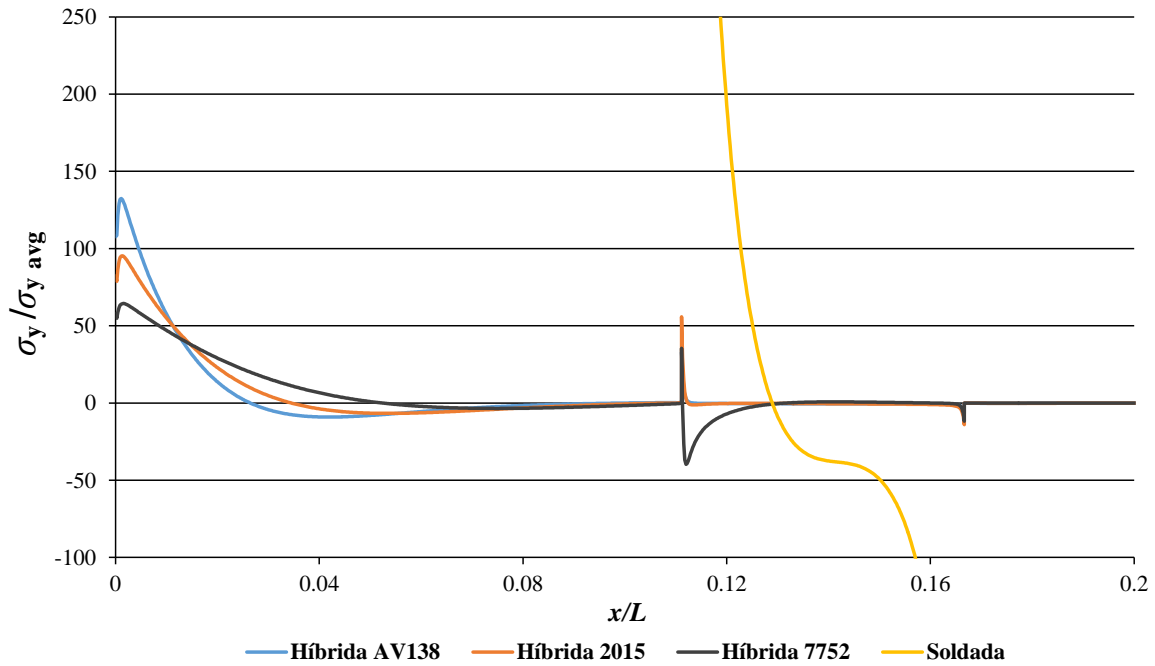


Figura 72 – Distribuição de tensões  $\sigma_y$  a meio da espessura do adesivo em função de  $x/L$  para as juntas híbridas e soldadas.

A Figura 73 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 73 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.

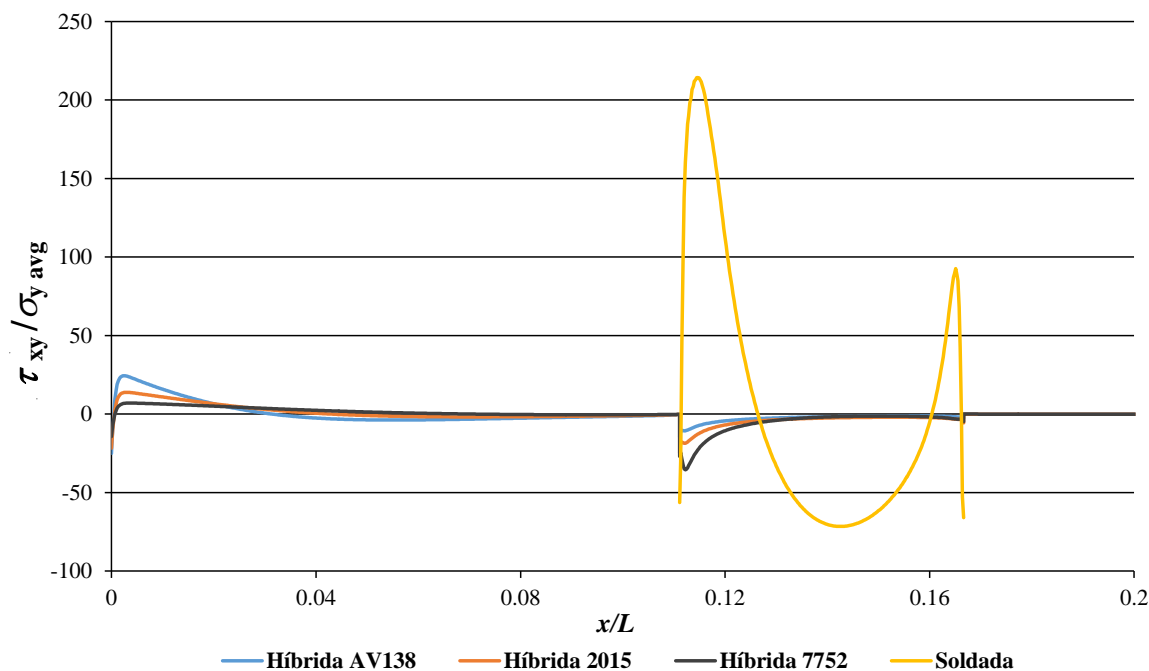


Figura 73 – Distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  a meio da espessura do adesivo em função de  $x/L$  para as juntas híbridas e soldadas.

## 4.4 Resultados das juntas

Neste capítulo são apresentados os resultados da modelação numérica por MDC para a previsão da resistência das juntas adesivas, soldadas e híbridas. No caso da validação desta técnica numérica para o efeito proposto, obtém-se uma ferramenta numérica para um dimensionamento destas ligações de forma mais rápida, eficiente e económica. Refere-se, no entanto, que os resultados quantitativos e as vantagens relativas entre as diversas técnicas de ligação devem ser considerados válidos apenas para as condições geométricas e materiais específicos deste trabalho.

### 4.4.1 Juntas soldadas

Na Figura 74 apresentam-se as curvas  $P-\delta$  numéricas e experimentais para as juntas soldadas. Pode-se observar uma subida inicial até valores da ordem dos 1000 N com uma rigidez muito semelhante à observada nas curvas experimentais. Seguidamente a curva sobe até  $P_{\max}$ , apresentando também uma rigidez muito próxima da rigidez experimental. O valor de  $P_{\max}$  obtido numericamente foi de 3523,9 N, o que representa uma diferença de 2,73 % relativamente ao valor experimental médio. Após  $P_{\max}$  inicia-se a descida da carga devido

ao início da rotura do ponto de soldadura. Não foi possível obter numericamente o restante comportamento da curva devido a problemas de convergência derivados da variação abrupta da rigidez após ser atingido  $P_{\max}$ . Contudo, como se pode observar na Figura 74, os resultados que se conseguiu obter através da simulação numérica reproduzem de forma bastante aproximada os resultados experimentais.

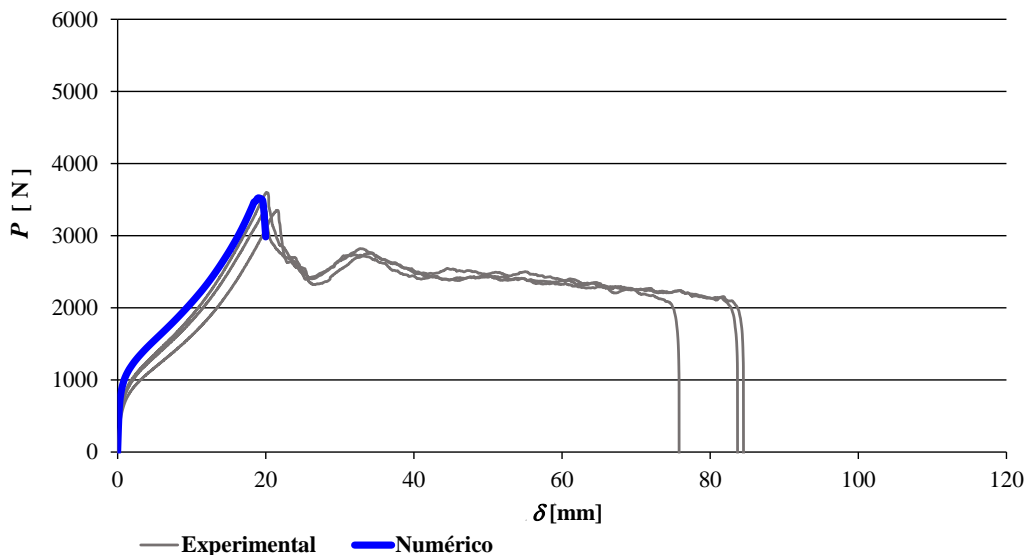


Figura 74 – Comparação da curva obtida numericamente com as curvas experimentais para juntas soldadas.

#### 4.4.2 Juntas coladas com Araldite® AV138

Na Figura 75 apresentam-se as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas numérica e experimentalmente para as juntas adesivas com o adesivo Araldite® AV138. A curva numérica apresenta inicialmente uma zona de subida linear até ao início da rotura do adesivo. Após a rotura inicial dá-se uma queda abrupta da carga transmitida pelo adesivo até estabilizar em valores na ordem dos 180 N até à rotura total da junta. Na aproximação numérica o valor obtido de  $P_{\max}$  foi de 1181,6 N para um deslocamento de 0,027 mm, o que corresponde a uma subida abrupta da curva numérica, indicando uma elevada rigidez do adesivo. A diferença percentual do valor numérico de  $P_{\max}$  relativamente ao valor experimental médio de  $P_{\max}$  foi de 1,46 %. Como se pode verificar na Figura 75, as curvas experimentais apresentam uma boa repetibilidade em todas as fases do processo de fratura. No entanto, ao contrário da curva numérica, estas apresentam menor rigidez até ao início da fenda do adesivo. A origem deste comportamento é explicada pela flexibilidade intrínseca da máquina de ensaios de tração, que faz prever por

excesso os descolamentos das juntas. Contudo, após o início da fenda, as curvas experimentais apresentam um comportamento mais frágil, como se pode verificar na descida quase vertical das suas curvas até à estabilização da carga sustentada para valores da ordem dos 160 N.

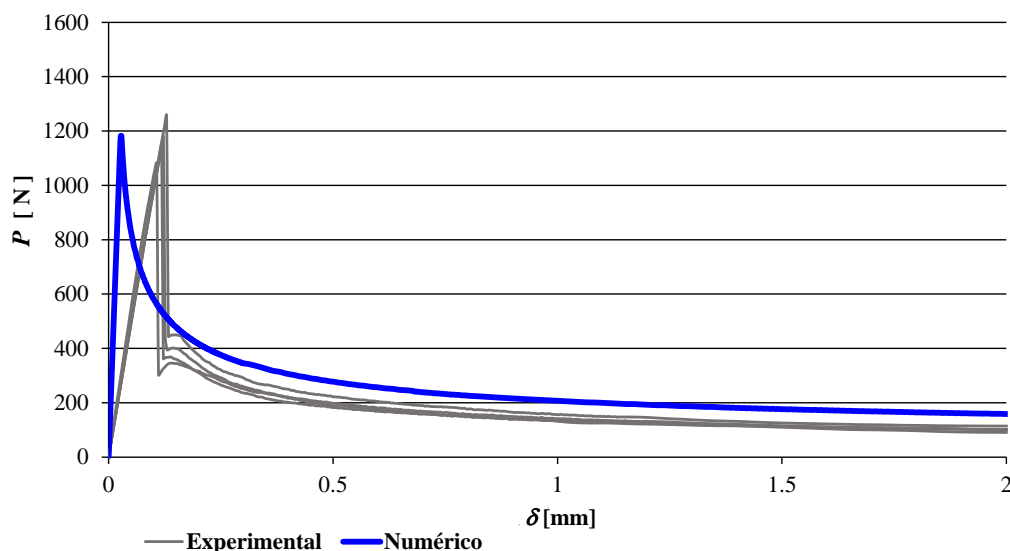


Figura 75 – Comparação da curva obtida numericamente com as curvas experimentais para juntas adesivas com o Araldite® AV138.

Na Figura 76 apresentam-se as curvas  $P-\delta$  numéricas e experimentais para as juntas híbridas com o Araldite® AV138. Pode-se observar uma subida inicial até valores da ordem dos 1200 N com uma rigidez elevada, tal como acontece nas curvas experimentais. A esta subida abrupta corresponde a degradação do adesivo até início da fenda. Após o início da fenda a carga tem uma ligeira descida e volta a subir até  $P_{\max}$  com uma rigidez muito semelhante à experimental. O valor de  $P_{\max}$  obtido numericamente foi de 5126,6 N, correspondendo a uma diferença de 8,92 % relativamente ao valor experimental médio. Após  $P_{\max}$  inicia-se a descida da carga devido ao início da rotura do ponto de soldadura. Pode-se observar que a curva numérica foi truncada imediatamente a seguir a  $P_{\max}$  devido à falta de convergência numérica. Contudo, como se pode observar na Figura 76, os resultados que se conseguiu obter através da simulação numérica reproduzem de forma bastante aproximada os resultados experimentais.

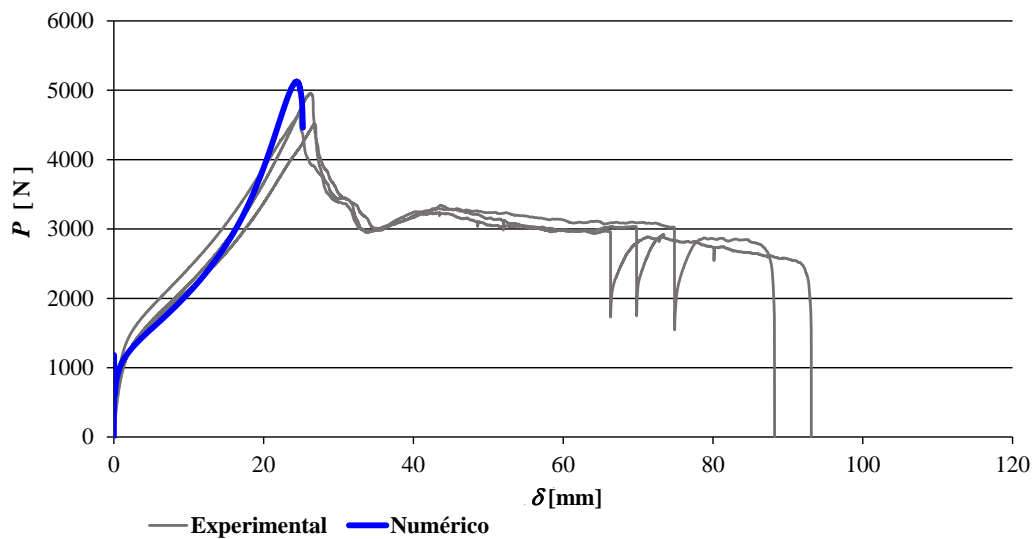


Figura 76 – Comparação da curva obtida numericamente com as curvas experimentais para juntas híbridas com o Araldite® AV138.

#### 4.4.3 Juntas coladas com Araldite® 2015

A curva  $P$ - $\delta$  obtida numericamente para as juntas coladas com adesivo Araldite® 2015, que pode ser observada na Figura 77, mostra uma boa aproximação aos resultados experimentais, muito embora apresente uma rigidez superior aos valores experimentais na fase inicial, ou seja, desde o início da aplicação da carga até à rotura do adesivo. Esta diferença de rigidez, como já referido atrás, deve-se à própria flexibilidade da máquina de ensaios. Numericamente, a rotura inicial do adesivo, ou seja, o início da fenda acontece quando se atinge uma carga aplicada 1324,8 N ( $P_{\max}$ ) para um deslocamento 0,510 mm. A curva numérica apresentou um desvio de 9,26 % no valor de  $P_{\max}$  relativamente ao valor médio experimental de  $P_{\max}$ . Seguidamente, a carga aplicada desce e estabiliza em valores da ordem dos 250 N, apresentando uma ligeira diferença em relação aos valores experimentais. Esta diferença também se pode explicar tendo em conta a flexibilidade da máquina de ensaios.

Na Figura 78 apresentam-se as curvas  $P$ - $\delta$  numéricas e experimentais para as juntas híbridas com o Araldite® 2015. O valor de  $P_{\max}$  obtido numericamente foi de 5210,3 N, o que representa um desvio de 8,25 % relativamente ao valor médio experimental. Mais uma vez se observa que não houve convergência numérica devido à variação abrupta da rigidez após ser atingido  $P_{\max}$ . Pode-se observar ainda uma boa aproximação nos valores que foram possíveis de obter numericamente, relativamente aos experimentais.

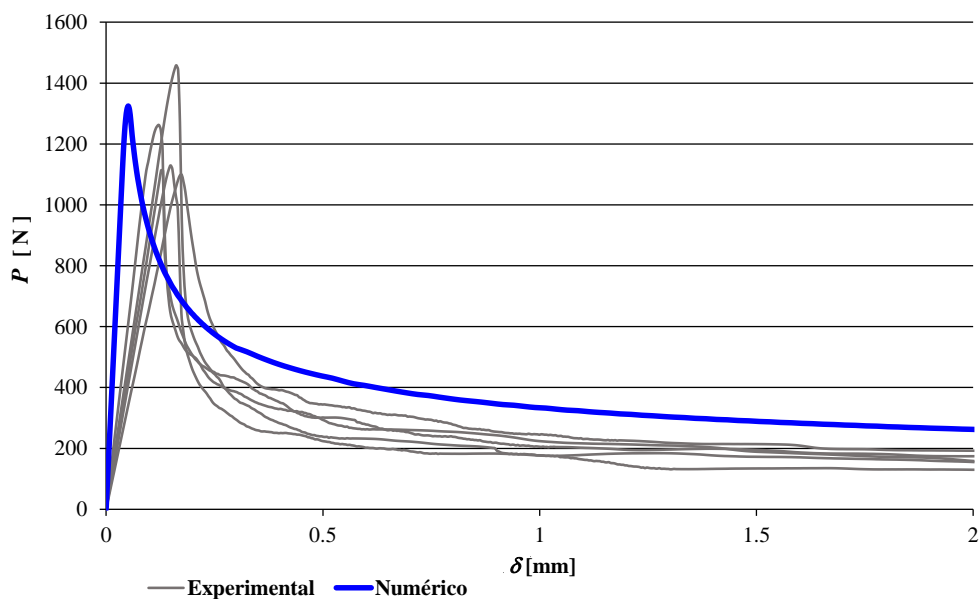


Figura 77 – Comparação da curva obtida numericamente com as curvas experimentais para juntas adesivas com o Araldite® 2015.

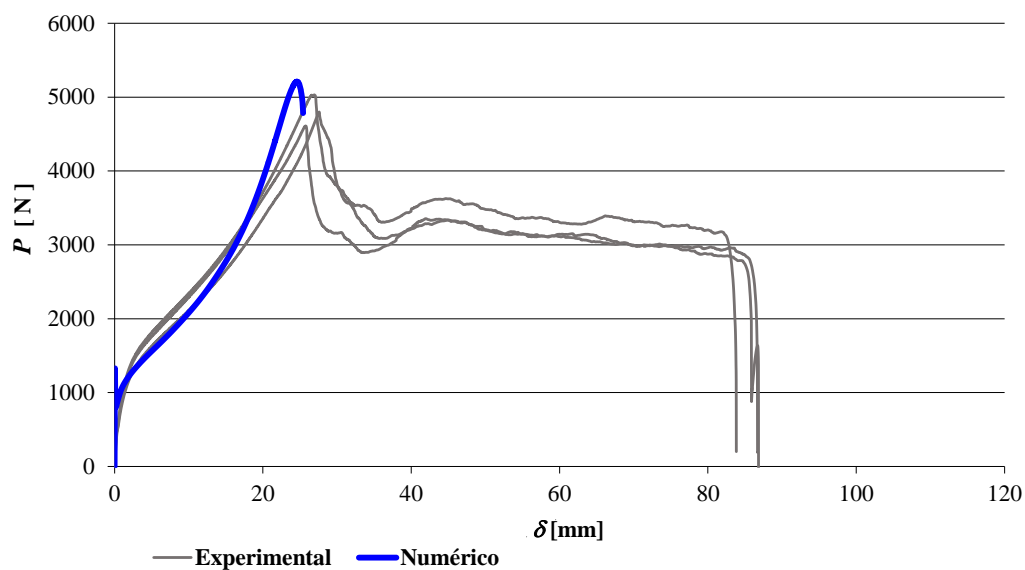


Figura 78 – Comparação da curva obtida numericamente com as curvas experimentais para juntas híbridas com o Araldite® 2015.

#### 4.4.4 Juntas coladas com Sikaforce® 7752

Na Figura 79 apresentam-se as curvas  $P-\delta$  obtidas numérica e experimentalmente para as juntas adesivas com o adesivo Sikaforce® 7752. Como se pode verificar, a curva numérica apresenta uma boa aproximação aos resultados experimentais. A subida inicial até à rotura

do adesivo permite observar uma diferença de rigidez menos acentuada entre a curva numérica e as curvas experimentais. Isto deve-se ao facto de o Sikaforce<sup>®</sup> 7752 ser o adesivo mais dúctil entre os três adesivos usados no presente trabalho. Numericamente o valor de  $P_{\max}$  é atingido após uma força aplicada 1402,1 N para um deslocamento de 0,17 mm, o que corresponde a uma diferença por excesso de 4,98 % relativamente ao valor experimental médio. Após a rotura inicial, nas curvas experimentais e numérica o valor da carga aplicada desce e estabiliza em valores da ordem dos 500 N até atingir a rotura total. Pode-se constatar que a aproximação numérica nas juntas adesivas com Sikaforce<sup>®</sup> 7752 é aquela que reproduz com resultados mais satisfatórios os valores experimentais.

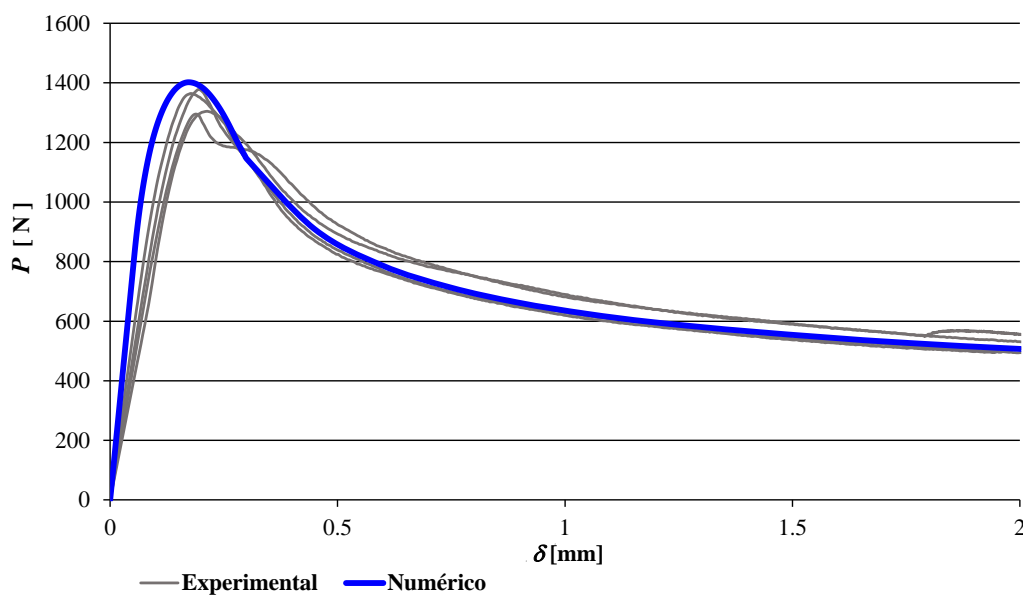


Figura 79 – Comparação da curva obtida numericamente com as curvas experimentais para juntas adesivas com o Sikaforce<sup>®</sup> 7752.

Apresentam-se na Figura 80 as curvas  $P$ - $\delta$  numéricas e experimentais para as juntas híbridas com o Sikaforce<sup>®</sup> 7752. Ainda que exista uma curva experimental com um valor de carga correspondente ao início de rotura do adesivo superior ao numérico, este valor nas restantes duas curvas é muito próximo do valor numérico. O valor de  $P_{\max}$  obtido numericamente foi de 5441,5 N, o que representa um desvio de 10,28 % relativamente ao valor médio experimental. Mais uma vez se observa que não houve convergência numérica na fase de propagação de dano devido à variação abrupta da rigidez após ser atingido  $P_{\max}$ . No entanto, pode-se observar na Figura 80 que a curva numérica apresenta uma rigidez muito semelhante à experimental no intervalo de valores em que se conseguiu obter resultados numéricos.

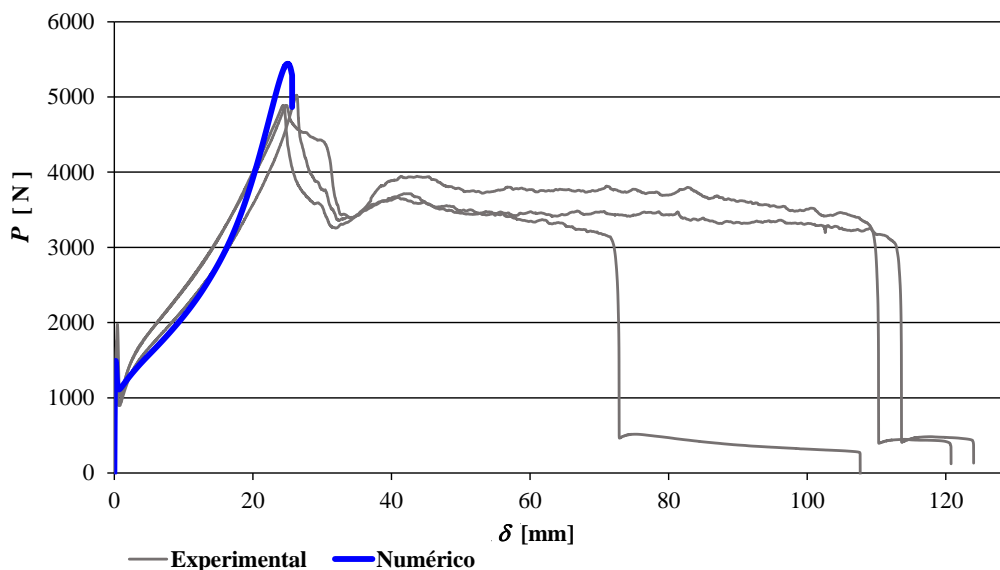


Figura 80 – Comparação da curva obtida numericamente com as curvas experimentais para juntas híbridas com o Sikaforce® 7752.

#### 4.4.5 Comparação dos valores de $P_{\max}$

A Figura 81 apresenta um gráfico comparativo entre os valores experimentais médios de  $P_{\max}$  (a cheio) e os valores de  $P_{\max}$  obtidos numericamente (com fundo branco). Tal como se tinha constatado no Capítulo 3, comparativamente às juntas soldadas, observa-se uma redução de  $P_{\max}$  nas juntas adesivas devido à rotura prematura do adesivo relativamente ao ponto de soldadura nas juntas soldadas. A redução dos valores experimentais de  $P_{\max}$  observada nas juntas adesivas relativamente às soldadas foi de 66,1 % (Araldite® AV138), 64,7 % (Araldite® 2015) e 61,1 % (Sikaforce® 7752). Constata-se assim que o Sikaforce® 7752, pela sua menor redução no valor de  $P_{\max}$  relativamente às juntas soldadas, é aquele que apresenta melhor desempenho na configuração de junta T-peel. Como citado atrás, este comportamento é explicado pela sua superior flexibilidade e ductilidade relativamente aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. De facto, como se pode constatar ao comparar a Tabela 10 com a Tabela 8 a Tabela 9, o Sikaforce® 7752 é bastante mais flexível, o que se traduz em menores gradientes de tensões na proximidade da extremidade carregada do adesivo (Fernandes et al. 2015). Esta diferença pode ser observada na Figura 70 para as tensões  $\sigma_y$  e na Figura 71 para as tensões  $\tau_{xy}$ . Por outro lado, a ductilidade do Sikaforce® 7752, patente nos valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  da Tabela 10, em comparação com os valores do Araldite® AV138 (Tabela 8) e 2015 (Tabela 9), também permite uma plastificação significativa da camada de adesivo quando o limite elástico do adesivo é atingido. Este efeito

ocorre, embora em menor escala, com o adesivo Araldite® 2015, e é quase inexistente para o adesivo Araldite® AV138, o que justifica o seu pior desempenho, embora seja o adesivo com mais resistência.

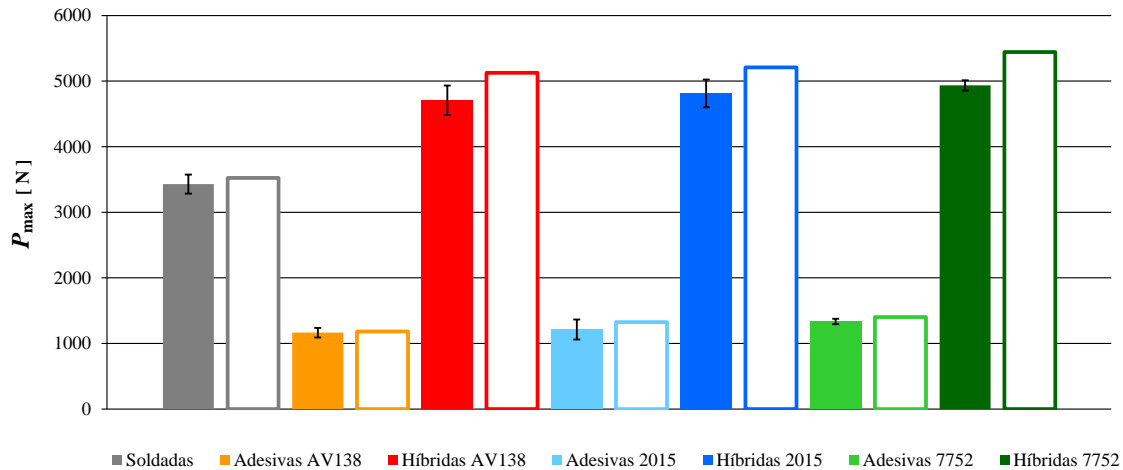


Figura 81 – Valores experimentais médios de  $P_{max}$  com respetivo desvio padrão (a cheio) e valores de  $P_{max}$  obtidos numericamente (com fundo branco).

Relativamente às juntas soldadas, as juntas híbridas apresentam experimentalmente um aumento percentual de  $P_{max}$  de 37,2 % (Araldite® AV138), 40,3 % (Araldite® 2015) e 43,8 % (Sikaforce® 7752). A diferença observada deve-se maioritariamente à melhor distribuição de tensões  $\sigma_y$  das juntas híbridas comparativamente às juntas soldadas (Figura 72). De facto, as tensões  $\sigma_y$  no ponto de soldadura reduzem significativamente com a introdução da camada de adesivo, que na configuração híbrida passa a suportar esforços significativos, nomeadamente na extremidade carregada da camada de adesivo. Também se observa uma melhor distribuição de tensões  $\tau_{xy}$ , conforme mostra a Figura 73. Por outro lado, a melhoria percentual das juntas híbridas relativamente à junta soldada aumenta com a ductilidade do adesivo, o que pode ser explicado de forma análoga ao discutido para as juntas adesivas. De facto, a maior flexibilidade do adesivo Sikaforce® 7752 permite uma distribuição de tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  mais favorável em regime elástico (Figura 72 e Figura 73, respetivamente). Acresce ainda que a ductilidade deste adesivo permite um processo de rotura mais gradual, como se observou na parte experimental deste trabalho, e após plastificação significativa da camada de adesivo. Este comportamento ocorre em escala mais reduzida para o adesivo Araldite® 2015 e é mínimo para o adesivo Araldite® AV138, que apresentou os piores resultados.

Fazendo a análise comparativa entre as juntas adesivas e híbridas, observa-se que o aumento de  $P_{\max}$  das juntas adesivas para as híbridas foi significativo, nomeadamente de 304,1 % (Araldite® AV138), 297,0 % (Araldite® 2015) e 269,4 % (Sikaforce® 7752). Esta diferença pode ser explicada pelo facto de, quando  $P_{\max}$  é atingida (após rotura da camada de adesivo entre a extremidade carregada da junta e a proximidade do ponto de soldadura), o adesivo na proximidade do ponto de soldadura ainda tem um papel efetivo na transferência de esforços, o que ajuda ao aumento da resistência da junta. Igualmente aos casos analisados anteriormente, a flexibilidade do adesivo permite que uma maior porção do adesivo resista a esforços, enquanto a sua maior ductilidade admite uma maior plastificação antes da rotura na zona próxima do ponto de soldadura.

A Figura 81 permite também constatar a adequabilidade da técnica de MDC para previsão da resistência das juntas em estudo. De facto, relativamente às juntas soldadas o modelo numérico prevê um valor de  $P_{\max}$  2,73 % mais elevado do que o valor experimental médio. Nas juntas adesivas com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, os modelos numéricos preveem valores de  $P_{\max}$  mais elevados em 1,46 %, 9,26 % e 4,98 % respetivamente, relativamente aos valores experimentais médios de  $P_{\max}$ . Nas juntas híbridas os modelos numéricos continuam a tendência da previsão de valores  $P_{\max}$  mais elevados do que os valores médios experimentais. Assim, os modelos numéricos previram os valores experimentais médios de  $P_{\max}$  por excesso em 8,92 % (Araldite® AV138), 8,25 % (Araldite® 2015) e 10,28 % (Sikaforce® 7752). Enquanto as previsões para as juntas adesivas são perfeitamente aceitáveis, no caso das juntas híbridas considera-se que experimentalmente possa ter havido danificação e até expulsão do adesivo induzida no processo de soldadura na proximidade do ponto de soldadura, o que pode explicar a diferença de aproximadamente 10 % entre os resultados experimentais e numéricos. Este comportamento foi observado no trabalho de Campilho et al. (2012) para juntas híbridas de sobreposição simples com o adesivo Araldite® 2015. Assim sendo, considera-se que a técnica de MDC é adequada para a modelação e previsão de resistência deste tipo de juntas, pelo que pode ser efetivamente usada para efeitos de projeto deste tipo de juntas, com as vantagens em termos de custos e tempo de projeto daí decorrentes.



# 5 Conclusões

No presente trabalho foi apresentado um estudo experimental e numérico por MEF que permitiu comparar três técnicas de ligação em juntas T-peel: a ligação soldada, adesiva e adesiva-soldada. Este estudo permitiu ainda testar a capacidade do MEF e dos MDC em simular o comportamento deste tipo de ligações quando submetidas a esforços de arrancamento. Foram utilizados aderentes de aço C45E, e os adesivos utilizados foram o Araldite® AV138, que apresenta um comportamento frágil e rígido, o Sikaforce® 7752 com alta ductilidade e o Araldite® 2015, que apresenta um comportamento intermédio entre os citados atrás. Os resultados obtidos da análise permitiram também selecionar qual o adesivo que maximiza a resistência das juntas adesivas e adesivas-soldadas.

Experimentalmente verificou-se que, para as juntas adesivas T-peel, a ductilidade do adesivo melhora a resistência ao arrancamento. Este facto constata-se pelos valores de  $P_{\max}$  médios obtidos, 1164,58 N (Araldite® AV138), 1212,54 N (Araldite® 2015) e 1335,57 N (Sikaforce® 7752). Comparativamente às juntas soldadas, as juntas adesivas apresentam uma forte redução de  $P_{\max}$ , contudo adesivos com maior ductilidade apresentam uma diminuição menos acentuada de  $P_{\max}$ , 66,1 % (Araldite® AV138), 64,7 % (Araldite® 2015) e 61,1 % (Sikaforce® 7752). Nas juntas híbridas verifica-se um aumento percentual de  $P_{\max}$  médio relativamente às soldadas de  $P_{\max}$  de 37,2 % (Araldite® AV138), 40,3 % (Araldite® 2015) e 43,8 % (Sikaforce® 7752). Assim, é razoável afirmar que o aumento da resistência nas juntas híbridas, associado a outras vantagens das mesmas relativamente às juntas soldadas, pode justificar o custo benefício do seu uso em aplicações industriais.

A análise numérica permitiu avaliar as tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  ao longo da camada de adesivo, para uma melhor compreensão do processo de rotura e das diferenças verificadas em função do tipo de adesivo e configuração de junta (soldada, adesiva ou híbrida). Nas juntas adesivas observa-se que as tensões  $\tau_{xy}$  são meramente residuais face ao carregamento imposto, e que

as tensões  $\sigma_y$  estão fortemente localizadas na extremidade do adesivo onde se inicia a rotura da junta ( $x/L=0$ ). Nesta região de concentração de tensões, o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7752 é aquele que apresenta menores valores de pico de tensão  $\sigma_y$  normalizada devido a ser o adesivo menos rígido dos três estudados. Face a este resultado, considerou-se que este adesivo é o mais adequado para as juntas adesivas. As juntas híbridas confirmam a tendência observada para as juntas adesivas, acrescendo o facto da combinação do adesivo com ponto de soldadura provocar um decréscimo de tensões considerável relativamente às tensões da junta puramente soldada. Comparativamente com as juntas adesivas, as juntas híbridas apresentam uma distribuição de tensões mais favorável na medida em que há um aumento considerável das cargas transmitidas na zona do ponto de soldadura.

Na previsão numérica verifica-se que, nas juntas soldadas, os MDC preveem um valor de  $P_{max}$  2,73 % mais elevado do que o valor experimental médio. Nas juntas adesivas, os modelos numéricos produzem valores de  $P_{max}$  mais elevados em 1,46 % (Araldite<sup>®</sup> AV138), 9,26 % (Araldite<sup>®</sup> 2015) e 4,98 % (Sikaforce<sup>®</sup> 7752) relativamente aos valores experimentais médios. Nas juntas híbridas, a diferença dos valores numéricos de  $P_{max}$  para os valores experimentais médios, por excesso, foi de 8,92 % (Araldite<sup>®</sup> AV138), 8,25 % (Araldite<sup>®</sup> 2015) e 10,28 % (Sikaforce<sup>®</sup> 7752). Verifica-se que as previsões das juntas híbridas apresentam desvios, relativamente à resistência experimental, superiores aos obtidos para as juntas soldadas e adesivas. Considera-se que este comportamento se pode dever à expulsão de adesivo da junta durante processo de soldadura, o que pode afetar os valores experimentais de  $P_{max}$ , afastando assim a junta experimental do modelo idealizado numericamente. Conclui-se que a técnica de MDC em conjunto com o MEF apresenta uma precisão aceitável e é adequada para a modelação e previsão de resistência de juntas T-peel soldadas, adesivas e adesivas-soldadas.

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

- Estudo da influência da resistência do aderente na resistência das juntas T-peel adesivas-soldadas face às soldadas e adesivas;
- Teste de diferentes leis coesivas em juntas T-peel adesivas e adesivas-soldadas com adesivos dúcteis;

- Avaliação da influência da espessura dos aderentes na resistência das juntas adesivas e adesivas-soldadas;
- Estudo da influência do excesso de adesivo na sua extremidade solicitada;
- Análise do Método de Elementos Finitos Extendido para a previsão da resistência das juntas.



## *Referências*

- Abaqus (2014). Abaqus Documentation, Dassault Systèmes.
- Adams, R. D. (1986). The mechanics of bonded joints. Int. Conf. Str. Adhes. Eng. University of Bristol, UK: 17–24.
- Adams, R. D. (2005). Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications. Cambridge, Woodhead Publishing.
- Adams, R. D., Comyn, J. e Wake, W. C. (1997). Structural Adhesive Joints in Engineering. Heidelberg, Springer.
- Adams, R. D. e Davies, R. 1996. Strength of Joints Involving Composites. The Journal of Adhesion **59**: 171-182.
- Adams, R. D. e Davies, R. (2002a). Strength of lap shear joints. The Mechanics of Adhesion. D. A. Dillard and A. V. Pocius. Amsterdam,, Elsevier.
- Adams, R. D. e Davies, R. G. H. (2002b). Chapter 4 - Strength of lap shear joints. Adhesion Science and Engineering. M. C. V. Pocius. Amsterdam, Elsevier Science B.V.: 111-144.
- Adams, R. D. e Harris, J. A. 1984. Strength prediction of bonded single lap joints by nonlinear finite element methods. Int J Adhes Adhes **4**: 65–78.
- Adams, R. D. e Mallick, V. 1992. A Method for the Stress Analysis of Lap Joints. The Journal of Adhesion **38**: 199-217.
- Adams, R. D. e Peppiatt, N. A. 1974. Stress analysis of adhesive-bonded lap joints. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design **9**: 185-196.
- Adams, R. D. e Peppiatt, N. A. 1977. Stress Analysis of Adhesive Bonded Tubular Lap Joints. The Journal of Adhesion **9**: 1-18.
- Al-Samhan, A. e Darwish, S. M. H. 2003a. Finite element modeling of weld-bonded joints. Journal of Materials Processing Technology **142**: 587-598.
- Al-Samhan, A. e Darwish, S. M. H. 2003b. Strength prediction of weld-bonded joints. International Journal of Adhesion and Adhesives **23**: 23-28.
- Alfano, G. e Crisfield, M. A. 2001. Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues. International Journal for Numerical Methods in Engineering **50**: 1701-1736.
- Alfredsson, K. 2003. On the determination of constitutive properties of adhesive layers loaded in shear an inverse solution. International Journal of Fracture **123**: 49–62.
- Allix, O. e Corigliano, A. 1996. Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens. International Journal of Fracture **77**: 111-140.

- Allman, D. J. 1977. A Theory for Elastic Stresses in Adhesive Bonded Lap Joints. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics* **30**: 415-436.
- Andersson, T. e Biel, A. 2006. On the effective constitutive properties of a thin adhesive layer loaded in peel. *International Journal of Fracture* **141**: 227-246.
- Andersson, T. e Stigh, U. 2004. The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces. *International Journal of Solids and Structures* **41**: 413-434.
- ASTM (D5573-99). Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced Plastic Joints. West Conshohocken, ASTM International.
- Azevedo, J. C. S. (2014). Determinação da tenacidade à fratura em tração (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF). Tese de Mestrado Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Balawender, T., Sadowski, T. e Golewski, P. 2012. Numerical analysis and experiments of the clinch-bonded joint subjected to uniaxial tension. *Computational Materials Science* **64**: 270-272.
- Balawender, T., Sadowski, T. e Kneć, M. (2011). Technological Problems and Experimental Investigation of Hybrid: Clinched - Adhesively Bonded Joint. *Archives of Metallurgy and Materials*. **56**: 438.
- Banea, M. D., da Silva, L. F. M. e Campilho, R. D. S. G. 2010. Temperature Dependence of the Fracture Toughness of Adhesively Bonded Joints. *Journal of Adhesion Science and Technology* **24**: 2011-2026.
- Barenblatt, G. I. 1959. The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* **23**: 622-636.
- Barenblatt, G. I. 1962. The mathematical theory of equilibrium crack in the brittle fracture. *Applied Mechanics and Technical Physics* **4**.
- Bartczak, B., Mucha, J. e Trzepieciński, T. 2013. Stress distribution in adhesively-bonded joints and the loading capacity of hybrid joints of car body steels for the automotive industry. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **45**: 42-52.
- Bigwood, D. A. e Crocombe, A. D. 1989. Elastic analysis and engineering design formulae for bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **9**: 229-242.
- Campilho, R. D. S. G., Banea, M. D., Neto, J. A. B. P. e da Silva, L. F. M. 2013. Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **44**: 48-56.
- Campilho, R. D. S. G., Banea, M. D., Pinto, A. M. G., da Silva, L. F. M. e de Jesus, A. M. P. 2011a. Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **31**: 363-372.

- Campilho, R. D. S. G., de Moura, M. F. S. F. e Domingues, J. J. M. S. 2005. Modelling single and double-lap repairs on composite materials. *Composites Sci. Technol.* **65**: 1948.
- Campilho, R. D. S. G., de Moura, M. F. S. F. e Domingues, J. J. M. S. 2008. Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs. *International Journal of Solids and Structures* **45**: 1497-1512.
- Campilho, R. D. S. G., Pinto, A. M. G., Banea, M. D. e da Silva, L. F. M. 2012. Optimization study of hybrid spot-welded/bonded single-lap joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **37**: 86-95.
- Campilho, R. D. S. G., Pinto, A. M. G., Banea, M. D., Silva, R. F. e da Silva, L. F. M. 2011b. Strength Improvement of Adhesively-Bonded Joints Using a Reverse-Bent Geometry. *Journal of Adhesion Science and Technology* **25**: 2351-2368.
- Castagnetti, D., Dragoni, E. e Spaggiari, A. 2010. Failure analysis of bonded T-peel joints: Efficient modelling by standard finite elements with experimental validation. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **30**: 306-312.
- Chandra, N., Li, H., Shet, C. e Ghonem, H. 2002. Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces. *International Journal of Solids and Structures* **39**: 2827-2855.
- Chang, B., Shi, Y. e Dong, S. 2000. 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* **100**: 171-178.
- Chang, B., Shi, Y. e Lu, L. 2001. Studies on the stress distribution and fatigue behavior of weld-bonded lap shear joints. *Journal of Materials Processing Technology* **108**: 307-313.
- Charalambides, M. N., Kinloch, A. J. e Matthews, F. L. (1997). Strength prediction of bonded joints. AGARD Conference, 83rd Meeting, AGARD.
- Charbonnet, P., Clad, A., Di Fant-Jaekels, H. e Thirion, J. 2000. Weldbonding: a very well adapted joining technique to decrease the weight of steel structures *Revue de métallurgie* **97**: 543 - 551.
- Chen, D. e Cheng, S. 1983. An Analysis of Adhesive-Bonded Single-Lap Joints. *Journal of Applied Mechanics* **50**: 109-115.
- Chen, J. 2002. Predicting Progressive Delamination of Stiffened Fibre-Composite Panel and Repaired Sandwich Panel by Decohesion Models. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* **15**: 429-442.
- Chen, X. (2013). Numerical Study of Stable Tearing Crack Growth Events Using The cohesive Zone Model Approach. Doctor, College of Engineering and Computing University of South Carolina.

- Choi, J. H. e Lee, D. G. 1994. The Torque Transmission Capabilities of the Adhesively-Bonded Tubular Single Lap Joint and the Double Lap Joint. *The Journal of Adhesion* **44**: 197-212.
- Choupani, N. 2008. Interfacial mixed-mode fracture characterization of adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **28**: 267-282.
- Cornec, A., Scheider, I. e Schwalbe, K.-H. 2003. On the practical application of the cohesive model. *Engineering Fracture Mechanics* **70**: 1963-1987.
- Courant, R. 1943. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. 1-23.
- Crocombe, A. D. 1989. Global yielding as a failure criterion for bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **9**: 145-153.
- Crocombe, A. D. e Adams, R. D. 1981. Influence of the spew fillet and other parameters on the stress distribution in the single lap joint. *J. Adhes* **13**: 141–155.
- Crocombe, A. D. e Adams, R. D. 1982. An Elasto-Plastic Investigation of the Peel Test. *The Journal of Adhesion* **13**: 241-267.
- Czarnocki, P. e Piekarski, K. 1986. Fracture strength of an adhesive-bonded joint. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **6**: 93-95.
- da Silva, L. F. M. (2008). *Modeling of Adhesively Bonded Joints*. Heidelberg, Springer.
- da Silva, L. F. M. e Adams, R. D. 2007. Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **27**: 227-235.
- da Silva, L. F. M. e Campilho, R. D. S. G. (2012a). *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. Heidelberg, Springer.
- da Silva, L. F. M. e Campilho, R. D. S. G. (2012b). *Advances in Numerical Modelling of Adhesives Joints*. Heidelberg, Springer.
- da Silva, L. F. M., das Neves, P. J. C., Adams, R. D. e Spelt, J. K. 2009a. Analytical models of adhesively bonded joints—Part I: Literature survey. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **29**: 319-330.
- da Silva, L. F. M., das Neves, P. J. C., Adams, R. D., Wang, A. e Spelt, J. K. 2009b. Analytical models of adhesively bonded joints—Part II: Comparative study. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **29**: 331-341.
- da Silva, L. F. M., de Magalhães, A. G. e de Moura, M. F. S. F. (2007). *Juntas Adesivas Estruturais*. Porto, Publindústria.
- da Silva, L. F. M., Lima, R. F. T. e Teixeira, R. M. S. 2009c. Development of a Computer Program for the Design of Adhesive Joints. *The Journal of Adhesion* **85**: 889-918.
- da Silva, L. F. M., Pirondi, A. e Öchsner, A. (2011). *Hybrid adhesive joints*. Heidelberg, Springer.

- Darwish, S. M. 2003. Weldbonding strengthens and balances the stresses in spot-welded dissimilar thickness joints. *Journal of Materials Processing Technology* **134**: 352-362
- Darwish, S. M. e Al-Samhan, A. 2004a. Design rationale of weld-bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **24**: 367-377.
- Darwish, S. M. e Al-Samhan, A. M. 2004b. Peel and shear strength of spot-welded and weld-bonded dissimilar thickness joints. *Journal of Materials Processing Technology* **147**: 51-59.
- Darwish, S. M. H. e Ghanya, A. 2000. Critical assessment of weld-bonded technologies. *Journal of Materials Processing Technology* **105**: 221-229.
- Das, M., Madenci, E. e Ambur, D. R. 2008. Three-dimensional nonlinear analyses of scarf repair in composite laminates and sandwich panels. *Journal of Mechanics of Materials and Structures* **3**: 1641-1658.
- de Borst, R. 2003. Numerical aspects of cohesive-zone models. *Engineering Fracture Mechanics* **70**: 1743-1757.
- de Bruyne, N. A. 1957. How Glue Sticks. *Nature* **180**: 262-266.
- de Moura, M. F. S. F., Campilho, R. D. S. G. e Gonçalves, J. P. M. 2008. Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading. *Composites Science and Technology* **68**: 2224-2230.
- de Moura, M. F. S. F., Campilho, R. D. S. G. e Gonçalves, J. P. M. 2009a. Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints. *International Journal of Solids and Structures* **46**: 1589-1595.
- de Moura, M. F. S. F., de Morais, A. B. e de Magalhães, A. G. (2009b). *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, Publindustria.
- Delale, F., Erdogan, F. e Aydinoglu, M. N. 1981. Stresses in Adhesively Bonded Joints: A Closed-Form Solution. *Journal of Composite Materials* **15**: 249-271.
- Dillard, D. A. (2010). *Advances in structural adhesive bonding*. Cambridge, Woodhead publishing limited.
- Dillard, D. A., Singh, H. K., Pohlit, D. J. e Starbuck, J. M. 2009. Observations of Decreased Fracture Toughness for Mixed Mode Fracture Testing of Adhesively Bonded Joints. *Journal of Adhesion Science and Technology* **23**: 1515-1530.
- Dorn, L. e Liu, W. 1993. The stress state and failure properties of adhesive-bonded plastic/metal joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **13**: 21-31.
- Dugdale, D. S. 1960. Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **8**: 100-104.
- Dunn, D. J. (2004). *Engineering and Structural Adhesives*, FLD Enterprises Inc.
- E.A.A (2015). *EAA Aluminium Automotive Manual-Joining: Hybrid joining techniques*, European Aluminium Association.

- Ebnesajjad, S. (2008). *Adhesives Technology Handbook* Norwich, N.Y, U.S.A, William Andrew Inc.,
- Ebnesajjad, S. e Landrock, A. H. (2014). *Adhesives Technology Handbook*, 3rd Edition. Amsterdam, Netherlands, William Andrew.
- Elices, M., Guinea, G. V., Gómez, J. e Planas, J. 2002. The cohesive zone model: advantages, limitations and challenges. *Engineering Fracture Mechanics* **69**: 137-163.
- Faneco, T. M. S. (2014). *Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Fernandes, T. A. B., Campilho, R. D. S. G., Banea, M. D. e da Silva, L. F. M. 2015. Adhesive Selection for Single Lap Bonded Joints: Experimentation and Advanced Techniques for Strength Prediction. *The Journal of Adhesion* **91**: 841-862.
- Fernlund, G., Papini, M., McCammond, D. e Spelt, J. K. 1994. Fracture load predictions for adhesive joints. *Composites Science and Technology* **51**: 587-600.
- Frostig, Y., Thomsen, O. e Mortensen, F. 1999. Analysis of Adhesive-Bonded Joints, Square-End, and Spew-Fillet—High-Order Theory Approach. *Journal of Engineering Mechanics* **125**: 1298-1307.
- Fu, M. e Mallick, P. K. 2001. Fatigue of hybrid (adhesive/bolted) joints in SRIM composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **21**: 145-159.
- Gilchrist, M. D. e Smith, R. A. 1993. Development of cohesive fatigue cracks in T-peel joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **13**: 53-57.
- Goland, M. e Reissner, E. 1944. The Stresses in Cemented Joints. *Journal of Applied Mechanics*: A17-A27.
- Gonçalves, J. P. M., de Moura, M. F. S. F. e de Castro, P. M. S. T. 2002. A three-dimensional finite element model for stress analysis of adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **22**: 357-365.
- Greenwood, L., Boag, T. e McLaren, A. (1969). *Stress distribution in lap joints*. Adhesion: fundamentals and practice. London, McLaren and Sons Ltd.: 273-279.
- Griffith, A. A. 1921. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **221**: 163-198.
- Gustafson, P. A. e Waas, A. M. 2009. The influence of adhesive constitutive parameters in cohesive zone finite element models of adhesively bonded joints. *International Journal of Solids and Structures* **46**: 2201-2215.
- Harris, J. A. e Adams, R. A. 1984. Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **4**: 65-78.
- Hart-Smith, L. J. (1973a). *Adhesive-bonded double-lap joints*, NASA Contract Report, NASA CR-112235. **null**.

- Hart-Smith, L. J. (1973b). Adhesive-Bonded Single Lap-Joints. California.
- Hart-Smith, L. J. (1982). Design methodology for bonded-bolted composite joint. AFWAL-TR-81-3154, Douglas Aircraft Company.
- Hart-Smith, L. J. 1985. Bonded-bolted composite joints. *Journal of Aircraft* **22**: 993-1000.
- He, X. 2011. A review of finite element analysis of adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **31**: 248-264.
- Hillerborg, A., Modéer, M. e Petersson, P. E. 1976. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research* **6**: 773-781.
- Högberg, J. L. e Stigh, U. 2006. Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer. *Engineering Fracture Mechanics* **73**: 2541-2556.
- Hutchinson, J. W. 1968. Singular behaviour at the end of a tensile crack in a hardening material. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **16**: 13-31.
- Irwin, G. (1958). Fracture. *Elasticity and Plasticity / Elastizität und Plastizität*. S. Flügge, Springer Berlin Heidelberg. **3 / 6**: 551-590.
- Jin, Z. H. e Sun, C. T. 2005. Cohesive Fracture Model Based on Necking. *International Journal of Fracture* **134**: 91-108.
- Jin, Z. H. e Sun, C. T. 2006. A comparison of cohesive zone modeling and classical fracture mechanics based on near tip stress field. *International Journal of Solids and Structures* **43**: 1047-1060.
- Jousset, P. e Rachik, M. 2014. Comparison and evaluation of two types of cohesive zone models for the finite element analysis of fracture propagation in industrial bonded structures. *Engineering Fracture Mechanics* **132**: 48-69.
- Kafkalidis, M. S. e Thouless, M. D. 2002. The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints. *International Journal of Solids and Structures* **39**: 4367-4383.
- Kelly, G. 2005. Load transfer in hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints. *Composite Structures* **69**: 35-43.
- Kelly, G. 2006. Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints. *Composite Structures* **72**: 119-129.
- Khan, M. I. e Pandey, A. K. 2013. State of Art in Modern Resistance Spot Welding. *International Journal of Technical Research and Applications* **1**: 19-25.
- Khoramishad, H., Crocombe, A. D., Katnam, K. B. e Ashcroft, I. A. 2010. Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model. *International Journal of Fatigue* **32**: 1146-1158.

- Kim, K.-S., Yoo, J.-S., Yi, Y.-M. e Kim, C.-G. 2006. Failure mode and strength of uni-directional composite single lap bonded joints with different bonding methods. *Composite Structures* **72**: 477-485.
- Kregting, R. (2005). Cohesive zone models. towards a robust implementation of irreversible behaviour, Technische Universiteit Eindhoven.
- Lee, S. J. e Lee, D. G. 1992. Development of a Failure Model for the Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joint. *The Journal of Adhesion* **40**: 1-14.
- Lee, Y.-H., Lim, D.-W., Choi, J.-H., Kweon, J.-H. e Yoon, M.-K. 2010. Failure load evaluation and prediction of hybrid composite double lap joints. *Composite Structures* **92**: 2916-2926.
- Leffler, K., Alfredsson, K. S. e Stigh, U. 2007. Shear behaviour of adhesive layers. *International Journal of Solids and Structures* **44**: 530-545.
- Liljedahl, C. D. M., Crocombe, A. D., Wahab, M. A. e Ashcroft, I. A. 2006. Damage modelling of adhesively bonded joints. *International Journal of Fracture* **141**: 147-161.
- Magalhães, A. G., de Moura, M. F. S. F. e Gonçalves, J. P. M. 2005. Evaluation of stress concentration effects in single-lap bonded joints of laminate composite materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **25**: 313-319.
- Mahdi, S., Kim, H.-J., Gama, B. A., Yarlagadda, S. e Gillespie, J. W. 2003. A Comparison of Oven-cured and Induction-cured Adhesively Bonded Composite Joints. *Journal of Composite Materials* **37**: 519-542.
- Marannano, G. e Zuccarello, B. 2015. Numerical experimental analysis of hybrid double lap aluminum-CFRP joints. *Composites Part B: Engineering* **71**: 28-39.
- Marques, G. P. (2014). Influência do tipo de adesivo em juntas híbridas soldadas-adesivas. Tese de mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Moreira, R. D. F. (2013). Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido com reforços exteriores para aumento da resistência. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Moroni, F., Pironi, A. e Kleiner, F. 2010. Experimental analysis and comparison of the strength of simple and hybrid structural joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **30**: 367-379.
- Needleman, A. 1987. A Continuum Model for Void Nucleation by Inclusion Debonding. *Journal of Applied Mechanics* **54**: 525-531.
- Neto, J. A. B. P., Campilho, R. D. S. G. e da Silva, L. F. M. 2012. Parametric study of adhesive joints with composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **37**: 96-101.
- Nuismer, R. J. e Whitney, J. M. 1975. Uniaxial failure of composite laminates containing stress concentrations. *Fracture Mech Compos ASTM STP* **593**.

- Ojalvo, I. U. e Eidinof, H. L. 1978. Bond Thickness Effects upon Stresses in Single-Lap Adhesive Joints. *AIAA Journal* **16**.
- Olsson, P. e Stigh, U. 1989. On the determination of the constitutive properties of thin interphase layers — An exact inverse solution. *International Journal of Fracture* **41**: R71-R76.
- Ortiz, M. e Pandolfi, A. 1999. Finite-deformation irreversible cohesive elements for three-dimensional crack-propagation analysis. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* **44**: 1267-1282.
- Osnes, H. e Andersen, A. 2003. Computational analysis of geometric nonlinear effects in adhesively bonded single lap composite joints. *Composites Part B: Engineering* **34**: 417-427.
- Panigrahi, S. K. e Pradhan, B. 2007. Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* **26**: 183-201.
- Petrie, E. (1999). *Handbook of Adhesives & Sealants*, McGraw-Hill Education.
- Pinto, A. M. G. (2007). *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração de substrato*. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pizzi, A. e Mittal, K. L. (2003). *Handbook of Adhesive Technology, Revised and Expanded* U.S.A, Marcel Dekker.
- Pocius, A. V. (2002). *Adhesion and Adhesives Technology, An Introduction*, Hanser.
- Quispe Rodríguez, R., de Paiva, W. P., Sollero, P., Bertoni Rodrigues, M. R. e de Albuquerque, É. L. 2012. Failure criteria for adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **37**: 26-36.
- Reis, P. N. B., Antunes, F. J. V. e Ferreira, J. A. M. 2005. Influence of superposition length on mechanical resistance of single-lap adhesive joints. *Composite Structures* **67**: 125-133.
- Renton, W. J. e Vinson, J. R. 1975. The Efficient Design of Adhesive Bonded Joints. *The Journal of Adhesion* **7**: 175-193.
- Rice, J. R. e Rosengren, G. F. 1968. Plane strain deformation near a crack tip in a power-law hardening material. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **16**: 1-12.
- Rodríguez, R. Q., Sollero, P. e Rodrigues, M. B. (2011). *Stress Analysis And Failure Criteria Of Adhesive Bonded Single Lap Joints*. 21st International Congress of Mechanical Engineering, Natal, Brasil.
- Roth, S., Hütter, G. e Kuna, M. 2014. Simulation of fatigue crack growth with a cyclic cohesive zone model. *International Journal of Fracture* **188**: 23-45.
- Roy, Y. A. e Dodds, R., Jr. 2001. Simulation of ductile crack growth in thin aluminum panels using 3-D surface cohesive elements. *International Journal of Fracture* **110**: 21-45.
- Sadowski, T., Balawender, T., Sliwa, R., Golewski, P. e Kneć, M. (2013). *Modern Hybrid Joints in Aerospace: Modelling and Testing / Nowoczesne Połączenia Hybrydowe W*

- Lotnictwie: Modelowanie I Badania Eksperymentalne. Archives of Metallurgy and Materials. **58**: 163.
- Sadowski, T., Golewski, P. e Zarzeka-Raczkowska, E. 2011. Damage and failure processes of hybrid joints: Adhesive bonded aluminium plates reinforced by rivets. Computational Materials Science **50**: 1256-1262.
- Sadowski, T., Kneć, M. e Golewski, P. 2010. Experimental investigations and numerical modelling of steel adhesive joints reinforced by rivets. International Journal of Adhesion and Adhesives **30**: 338-346.
- Sadowski, T. e Zarzeka-Raczkowska, E. (2012). 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. Archives of Metallurgy and Materials. **57**: 1127.
- Santos, J. F. O. e Quintino, L. (1993a). Processos de soldadura. Lisboa, Instituto de Soldadura e Qualidade.
- Santos, J. F. O. e Quintino, L. (1993b). Processos de soldadura. Lisboa, Instituto de Soldadura e Qualidade.
- Scheider, I. e Brocks, W. 2003. Simulation of cup–cone fracture using the cohesive model. Engineering Fracture Mechanics **70**: 1943-1961.
- Sørensen, B. F. 2002. Cohesive law and notch sensitivity of adhesive joints. Acta Materialia **50**: 1053-1061.
- Sørensen, B. F. e Jacobsen, T. K. 2003. Determination of cohesive laws by the J integral approach. Engineering Fracture Mechanics **70**: 1841-1858.
- Sørensen, B. F. e Kirkegaard, P. 2006. Determination of mixed mode cohesive laws. Engineering Fracture Mechanics **73**: 2642-2661.
- Taib, A. A., Boukhili, R., Achiou, S., Gordon, S. e Boukehili, H. 2006. Bonded joints with composite adherends. Part I. Effect of specimen configuration, adhesive thickness, spew fillet and adherend stiffness on fracture. International Journal of Adhesion and Adhesives **26**: 226-236.
- Tsai, M. Y., Morton, J. e Matthews, F. L. 1995. Experimental and Numerical Studies of a Laminated Composite Single-Lap Adhesive Joint. Journal of Composite Materials **29**: 1254-1275.
- Tvergaard, V. e Hutchinson, J. W. 1992. The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic-plastic solids. Journal of the Mechanics and Physics of Solids **40**: 1377-1397.
- Vallée, T., Correia, J. R. e Keller, T. 2006. Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles – Part II: Strength prediction. Composites Science and Technology **66**: 1915-1930.

- van Ingen, J. W. e Vlot, A. (1993). Stress analysis of adhesively bonded single lap joints: Survey and evaluation of analyses.
- Volkersen, O. 1938. Die nietkraftverteilung in zugbeanspruchten nietverbindungen mit konstanten laschenquer-schnitten. *Luftfahrtforsch* **15**: 41-47.
- Wang, J. T. (2010). Relating cohesive zone models to linear elastic fracture mechanics. Hampton, Virginia, NASA
- Wang, R. X., Cui, J., Sinclair, A. N. e Spelt, J. K. 2003. Strength of adhesive joints with adherend yielding: I. Analytical model. *The Journal of Adhesion* **79**: 23-48.
- Wang, Y., Chen, J. e Li, H. B. 2008. Improved cohesive zone model and its application in interface contact analysis. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)* **21**: 295-302.
- Whitney, J. M. e Nuismer, R. J. 1974. Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations. *Journal of Composite Materials* **8**: 253-265.
- Williams, J. H. 1975. Stresses in Adhesive between Dissimilar Adherends. *The Journal of Adhesion* **7**: 97-107.
- Williams, M. L. 1959. The stresses around a fault or crack in dissimilar media. *Bulletin of the Seismological Society of America* **49**: 199-204.
- Wooley, G. R. e Carver, D. R. 1971. Stress concentration factors for bonded lap joints. *Journal of Aircraft* **8**.
- Xu, X. P. e Needleman, A. 1994. Numerical simulations of fast crack growth in brittle solids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **42**: 1397-1434.
- Yuceoglu, U. e Updike, D. P. 1980. Stress analysis of bonded plates and joints. *American Society of Civil Engineers* **106**: 37-56.
- Zeng, Y. (2015). Feasibility study of cohesive zone model on crack propagation in pipeline steel under monotonic and fatigue loading Master Thesis, Civil Engineering and Geosciences.
- Zhao, X. (1991). Stress and failure analysis of adhesively bonded lap joints. PhD thesis, University of Bristol.
- Zhao, X., Adams, R. D. e da Silva, L. F. M. 2011. Single Lap Joints with Rounded Adherend Corners: Experimental Results and Strength Prediction. *Journal of Adhesion Science and Technology* **25**: 837-856.